

Sommaire

École Nationale des Ponts et Chaussées
G.E.R.M.E.S.
6 et B, Avenue Blaise Pascal
Cité Descartes-Champs sur Marne
77455 MARNE LA VALLÉE CEDEX 02
Tél : 01 64 15 35 44 - Fax : 01 64 15 35 62

REVUE
FRANÇAISE
DE
GÉOTECHNIQUE
N° 120-121
4^e trimestre 2007

LA SÉCHERESSE GÉOTECHNIQUE sous la direction de Roger Cojean

Hommage à Marcel Mariotti

5

Introduction

R. COJEAN

7

Thème 1

Typologie des sécheresses sur la France et outils de suivi de la
ressource en eau utilisés à Météo-France

M. BLANCHARD, L. FRANCHISTÉGUY, F. HABETS,
E. MARTIN, J. NOILHAN

11

Retour d'expérience de la sécheresse 2003

H. DE SOLÈRE

21

Changement climatique et événements extrêmes : crues,
inondations, sécheresses. Que peut-on dire aujourd'hui ?

J-M. GRÉSILLON, E. SAUQUET, B. RENARD, M. LANG, E. LEBLOIS

27

Thème 2

Rôle de la végétation dans les processus de propagation
de la sécheresse dans les sols argileux

D. TESSIER, Y. COQUET, Y. LEFÈVRE, N. BRÉDA

35

Suivi expérimental des profils hydriques et des
déplacements verticaux dans des sols argileux
sujets au phénomène de retrait-gonflement

M. VINCENT, S. LE ROY, I. DUBUS, N. SURDYK

45

Modélisation des échanges à l'interface sol-atmosphère
et simulation numérique des profils hydriques

Y.-J. CUI, Y.-F. LU, Y.-B. GAO

59

Thème 3

Caractérisation au laboratoire de la sensibilité au retrait-gonflement des sols argileux

M. AUDIGUIER, Z. GEREMEW, S. LARIBI, R. COJEAN

67

Essai d'adsorption de bleu de méthylène : influence de paramètres du protocole expérimental sur la valeur au bleu en fonction de la minéralogie des argiles

S. LARIBI, R. COJEAN, M. AUDIGUIER, C. GRAMBIN-LAPEYRE, Z. GEREMEW

83

Recherche des paramètres d'identification géotechnique optimaux pour une classification des sols sensibles au retrait-gonflement

M. CHRÉTIEN, R. FABRE, A. DENIS, A. MARACHE

91

Retrait-gonflement des sols argileux et des marnes

J.-F. SERRATRICE

107

Modélisation numérique du comportement d'un sol gonflant chargé soumis à des variations hydriques

M. MRAD, A. ABDALLAH, F. MASROURI

121

Apport de la physico-chimie à l'étude du retrait-gonflement d'une argile plastique compactée

H. SOULI, R. SOEMITRO, J.-M. FLEUREAU

131

Comportement hydromécanique des sols gonflants soumis aux cycles hydriques

H. NOWAMOOZ, F. MASROURI

143

Thème 4

Pathologie des fondations superficielles sur sols argileux. Retour d'expérience en Midi-Pyrénées

C. JACQUARD

155

Influence du retrait et de la variabilité naturelle des sols argileux sur le comportement des fondations de maisons individuelles

A. DENIS, S.M. ELACHACHI, H. NIANDOU, M. CHRÉTIEN

165

Confortement des fondations de deux bâtiments sinistrés par la sécheresse à Palaiseau. Reprise-en sous-œuvre des fondations par micropieux et longrines

D. COUSIN, S. FORTIER

175

Phénomènes de gonflement - retrait dans des marnes, ou « schistes cartons », du Toarcien	183
A. MONJOIE, C. SCHROEDER	

Thème 5

Cartographie de l'aléa retrait-gonflement et Plans de prévention des risques	188
M. VINCENT, E. PLAT, S. LE ROY	

Apports d'un Système d'Information Géographique et de la télé-détection pour l'étude des mouvements induits par l'aléa sécheresse : applications à l'Est de l'Île-de-France	201
H. F. KAVEH, B. DEFFONTAINES, B. FRUANEAU	

La prévention des risques liés à la sécheresse géotechnique : une expérience transposable à d'autres aléas naturels	215
M. TOULEMONT, R. COJEAN	

Thème 6

Retour d'expérience en matière d'expertise dans le cadre des dossiers « sécheresse et réhydratation des sols » relatifs à l'habitat pavillonnaire	221
C. ROUME	

Point d'étape en fin 2006 sur l'assurance de la sécheresse géotechnique en France	225
R. NUSSBAUM	

La *Revue française de géotechnique* est une publication scientifique trimestrielle parrainée par les Comités français de mécanique des sols, de mécanique des roches, et de géologie de l'ingénieur, qui publie des articles et des notes techniques relevant de ces domaines. Des discussions sur les travaux publiés dans la revue sont également les bienvenues.

La *Revue française de géotechnique* se consacre à l'étude pluridisciplinaire des interactions entre l'activité humaine et le terrain naturel. Elle est donc particulièrement concernée par tout ce qui se rapporte à l'intégration de l'homme dans son environnement, dans une perspective de développement durable, ce qui inclut la prise en compte des risques naturels et anthropiques, ainsi que la fiabilité, la sécurité et la durabilité des ouvrages. Le terrain naturel intervient dans de nombreuses constructions, soit parce qu'il les porte (fondations), les constitue (remblais routiers, barrages, barrières étanches de confinement de déchets, soutènements) ou les contient (ouvrages souterrains, tunnels) ; on y extrait également de nombreuses ressources pour la production d'énergie et de matériaux et on y stocke des déchets divers.

Les terrains naturels sont des milieux complexes, spécifiques et de caractéristiques variables dans l'espace et dans le temps, composés de solides et de fluides qui y circulent ou les imprègnent. L'identification de leurs propriétés, en termes de comportement mécanique et hydraulique, est coûteuse, et donc nécessairement incomplète et incertaine. Les problèmes posés sont variés, et leur résolution engage la responsabilité de l'ingénieur. On peut citer en particulier : la conception, la construction et la maintenance d'ouvrages bâtis sur, dans ou avec le terrain, dans des sites urbains ou extra-urbains ; la stabilité de sites naturels ou construits ; l'étude de la circulation et de la qualité de l'eau souterraine ; l'exploitation des ressources naturelles...

Les instructions aux auteurs sont publiées dans chaque numéro, disponibles sur demande, et accessibles sur le site Internet des trois comités (www.geotechnique.org).

REVUE FRANÇAISE DE GÉOTECHNIQUE

Rédacteur en chef : Philippe MESTAT (LCPC)

Co-rédacteurs en chef : Denis Fabre (CNAM), Frédéric Pellet (univ. Joseph-Fourier)

Comité de lecture : Gabriel AUVINET (UNAM, Mexico), Roger COJEAN (École des mines de Paris), Alain GUILLOUX (Terrasol), D. JONGMANS (Université Joseph-Fourier, Grenoble), R. KASTNER (INSA, Lyon), A. PARRIAUX (École polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse), A. POUYA (LCPC, Paris), C. SCHROEDER (Université de Liège), J.-P. TISOT (ENSG, Nancy), Pierre VEZOLE (Eiffage), Gérard VOUILLE (École des mines de Paris)

Revue trimestrielle

Abonnement 2007 (numéros 118 à 121) franco : 130 €

Prix au numéro franco : 38 € (valable également pour les numéros anciens)

La revue est expédiée par avion dans les D.O.M.-T.O.M. et à l'étranger.

Sommaires des numéros anciens sur demande.

Presses de l'École nationale des ponts et chaussées

28, rue des Saints-Pères, 75007 Paris - Tél. : 01 44 58 27 40 – presses.ponts@mail.enpc.fr

Impression : Corlet, Imprimeur, S.A. 14110 Condé-sur-Noireau.

N° d'imprimeur : 107340. Dépôt légal : mars 2008

Les articles publiés dans cette revue n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs. Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation réservés pour tous pays.

Homage à Marcel MARIOTTI



Marcel MARIOTTI est décédé à l'âge de 82 ans, le 29 novembre 2006, au terme d'une riche carrière consacrée à la géotechnique, en grande partie menée au Maroc.

Né le 9 avril 1924 à Paris d'une famille d'origine italienne, il fit de brillantes études au lycée Carnot de Paris. Sa mère, qui adorait la musique, lui fit prendre des leçons de violon très jeune et fit de lui un musicien. Il pratiqua avec bonheur ce loisir toute sa vie, avec également des talents en peinture et en dessin, qui lui permirent d'ailleurs de transmettre ses nombreuses idées et solutions techniques.

Après son mariage avec celle qui partagea sa vie pendant plus de soixante ans, Marcel Mariotti termina ses études à l'École spéciale des travaux publics en 1946 et intégra le CEBTP à Paris, avant de s'installer au Maroc au LPEE (Laboratoire public d'essais et d'études, Casablanca) en 1949. Il se consacra pleinement pendant trente ans au service du développement de ce pays, et, en 1974, rentra en France pour terminer sa carrière au CEBTP.

La géotechnique et les approches scientifiques modernes relatives aux matériaux de construction ont été introduites au Maroc au milieu des années quarante par le biais du CEBTP, via la création du LPEE à Casablanca. Dans ce contexte, deux ingénieurs français sont restés célèbres pour avoir joué un rôle de pionniers dans la formation pratique des ingénieurs et des techniciens marocains, Jean Delarue et Marcel Mariotti. En début de carrière, j'ai eu la chance et l'honneur d'être un des deux premiers ingénieurs marocains recrutés, en 1966, au LPEE et placé sous la responsabilité de Marcel Mariotti, qui en était alors directeur technique. Il en fut le directeur général de 1968 à 1974.

Homme affable et respectueux, Marcel Mariotti possédait des qualités humaines et techniques exceptionnelles qui faisaient de lui un ingénieur de référence sur lequel la profession s'appuyait de tout son poids. Il savait rester proche et disponible dans la résolution des problèmes nombreux et divers auxquels les jeunes ingénieurs étaient confrontés. Comme directeur technique du LPEE, Marcel Mariotti a su encadrer de manière exceptionnelle les équipes d'ingénieurs et de techniciens en leur assurant une formation et un encadrement dans lesquels il mettait toute son énergie afin de transmettre son savoir théorique et pratique.

De par son immense culture scientifique et technique, il constituait une référence incontournable pour les ingénieurs au Maroc (entrepreneurs, bureaux d'étude, bureaux de contrôle, administration) dans les domaines qu'il connaissait particulièrement bien que sont la géotechnique, les routes et aérodromes, et les matériaux. Géologue de formation, il maîtrisait parfaitement l'hydrogéologie, l'hydraulique, mais également la résistance des matériaux et la conception des structures. Homme polyvalent, il maîtrisait l'état de l'art de ces disciplines pour résoudre des problèmes concrets ou pour élaborer de nouvelles théories.

Sa connaissance du terrain marocain dans toute sa diversité était profonde et il avait réalisé un ensemble de rapports spécifiques concernant les problèmes de diverses régions. Ces rapports ont servi de modèles pour les jeunes ingénieurs marocains à la formation desquels il a ainsi servi de référence. Il a développé une connaissance particulière relative aux problèmes de gonflement qui s'est révélée très utile en France pour l'estimation des dommages causés aux bâtiments par les sols gonflants. Ses idées et ses schémas ont été repris dans de nombreux ouvrages consacrés à ce sujet et publiés par diverses organisations à partir des années quatre-vingt. Ces idées prennent également une dimension particulière dans le contexte actuel français de l'occurrence de sécheresses de plus en plus fréquentes.

Nous devons donc beaucoup à Marcel Mariotti qui a consacré toute sa vie à contribuer à la construction du Maroc moderne où il a été sans doute l'ingénieur le plus sollicité de la profession pendant longtemps. Il a aussi joué un rôle primordial dans la formation pratique des ingénieurs et techniciens marocains, dans les domaines routiers, de la géotechnique et des matériaux de construction. Pour toutes ces raisons, feu Hassan II, roi du Maroc, le décora du Wissam

Alaouite, la distinction marocaine la plus prestigieuse. Le Comité marocain de mécanique des sols et des roches (CMMSR) s'associe chaleureusement à l'hommage rendu à ce grand ingénieur.

Ramdane KHALID
Ancien Président et membre du bureau exécutif du Comité marocain de
mécanique des sols et des roches
Professeur de géotechnique
Ecole Mohammadia d'Ingénieurs
Rabat, Maroc

Après un long séjour à Casablanca comme directeur-adjoint, puis comme directeur du LPEE, Marcel Mariotti est rentré à Paris pour occuper une place centrale au sein de la direction scientifique du CEBTP en qualité de délégué technique aux actions extérieures. La longue expérience au LPEE, ses connaissances étendues et ses compétences variées étaient reconnues par tous ceux qui l'ont approché. Ses qualités humaines et son esprit d'équilibre étaient vivement appréciés par ses collègues et son expertise a donc été souvent sollicitée au sein du CEBTP.

Sa position au sein de la direction scientifique lui a permis d'être au fait de grands projets techniques au CEBTP et d'être impliqué directement dans divers dossiers importants comme, par exemple, les opérations de recherche-développement concernant les dallages industriels et les bétons de fibre ainsi que la participation du CEBTP à divers projets nationaux (SABLOCRETE, MATER-LOC, CLOUTERRE, BHP, BACARA).

A la demande des autorités de divers pays d'Afrique et en collaboration avec l'UNESCO, le CEBTP a entrepris une réflexion approfondie sur la construction à faible coût et sur l'utilisation des matériaux locaux. L'effort fourni s'est concrétisé par l'organisation d'une série de séminaires sur le thème de « L'habitat spontané en Afrique », à Dakar en 1977, à Lomé en 1979, à Yaoundé en 1981, à Nairobi en 1983, à Addis-Abeba en 1985 et à Kinshasa en 1987. L'apport de M. Mariotti a été capital dans cette action, puisqu'il a été le rapporteur de toutes les manifestations et accompli plusieurs missions sur l'utilisation des ressources locales pour le compte des Nations unies ou de la direction de la Construction dans le cadre du programme REXCOOP¹.

Enfin, M. Mariotti a joué un rôle majeur dans l'élaboration du *Guide pratique pour la réparation des désordres dus à la sécheresse*² suite à une demande des sociétés d'assurance et de la FNB au CEBTP, suite aux désordres importants subis par les constructions du fait des périodes de sécheresse qui ont sévi en France au début des années 90. Ce guide, destiné à aider à l'établissement de diagnostic et à préconiser des solutions de réparation, a été largement diffusé auprès des architectes, experts, bureaux d'études... qui l'utilisent toujours.

M. Mariotti a pris sa retraite du CEBTP vers 1986 et a créé son propre bureau de consultant « MARIOGENIE ». A travers cette structure, il a pu poursuivre ses interventions jusqu'à 1993.

Élie Absi

¹ « Le développement de l'habitat économique dans le tiers monde », *Annales de l'ITBTP*, n° 453, mars-avril 1987.

² *Guide pratique : détermination des solutions adaptées à la réparation des désordres provoqués par la sécheresse* (3 fascicules), CEBTP.

Introduction

La sécheresse géotechnique

R. COJEAN

Co-rédacteur de la RFG
Pour le numéro spécial
« Sécheresse
géotechnique »

Ecole des Mines de Paris
Centre de Géosciences
UMLV - Bâtiment IFI
5, boulevard Descartes
Champs-sur-Marne
77454 Marne-la-Vallée
Cedex 2
roger.cojean@ensmp.fr

La sensibilité des sols argileux au retrait-gonflement : facteurs de prédisposition, facteurs déclenchants, facteurs environnementaux, facteurs anthropiques

Les processus de retrait-gonflement des sols argileux, générateurs de tassements différentiels et de dommages au bâti, trouvent leur origine dans des facteurs de prédisposition relatifs à la *composition minéralogique* et la *texture* des sols concernés. Ces facteurs résultent de l'histoire géologique des sols argileux - sédimentation, diagenèse, altération - et des sollicitations hydriques, thermiques et mécaniques correspondantes, passées et actuelles. Le déclenchement des processus de retrait-gonflement, de même que leur préparation, leur entretien ou leur réactivation, résultent de facteurs environnementaux : contexte climatique et scénarios climatiques, cadre géologique et géomorphologique, contexte hydrologique et hydrogéologique, type d'occupation du sol par le bâti, type de végétation présente à proximité du bâti. Certains de ces facteurs sont d'origine anthropique, et l'homme doit parfois être reconnu comme un facteur aggravant ces processus de retrait-gonflement. Dans certains cas, il faut admettre qu'il est directement à l'origine des dommages occasionnés au bâti par suite d'un manquement aux règles de l'art de la construction.

La majorité des sols argileux est sensible au phénomène de retrait-gonflement.

Cette sensibilité, à l'échelle de l'échantillon de laboratoire, varie principalement en fonction de plusieurs facteurs :

- la nature et la proportion des *minéraux argileux* présents dans les sols argileux. Ces minéraux, de la famille des phyllosilicates, présentent une surface spécifique, une capacité d'échange de cations et une affinité pour les molécules d'eau dipolaires importante et très variable suivant leur espèce minéralogique ;

- la *texture* des sols argileux et les caractéristiques géométriques du

milieu poreux, contrôlant la plus ou moins grande facilité d'accès des molécules d'eau aux sites d'adsorption représentés principalement par les minéraux argileux et secondairement par des colloïdes ;

- la présence d'autres *minéraux* (quartz, carbonates, etc.) et leur disposition en rapport avec la texture du sol argileux, pouvant contrarier les accès des molécules d'eau aux sites d'adsorption ;

- la *densité initiale* du matériau. Plus la densité initiale du matériau est forte (ou son indice des vides faible), plus la capacité du matériau à développer des pressions de gonflement, s'il est mis en présence d'eau, est *a priori* forte, de même que l'amplitude de gonflement. A l'inverse, plus la densité initiale du matériau est faible (ou son indice des vides fort), plus son aptitude à donner lieu au phénomène de retrait en période de sécheresse est *a priori* élevée ;

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

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

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

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

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

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

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

L'ensemble de ces sujets fait actuellement l'objet de travaux de recherche qui ont contribué à alimenter ce numéro spécial. Il faut citer, parmi les travaux les plus récents ou en cours et dans l'ordre chronologique : le projet RGPU « Retrait-gonflement des sols argileux » arrivé récemment à échéance, le projet en cours « Aléa et risque sécheresse » soutenu par la Fondation MAIF, le projet ANR-RGPU en cours « Argic : analyse du retrait-gonflement et de ses incidences sur les constructions », le projet en cours « Sécheresse géotechnique et bâti. Indicateurs de sécheresse géotechnique et de sinistralité sécheresse pour l'Île-de-France » du GIS R2DS Île-de-France, Réseau de recherche sur le développement soutenable. Signalons aussi les différents travaux des bureaux d'étude, des entreprises, des assureurs et des différentes communautés administratives qui apportent leurs contributions à la connaissance générale des processus de retrait-gonflement des sols argileux, aux méthodes de prévention et aux techniques de réparation des dommages au bâti ou de limitation des effets néfastes de la sécheresse géotechnique.

Une synthèse provisoire réalisée à partir de multiples approches

Ce numéro double de la *Revue française de géotechnique* prend appui sur les communications présentées lors de la journée technique commune CFGI-CFMS, organisée le 18 janvier 2007, avec plus de 150 participants. Il a été enrichi par d'autres contributions sollicitées. Ce numéro spécial permet ainsi de donner une bonne illustration des préoccupations de recherche ou d'étude de différentes institutions académiques ou professionnelles dans le domaine de la sécheresse géotechnique. Les articles proposés rendent compte de la diversité des domaines scientifiques et techniques concernés par le sujet de la sécheresse géotechnique : climatologie et météorologie, géologie et géomorphologie, pédologie et botanique, géotechnique et engineering geology, technologie des constructions. Les différentes disciplines scientifiques ou techniques concernées interviennent dans la caractérisation de l'aptitude des sols au retrait-gonflement, dans l'analyse des processus physiques en cause, dans la définition des techniques constructives adéquates pour contrarier les phénomènes de retrait-gonflement ou en limiter les effets dommageables pour le bâti.

Ainsi, on trouvera les thèmes suivants développés ou illustrés par de nombreux auteurs, dans l'ordre de présentation du sommaire de ce numéro :

Thème 1 : Typologie des sécheresses. Facteurs de préparation et de déclenchement. Indicateurs climatiques. Retours d'expériences sur les caractéristiques des sécheresses passées. Changement climatique global et événements extrêmes. .

Articles de M. Blanchard et al., H. de Solère, J.-M. Grésillon et al.

Thème 2 : Profils hydriques dans les sols argileux. Rôle de la végétation dans les processus de propagation de la sécheresse dans les sols argileux. Rôles du bâti et de son environnement sur les profils hydriques au voisinage du bâti. Mesures *in situ* et surveillance. Modélisation des échanges à l'interface sol/atmosphère et simulation numérique des profils hydriques. Articles de D. Tessier et al., M. Vincent et al., Y.-J. Cui et al.

Thème 3 : Minéralogie et texture des sols argileux et des marnes. Relations eau - argiles. Caractérisation de l'aptitude au retrait-gonflement des sols argileux. Caractérisations thermo-hydro-mécaniques des processus de retrait-gonflement. Approches expérimentales au laboratoire. Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux.

Articles de M. Audiguier et al., S. Laribi et al., M. Chrétien et al., J.-F. Serratrice, M. Mrad et al., H. Souli et al., H. Nowamooz et al.

Thème 4 : Impacts de la sécheresse géotechnique sur les constructions. Pathologie des constructions soumises à la sécheresse géotechnique. Dispositions constructives et reprises en sous-œuvre. Retours d'expérience.

Articles de C. Jacquard, A. Denis et al, D. Cousin et al., A. Monjoie et al.

Thème 5 : Cartographie de l'aléa sécheresse. Plans de Prévention des risques. Politiques de gestion du risque de sécheresse géotechnique en France.

Articles de M. Vincent et al., H.F. Kaveh et al., M. Toulemont et al.

Thème 6 : Rôle du secteur assurantiel dans l'indemnisation des dommages. Retours d'expérience des experts d'assurance.

Articles de C. Roume, R. Nussbaum.

Remerciements aux auteurs qui ont construit ce numéro spécial « Sécheresse géotechnique ».

Remerciements aux relecteurs qui ont réalisé les évaluations des manuscrits : Ibrahim Alimi-Ichola, Roger Cojean, Yves Coquet, Yu Jun Cui, Pierre Delage, Michel Deveughèle, Myriam Duc, Jean-Louis Durville, Etienne Flavigny, Jean-Marie Fleureau, Stéphane Fortier, Jean-Michel Grésillon, Alain Guilloux, Florence Habets, Jean-Vivien Heck, Pierre Hubert, Catherine Jacquard, Emmanuel Ledoux, Jean-Pierre Magnan, Philippe Mestat, Jean-Marc Moisselin, Roland Nussbaum, Anne Pantet, Frédéric Pellet, Dominique Proust, Michel Segard, Patrick Simon, Eric Tadbir, Jean-Paul Tisot.

Typologie des sécheresses sur la France et outils de suivi de la ressource en eau utilisés à Météo-France

**M. BLANCHARD,
L. FRANCHISTÉGUY**

Météo-France,
Direction de la Climatologie
42, ave G. Coriolis
31057 Toulouse Cedex
michele.blanchard@meteo.fr

F. HABETS

CNRS/UMR-Sisyphe 7619
Paris

É MARTIN, J. NOILHAN

CNRM-GAME
(Météo-France, CNRS)
Toulouse

Résumé

La France a subi des sécheresses en 2003, 2005 et 2006, dont les conséquences notamment sur les bâtiments ont mis en lumière l'importance de ce risque naturel.

En raison de ses missions, Météo-France suit l'ensemble des phénomènes météorologiques, dont les sécheresses, via la quantification des déficits pluviométriques observés par un important réseau de mesure de précipitations et des systèmes d'analyse atmosphérique. Dans cet article, on présente les différents types de sécheresse et la comparaison des sécheresses récentes par rapport aux sécheresses connues dans le passé. De plus, Météo-France utilise des modèles de suivi du bilan en eau comme le modèle Safran Isba Modcou (SIM) pour mieux appréhender les conséquences des déficits pluviométriques et de la demande évaporative sur l'extension et l'intensité de la sécheresse. SIM permet de calculer des bilans d'eau spatialisés et en particulier un indice d'humidité du sol et un stock de neige sur les montagnes. Ces données sont utilisées dans le suivi hydrologique en France. Les caractéristiques et quelques résultats en terme de contenu en eau du sol de deux de ces modèles sont présentés.

Mots-clés : sécheresse, ressources en eau, hydrométéorologie, changement climatique.

Typology of droughts over France and tools for estimation of water resources used at Météo-France

Abstract

France has recently underwent several drought in 2003, 2005 and 2006, with important damage on the building. Météo-France, the french weather service, monitor the evolution of the dryness, via the quantification of the pluviometric deficits based on an important observation network of precipitations and some atmospheric analysis. In this article, the various types of dryness and the comparison of the recent drynesses compared to the older ones are presented. Météo-France also monitors the water budget by using models as the Safran Isba Modcou (SIM) model. Such model allows to estimate the consequences of the pluviometric deficits and the evaporative demand on the soil water content, and thus, on the extension and the intensity of the dryness. The characteristics and some results in term of soil moisture from two of these models are presented. SIM allows calculating assessments of water and in particular indication of humidity of the ground and stock of snow on mountains. These data are used in the hydrological follow-up in France.

Key words: drought, water resources, hydrometeorology, climate change.

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 30 avril 2008.

Introduction

La sécheresse géotechnique est la conséquence visible sur le bâti de mouvements de terrain liés au changement de volume du sol (principalement argileux) subissant un assèchement inhabituel. Cette notion de sécheresse géotechnique est donc proche de la notion de sécheresse, mais, restreinte plus particulièrement à certains types de sol (argileux et pentus par exemple). Dans cet article, on s'intéressera à la notion de sécheresse, dans le sens générique du terme, qui peut être défini de la manière suivante : la sécheresse correspond au maintien sur des périodes de longueur variable (de la semaine à plusieurs années) de conditions hydriques déficitaires par rapport à un seuil critique (état normal, maximal ou nécessaire au bon développement de la végétation).

La sécheresse se caractérise donc par un déficit de précipitation, dont l'effet peut être accentué par une forte demande évaporative de l'atmosphère. Météo-France est particulièrement engagé dans les actions de suivi de sécheresse. Il a en effet pour mission le suivi des cumuls de précipitations, à partir d'un réseau d'observation (pluviomètres et radars) assez étendu, d'analyse et aussi de prévision. De plus, Météo-France, via les modèles de prévision du temps et de climat, a acquis une expertise sur la modélisation du bilan hydrique en surface. Cette expertise est utilisée depuis plusieurs années pour le suivi opérationnel du bilan hydrique, qui est géré en temps réel, et permet notamment de répondre à des besoins sur l'estimation de la ressource en eau, pour l'agriculture, et pour la prévision des feux de forêts.

Dans cet article, on présente tout d'abord les causes météorologiques conduisant à une sécheresse, les différents types de sécheresse ainsi que celles ayant le plus marqué par leur amplitude ou leur intensité. Ensuite, on présente les outils utilisés pour réaliser le suivi de la ressource en eau en temps réel, et quelques résultats obtenus dans la dernière décennie. Enfin, on aborde l'impact attendu du changement climatique sur les sécheresses, dans le monde et en France.

Causes et localisation

Les sécheresses permanentes concernent les zones arides soumises à des manques de précipitation chroniques. Ces zones sont en général des régions continentales éloignées des océans (on ne traitera pas de ce type de sécheresse par la suite). Les sécheresses de durée limitée se chiffrant en semaines ou en mois peuvent être observées pratiquement partout ailleurs et notamment en France métropolitaine.

Les sécheresses de durée limitée sont en général liées à des anomalies de circulation atmosphérique de grande échelle favorisant les hautes pressions tant au sol qu'en altitude. De ce fait, il s'agit toujours de phénomènes s'étendant sur plusieurs centaines de km² (Fig. 1). Par ailleurs, des phénomènes de grande échelle comme celui d'El Niño qui modifie la circulation de l'océan Pacifique interfère par exemple sur la circulation atmosphérique et provoque des conditions arides en Indonésie, en Inde ou en Australie.

En France, les causes de sécheresse sont souvent liées à la persistance d'un anticyclone qui rejette les perturbations vers le nord.

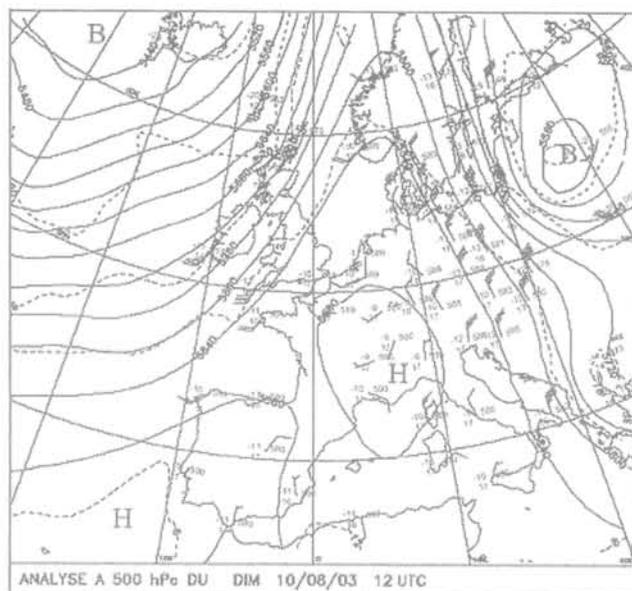


FIG. 1 Situation météorologique type provoquant des épisodes de sécheresse marqués.
Typical meteorological situation provoking marked episodes of drought.

Types de sécheresse

On distingue les sécheresses, selon les effets résultants :

- la sécheresse de l'atmosphère correspondant à un déficit d'humidité de l'air, résultant de l'absence de précipitations, d'une évaporation (ou évapotranspiration) limitée, du fait de contenus en eau du sol et/ou de la végétation réduits ou insuffisamment mobilisables; elle est le premier maillon d'un ensemble de processus qui affectent les milieux naturels et les activités humaines ;
- la sécheresse du sol superficiel ou profond (nappes phréatiques), liée à des précipitations déficitaires, à une évaporation importante ou à un ruissellement de surface important. C'est ce type de sécheresse qui affectera les constructions ;
- la sécheresse de la végétation, liée à un déficit d'hydratation des tissus végétaux, résultant d'une alimentation en eau insuffisante de la plante.

L'effet de la sécheresse dépend de sa durée et de son intensité, de la période où elle intervient, mais aussi des réserves en eau du sol et du stade de développement des végétaux :

- la sécheresse hivernale affectera en priorité le remplissage des nappes phréatiques ;
- la sécheresse printanière ou estivale aura un fort impact sur la végétation et les milieux vivants aquatiques ;
- les sécheresses pluriannuelles cumuleront ces effets et auront ainsi un fort impact tant écologique qu'économique.

Les sécheresses historiques

A l'étranger, les événements extrêmes les plus souvent cités font état de 3 à 10 millions de morts en Inde (1769-1770), 9,5 millions de morts en 1877-1879 en Chine, 100 000 morts dans l'état du Ceara au Brésil l'été suivant, 5 millions de morts en Russie (1921-1922), 3 millions de morts au Bengale en 1942-1943 et plus près de nous de 400 000 victimes au Sahel dans les années 1970-1980.

Parmi les grandes sécheresses que la France a connues au XX^e siècle, celle de 1976 est particulièrement exceptionnelle par sa durée (décembre 1975-août 1976) et par son intensité (l'été 1976 a été l'un des plus secs du siècle). Elle a surtout touché la moitié nord-ouest du pays. De décembre 1975 à août 1976, les précipitations mensuelles ont été majoritairement déficitaires sur la plupart des régions. Pour certains mois tels que février et juillet, les écarts à la normale n'étaient pas très importants ; par contre, décembre 1975, puis janvier, mai et surtout juin 1976 ont présenté des précipitations particulièrement faibles. La sécheresse intense s'est poursuivie au mois d'août dans la moitié nord du pays, alors que la moitié sud était touchée par des pluies fortement excédentaires. Le tableau I fournit des valeurs du rapport à la normale des pluies du 1/12/1975 au 31/7/1976 pour quelques stations représentatives.

Pour cette période, Brochet (1976) a estimé en étudiant des séries centenaires sur 25 sites et en calculant les quantiles de durée de retour moyen, qu'un rapport pluviométrique $< 0,4$ avait une durée de retour supérieure à 100 ans, $< 0,5$ une durée de retour supérieure à 50 ans, $< 0,6$ une durée de retour supérieure à 20 ans. Bien sûr, la diversité des régimes pluviométriques ne permet pas d'appliquer ces résultats sur une région particulièrement.

La sécheresse de 1989 (qui a démarré dès août 1988 pour s'achever en novembre 1989) a surtout frappé le sud et le sud-est, avec une amplitude comparable à celle de 1976. L'hiver 1988/1989 a été remarquable par son manque de neige en montagne.

A la canicule de l'été 2003 a été associée une sécheresse estivale sévère qui a affecté tout particulièrement

les bâtis. Les températures élevées, tant diurnes que nocturnes, ont nettement aggravé les effets du déficit pluviométrique.

Plus récemment, la sécheresse a affecté le centre et la façade ouest du pays durant les années 2005 et 2006 mettant à mal le remplissage de grandes nappes phréatiques comme celle de la Beauce.

Le tableau II indique quelques sécheresses en France au siècle dernier.

Suivi de la sécheresse à Météo-France

L'apport en eau par les précipitations et l'état hydrique du sol constituant des facteurs communs pour les différents types de sécheresse, les météorologistes caractérisent la sécheresse en utilisant ces deux facteurs, en particulier pour déterminer la nature exceptionnelle de certaines périodes.

Afin d'assurer un suivi de la ressource en eau sur la France, la direction de l'Eau (DE) du ministère de l'Écologie, de l'Aménagement et du Développement durable réalise mensuellement un bulletin de situation hydrologique national. Météo-France contribue à ce bulletin en alimentant les rubriques « eau dans le sol » et « manteau neigeux » avec des sorties du modèle hydrométéorologique SIM (Safran-Isba-Modcou) et par la fourniture de données permettant une cartographie des précipitations et des précipitations efficaces ainsi que leur rapport à la normale. La DE a, par ailleurs, confié à l'établissement l'élaboration de la partie météorologique des bulletins de situation hydrologique régionaux avec la fourniture de cartes et de données pour les paramètres précipitations, pluies efficaces et évapotranspiration potentielle. Durant la période d'étiage, Météo-France réalise un bulletin décadaire de suivi de la sécheresse et contribue aux comités sécheresse locaux et nationaux. Une expertise est aussi assurée sur les dossiers de catastrophes naturelles inondations et sécheresse soumis à la commission Catastrophes naturelles qui est présidée par la direction de la Défense et de la Sécurité civiles.

TABEAU I Valeurs du rapport à la normale des pluies du 1/12/1975 au 31/7/1976 pour quelques stations représentatives.
Values of the report in the normal of the rains of 1/12/1975 in 31/7/1976 for some representative stations.

Abbeville	0,40	Bourges	0,59
Lille	0,47	Nevers	0,44
Cherbourg	0,36	Limoges	0,69
Beauvais	0,37	Clermont-Ferrand	0,62
Reims	0,43	Lyon	0,64
Chartres	0,39	Grenoble	0,53
Paris Orly	0,45	Bourg-St-Maurice	0,43
Langres	0,39	Agen	0,56
Metz	0,58	Bordeaux	0,69
Strasbourg	0,62	Toulouse	0,57
Le Mans	0,44	Nîmes	1,05
Lorient	0,38	Marseille	1,35
Brest	0,44	Nice	0,86
Rennes	0,46	Ajaccio	0,84

TABLEAU II Quelques sécheresses en France au siècle dernier.
Some droughts in France in the last century.

Date	Extension géographique
1995-1998	Nord-Pas-de-Calais, Picardie, Haute-Normandie
1997	Sud-Est
1996	Lorraine
Été 1995	Centre-Est
Novembre 1990 à juin 1991	Sécheresse record dans le Puy-de-Dôme
Hiver 1989-été 1990	Centre-Est
1986	Vendée
1985 et 1983	Centre-Est
1978	Sud
1972	Alsace
1954	Hiver en Lorraine et Franche-Comté
1940	Été en région parisienne
1933	Été dans les Bouches-du-Rhône
1924-1925	Hiver en Roussillon

6

Outils de suivi de la sécheresse à Météo-France

Météo-France utilise depuis plus de dix ans des outils de modélisation permettant de suivre l'impact des conditions climatiques sur le contenu en eau du sol, et donc, ainsi, suivre et quantifier l'état de sécheresse. Un premier modèle, d'origine agronomique, a tout d'abord été utilisé. Ce modèle est utilisé sur un certain nombre de points représentatifs, et ne prend en compte que l'impact sol-végétation-atmosphère. Depuis environ cinq ans, un deuxième modèle a été implémenté. Ce modèle permet de couvrir l'ensemble de la France et permet de simuler, en plus des relations sol-végétation-atmosphère, le débit des rivières et le niveau de certaines nappes phréatiques. De plus, la

couverture neigeuse, qui peut avoir localement un rôle important sur le bilan hydrique, est prise en compte explicitement. Ces deux modèles sont présentés ci-dessous.

6.1

Modèle de bilan hydrique à deux réservoirs

Le modèle simplifié (Jacquart et Choissel, 1995) est couramment utilisé à Météo-France pour des besoins agrométéorologiques avec des réserves utiles variant de 50 à 200 mm selon le type de couvert végétal et/ou la profondeur des sols. On considère qu'en pratique, trois valeurs de réserve utile convenablement choisies permettent de couvrir l'éventail des réserves utiles rencontrées pour les types de sol d'un département.

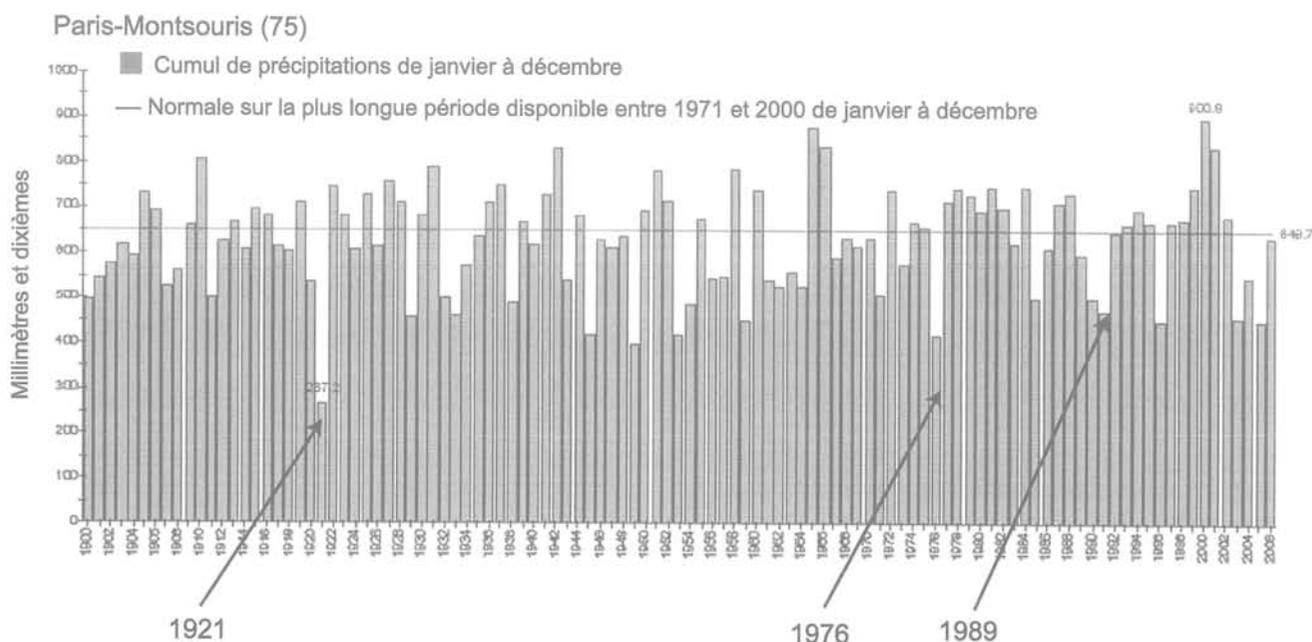


FIG. 2 Cumul annuel de pluie sur le poste Paris-Montsouris sur la période 1900-2006.
Annual rainy accumulation on the Paris-Montsouris station over the period 1900-2006.

Le principe du modèle est de considérer que c'est par l'intermédiaire du système racinaire du couvert végétal considéré que l'eau est extraite du sol (mécanisme d'évapotranspiration). Le réservoir de surface est évaporé au taux potentiel pondéré par le coefficient cultural. Le réservoir profond n'est évaporé qu'une fois le réservoir de surface vide, à un taux diminuant avec son contenu (réponse linéaire par rapport à l'état du réservoir) (Fig. 3).

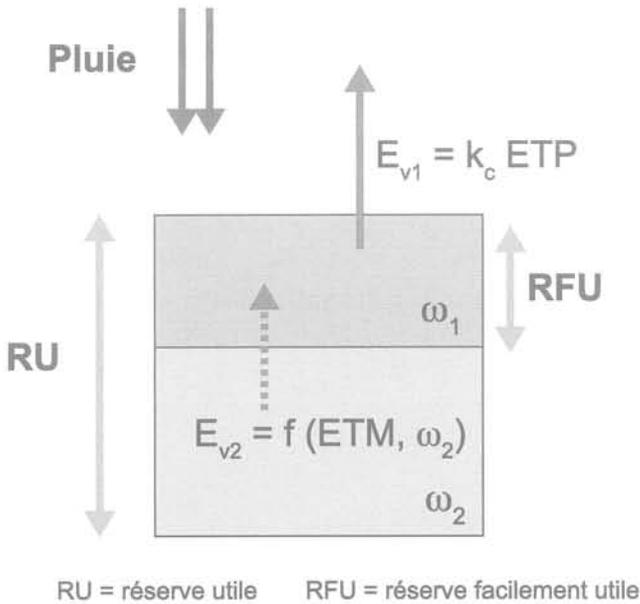


FIG. 3 Principe du modèle de bilan hydrique à deux réservoirs.
Principle of the model of assessment hydrique of 2 reservoirs.

L'écoulement (qu'il soit ruissellement de surface ou écoulement profond) n'est pas distingué et se produit lorsque la réserve calculée dépasse la réserve utile.

On considère que l'eau profonde située au-delà de la limite des racines les plus profondes n'est pas disponible en surface (les remontées capillaires étant faibles). Ceci a par exemple été confirmé par les mesures d'humidité des sols lors de l'expérience Murex près de Toulouse, sol argileux couvert par une jachère vieille de plusieurs années. On a bien constaté que l'humidité du sol au-delà de 120 cm restait pratiquement constante au cours de l'année. Le gazon est la couverture de surface de ce modèle. Cette méthode ne rend pas compte des caractéristiques pédologiques du sol, si ce n'est par le biais simplifié de la réserve utile. La neige, le gel dans le sol ainsi que les bilans énergétiques et thermiques du sol ne sont pas intégrés. En revanche, ce modèle robuste et à l'approche agronomique a l'avantage de se focaliser sur une gamme de réserve utile commune à l'ensemble des sites simulés.

Dans ce modèle, le calcul du bilan hydrique s'effectue sur les postes du réseau de Météo-France et est conditionné par la disponibilité des paramètres nécessaires à ce calcul (environ 140 postes à ce jour). Pour chaque poste, le calcul est effectué avec des réserves utiles de 50, 100, 150 et 200 mm. La profondeur du réservoir superficiel est fixée à 40 % de la réserve utile. Ce modèle effectue un bilan à l'aide des précipitations et des évapotranspirations (ETP) quotidiennes puis simule les échanges entre le réservoir superficiel et le réservoir profond avec un 'frein' appliqué à la récupération de l'eau stockée dans le réservoir profond.

La figure 4 présente les résultats obtenus par ce modèle en terme d'évolution du réservoir d'eau disponible sur la période 1995-2004 et en moyenne sur l'ensemble des postes disponibles en France.

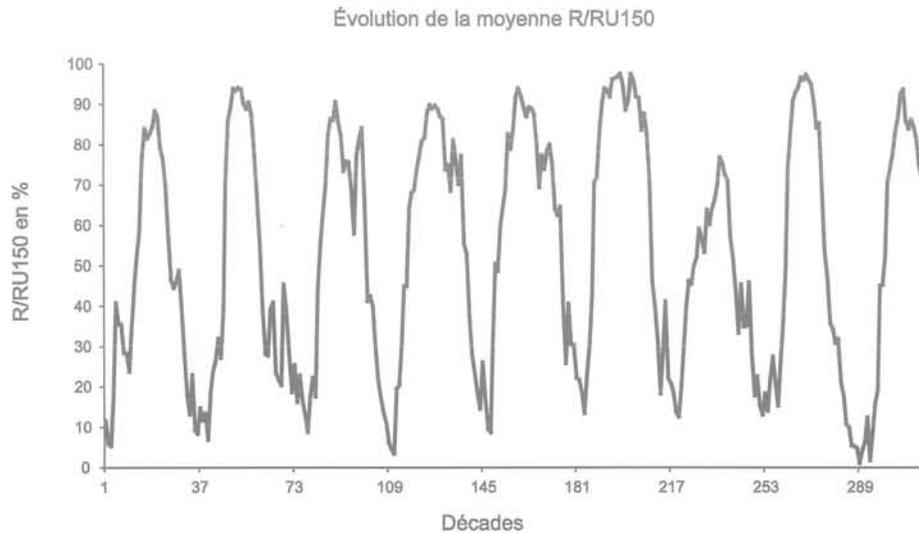


FIG. 4 Moyenne du rapport entre le contenu en eau du réservoir et la réserve utile (R/RU) pour une réserve utile de 150 mm. Les résultats sont moyennés sur l'ensemble des postes disponibles sur la France, sur la période 1995-2004.

Modèle hydrométéorologique Safran-Isba-Modcou (SIM)

6.2.1

Principe

SIM (Habets *et al.*, 1999a ; Habets *et al.*, 2007) est un modèle hydrométéorologique constitué de l'assemblage de 3 modèles, qui permet d'estimer les bilans d'eau et d'énergie en surface, sur l'ensemble de la France, à une résolution spatiale de 8 km, ainsi que le niveau de plusieurs nappes souterraines et les débits des rivières à plus de 900 postes. Ce système initialement développé sur les bassins de l'Adour, du Rhône, de la Garonne et de la Seine a été étendu sur la France en 2002 puis mis en opérationnel en 2003.

Ce modèle repose sur l'enchaînement de trois éléments : Safran, Isba et Modcou.

Les variables atmosphériques (précipitations, température, rayonnements solaire et infrarouge, vent et humidité de l'air) sont analysées par le système SAFRAN (Durand *et al.*, 1992), qui prend en compte l'ensemble des observations disponibles, des analyses de modèle opérationnel, et des données climatiques, pour produire des cartes de 8 variables atmosphériques au pas de temps horaire, et à une résolution de 8 km.

Le module ISBA (Interactions-Sol-Biosphère-Atmosphère, schéma de surface utilisé ici dans sa version hydrologique à 3 couches, (Noilhan et Planton, 1989 ; Noilhan et Mahfouf, 1996 ; Boone *et al.*, 1999) calcule les bilans d'eau et d'énergie sur l'ensemble sol-végétation, en prenant en compte la composante nivale (très importante sur les massifs montagneux), au pas de temps de 5 minutes. Ce schéma est en outre utilisé dans les modèles opérationnels de prévisions atmosphériques de Météo-France. ISBA prend en compte de manière explicite les paramètres de texture de sol

(base des sols de l'INRA à 1km) et le type de végétation (base ECOCLIMAP, Masson *et al.*, 2003, modifiée sur la France pour distinguer les types de cultures ayant différents cycles annuels, voir figure 5).

Enfin, le module MODCOU (Ledoux *et al.*, 1989), développé par l'École des mines de Paris, simule le niveau des nappes, leur interaction avec les rivières, et les débits quotidiens sur plus de 900 postes en France.

6.2.2

Suivi du bilan hydrique estimé par SIM

Les simulations de SIM sont réalisées en double : une première analyse est réalisée en temps « quasi » réel (traitement quotidien de la période J-1, 6h à J, 6h), et utilise les observations disponibles sans délai. Ainsi, l'analyse quotidienne 'temps réel' de précipitations utilise approximativement 1 200 à 1 300 postes de mesures pluviométriques par jour sur le territoire. Une deuxième analyse est réalisée en temps différé (J+45, donc avec plus d'un mois de délai), afin de collecter l'ensemble des données du réseau climatologique d'état. Dans cette analyse, on dispose alors de plus de 3 000 postes pluviométriques.

Cela permet de constituer une base de données des paramètres météorologiques interpolés par Safran (une critique détaillée de ces analyses a été réalisée par Quintana Seguí *et al.*, 2007) mais aussi des termes du bilan hydrique, constituant ainsi une référence pour une analyse plus pertinente des situations du temps présent. Actuellement, l'archive historique du modèle déterminée en utilisant le réseau climatologique complet couvre la période début août 1970 à 2007.

Ainsi, les cumuls de précipitations totales (liquide et neigeuse) analysés par Safran permettent de situer une année donnée par rapport à la climatologie existante. La figure 6 présente la comparaison des cumuls annuels de précipitations pour la normale 1971-2000, et pour les cinq années sèches suivantes : 1976, 1989, 1990, 2003 et 2004. Il apparaît clairement que les

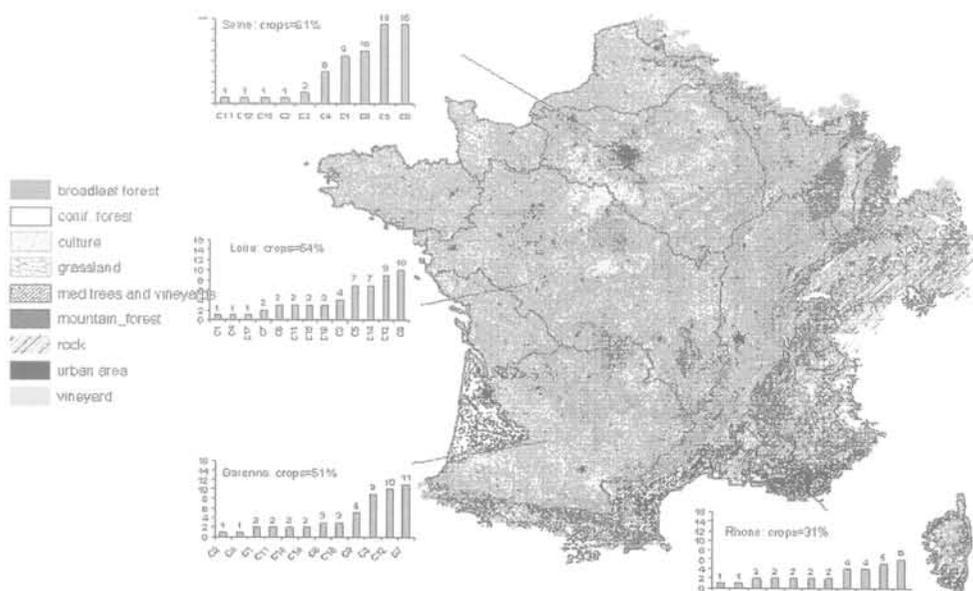


FIG. 5 Carte d'occupation des sols Ecoclimap sur la France. Soil type map Ecoclimap on France.

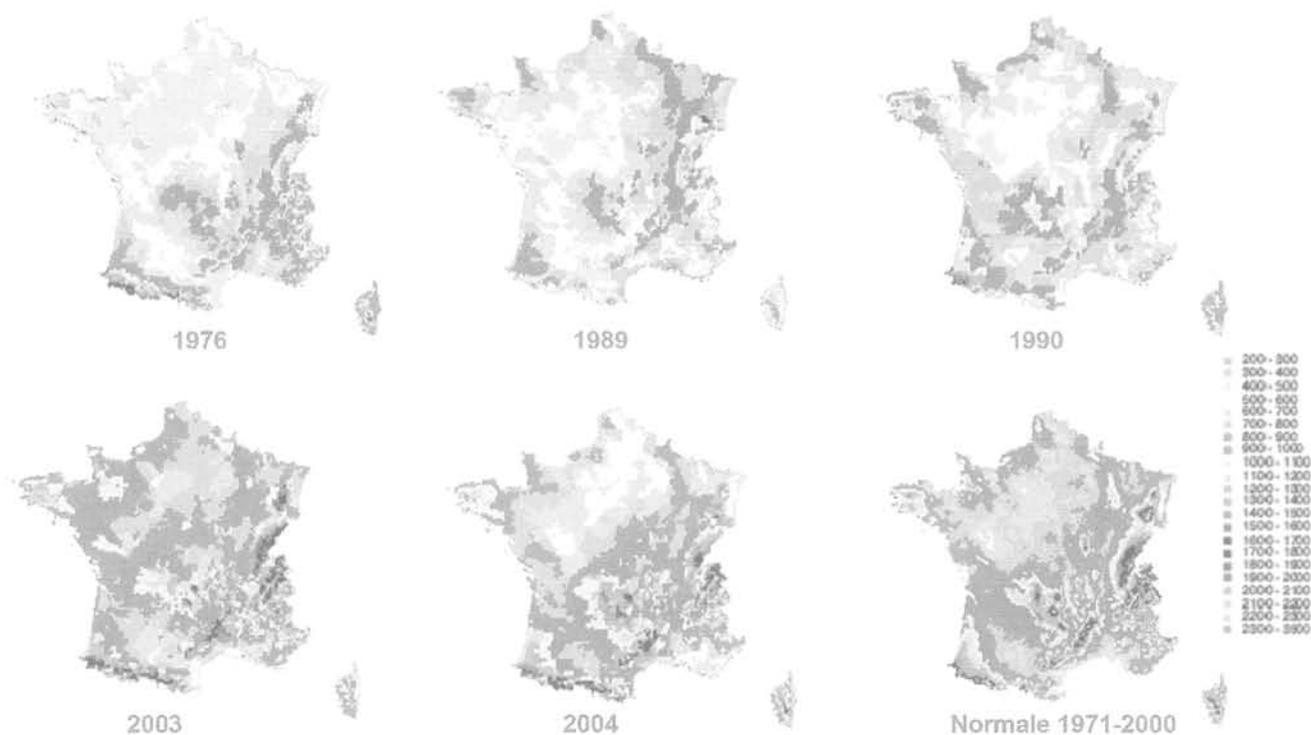


FIG. 6 Cumul annuel de précipitations Safran sur la France d'août à juillet et comparaison à la normale Aurelhy sur la période 1971-2000.

déficits de précipitations des années sèches varient beaucoup à la fois en intensité et dans l'espace.

Les termes du bilan hydriques simulés par SIM peuvent être partiellement validés, grâce à la comparaison entre les simulations et les observations de débits, de niveaux piézométriques et de hauteurs de neige. Ainsi, une analyse des résultats de SIM sur la décennie 1995-2005 a montré que l'évaporation annuelle était bien estimée, avec une erreur moyenne sur l'historique disponible de l'ordre de 4 % du flux d'évaporation annuel (Habets *et al.*, 2007). Cette erreur varie d'une année sur l'autre avec un maximum de l'erreur de 8 % pour l'année 2000-2001 sur le bassin du Rhône. Cela permet d'avoir une bonne confiance dans le bilan hydrique simulé par SIM.

Ainsi, on peut s'intéresser aux évolutions temporelle et spatiale du contenu en eau du sol.

Pour étudier les variabilités spatiales du contenu en eau du sol, on utilise l'indice d'humidité des sols SWI (Soil Wetness Index) défini par :

$$SWI = (W - W_{wilt}) / (W_{fc} - W_{wilt})$$

avec :

W = contenu intégré en eau du sol ;

W_{wilt} = contenu en eau du sol au point de flétrissement, seuil à partir duquel la plante ne peut plus capter l'eau du sol, trop rare ;

W_{fc} = contenu en eau du sol à la capacité au champ, seuil au-dessus duquel il n'y a plus de drainage gravitationnel dans le sol.

Lorsqu'il est au-dessus de 1, le sol est humide, et les plantes ne sont pas stressées. En dessous de 1, il

y a stress hydrique, d'autant plus sévère que l'indice se rapproche de 0. L'évolution moyenne sur la France de l'indice d'humidité des sols simulée par SIM sur la période 1995-2005 est présentée figure 7. On constate que l'évolution temporelle de l'indice d'humidité des sols issu de SIM sur la France se compare bien à la moyenne décennale du pourcentage de remplissage du réservoir (R/RU à 150 mm) simulé par le modèle à deux réservoirs présenté figure 4. En particulier, on observe que les valeurs minimales sur cette période sont atteintes durant l'année 2003, suivie de l'année 1998.

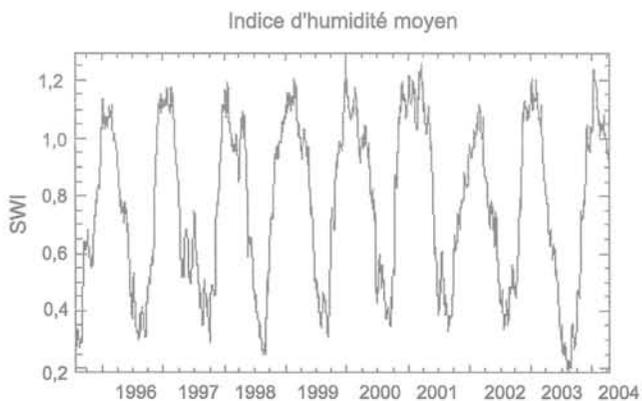


FIG. 7 Indice d'humidité moyen sur la France, fourni par le modèle SIM sur la période 1995-2004.

L'indice d'humidité des sols est estimé quotidiennement ainsi que l'écart par rapport à la climatologie du modèle SIM disponible sur la période 1995-2006.

Une telle estimation pour le début du mois de juin 2006 est présentée figure 8. La carte des écarts à la moyenne est très contrastée, avec une large zone bien excédentaire sur le Nord et l'Est du pays, et de nombreuses petites zones légèrement excédentaires. Le reste du pays est déficitaire. On note deux grandes régions présentant des déficits importants : une large bande allant de la Vienne à la Marne et surtout une grande partie du sud-ouest et de la bordure méditerranéenne, ainsi que la Corse. Ces résultats actualisés sont publiés régulièrement sur le site Internet de Météo-France ainsi que dans le bulletin national de situation hydrologique du ministère de l'Écologie de l'Aménagement et du Développement durable.

Afin de suivre l'état du bilan hydrique sur l'ensemble de la France, on utilise des courbes présentées figure 9. Elles représentent l'évolution temporelle de l'indice d'humidité des sols en moyenne sur l'ensemble de la France sur l'année étudiée (trait épais noir), comparée à la moyenne sur la climatologie 1970-2005 (trait fin noir), ainsi qu'aux valeurs extrêmes (en vert) et aux quintiles 20 %. Lorsque la courbe rouge atteint la courbe verte inférieure, cela signifie qu'à ce moment là, l'année étudiée est la plus sèche sur les 35 années étudiées. Quand elle atteint la courbe pointillée, cela signifie que le niveau de sécheresse a été atteint 1 année sur 5 en moyenne. Ainsi, on constate que la sécheresse de 2003 a conduit en juillet et en août aux valeurs d'indice d'humidité des sols les plus faibles en moyenne sur la France par rapport à la climatologie sur 35 ans et que des valeurs assez proches avaient déjà été atteintes en 1989 et 1990.

Le suivi du bilan hydrique est complété par le suivi du manteau neigeux. En effet, la fonte du manteau neigeux au printemps apporte un afflux d'eau, qui s'il est important, pourra atténuer l'effet d'une sécheresse, et même dans certains cas contribuer à des inondations.

On peut avoir une bonne confiance dans la représentativité du manteau neigeux simulé par SIM, car les hauteurs de neige simulées ont été comparées aux nombreuses observations disponibles à différentes

altitudes (Etchevers *et al.*, 2001 ; Voirin-Morel, 2003 ; Habets *et al.*, 2007). Les biais sont faibles (inférieurs à 3 cm pour les bandes altitudes inférieures à 2000m, et de l'ordre de 10 cm au-delà), et les variabilités journalières sont bien représentées (le coefficient de corrélation au carré est de l'ordre de 0,7 pour les tranches d'altitudes supérieures à 750 m).

SIM estime la quantité d'eau stockée sous forme de neige (c'est l'équivalent en eau de la neige). La figure 10 présente la comparaison de ce stock au 1^{er} avril 2006, et en moyenne sur la décennie 1995-2005 pour la même date dans les Alpes. Le stock d'eau est globalement équivalent à la moyenne des simulations pour cette date sur la période 1995-2005. La quantité d'eau stockée dans le manteau neigeux au 1^{er} avril 2006 n'est légèrement supérieure à la moyenne que sur les Alpes suisses.

7 Conclusion et perspectives : changement climatique et sécheresse géotechnique

Le suivi des sécheresses et des ressources en eau effectué par Météo-France se base de plus en plus sur la chaîne Safran-Isba-Modcou, opérationnelle depuis quelques années. Cet outil fournit une simulation spatialisée de l'humidité des sols basée sur les bilans couplés hydriques et énergétiques en surface. Le suivi de variables hydrologiques est affiné dans le temps et l'espace, ce qui permettra de mieux répondre aux demandes des autorités dans le domaine.

Les efforts actuels portent sur la reconstitution d'une climatologie de Safran-Isba-Modcou sur une longue période (remontant jusqu'en 1970, et si possible jusqu'en 1958). On espère mieux caractériser la variabilité inter annuelle des différents paramètres, et qualifier les périodes de sécheresses futures par comparaison avec les événements marquants du passé, comme 1976, 1989 ou 2003.

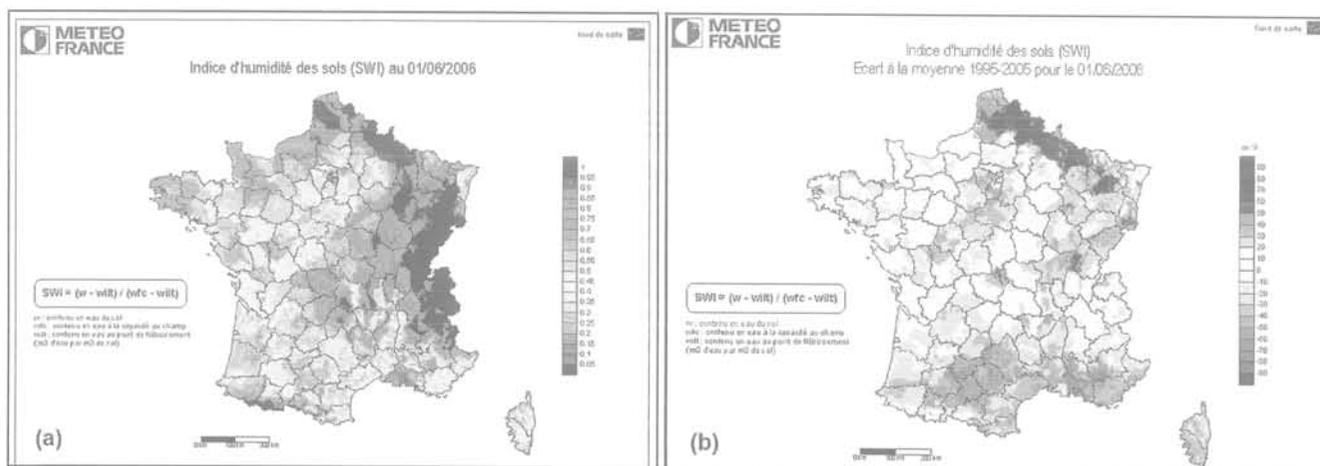


FIG. 8 Contribution de Météo-France à la rubrique ressources en eau du BSH national : (a) indice d'humidité de sol sur la France au 1^{er} juin 2006 ; (b) écart à la référence 1995-2005 de l'indice d'humidité des sols.
Contribution of Météo-France to the column water resources of the national BSH: (a) Soil wetness index over France on June 1st, 2006, (b) Anomaly with 1995-2005 climatology of SIM.

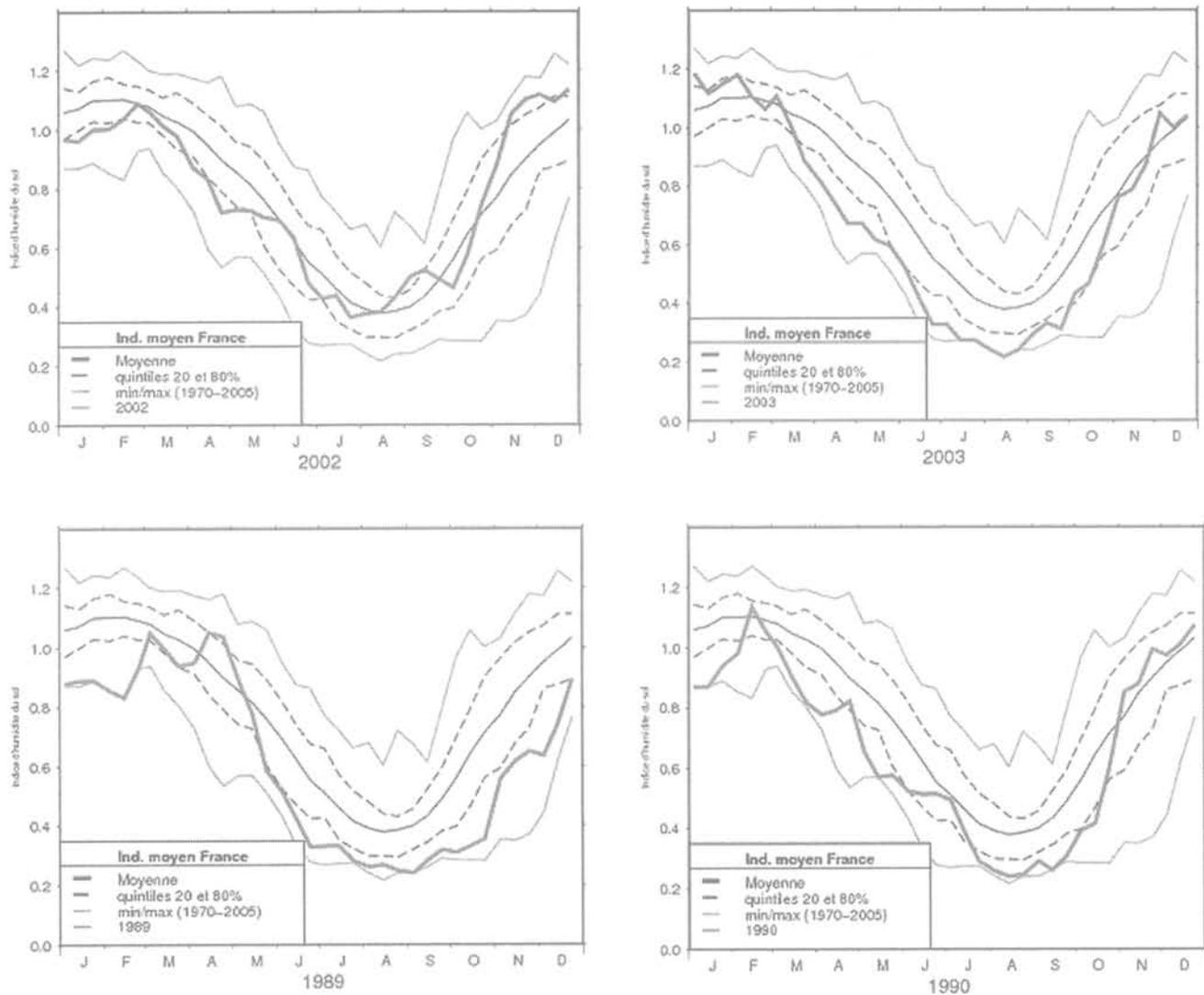


FIG. 9 Suivi opérationnel de l'indice d'humidité des sols en moyenne sur l'ensemble de la France. Operational monitoring of Soil Wetness Index over France and comparison to the climatological statistics of SIM.

Les simulations climatiques prenant en compte les scénarios d'évolution des concentrations en gaz à effet de serre indiquent pour la fin du siècle une augmentation des précipitations hivernales sur le nord de la France, mais aussi une accentuation des périodes de sécheresses en été, particulièrement sur le sud. On assistera probablement en parallèle à une augmentation de la demande en eau, ce qui fait que la question des ressources en eau deviendra cruciale. Des études d'impact du changement climatique sur la ressource en eau de grands bassins versants français ont été menées. Pour les bassins versants montagneux comme le Rhône et la Garonne, l'élévation de la température conduira certainement à une fonte du manteau neigeux plus précoce, ce qui aura pour conséquence de prolonger la période de basses eaux (Etchevers *et al.*, 2002 ; Caballero *et al.*, 2007). Sur le bassin versant de la Seine, la situation estivale dépendra essentiellement de la recharge des nappes dans la période hivernale

(Ducharne *et al.*, 2007). Ces études d'impacts seront poursuivies et développées dans le cadre de programmes de recherches en cours, comme le projet HyMeX (Hydrological cycle in the Mediterranean Experiment), centré sur la zone méditerranéenne.

Dans sa version actuelle, la chaîne Safran-Isba-Modcou utilisée dans la version d'ISBA opérationnelle (deux températures et trois réservoirs pour l'hydrologie dans le sol), n'est pas la version la plus adaptée au problème posé. On espère, à l'avenir utiliser une version plus évoluée (version multicouche), qui devrait être mieux à même de reproduire les phénomènes à prendre en compte (transferts verticaux, gradients de texture, extraction racinaire). Cette nouvelle version devra être construite et validée grâce aux données et modèles détaillés existants, comme ceux du projet ARGIC, et grâce à de nouveaux projets à mettre en place avec les équipes ayant développé un savoir-faire sur ce sujet.

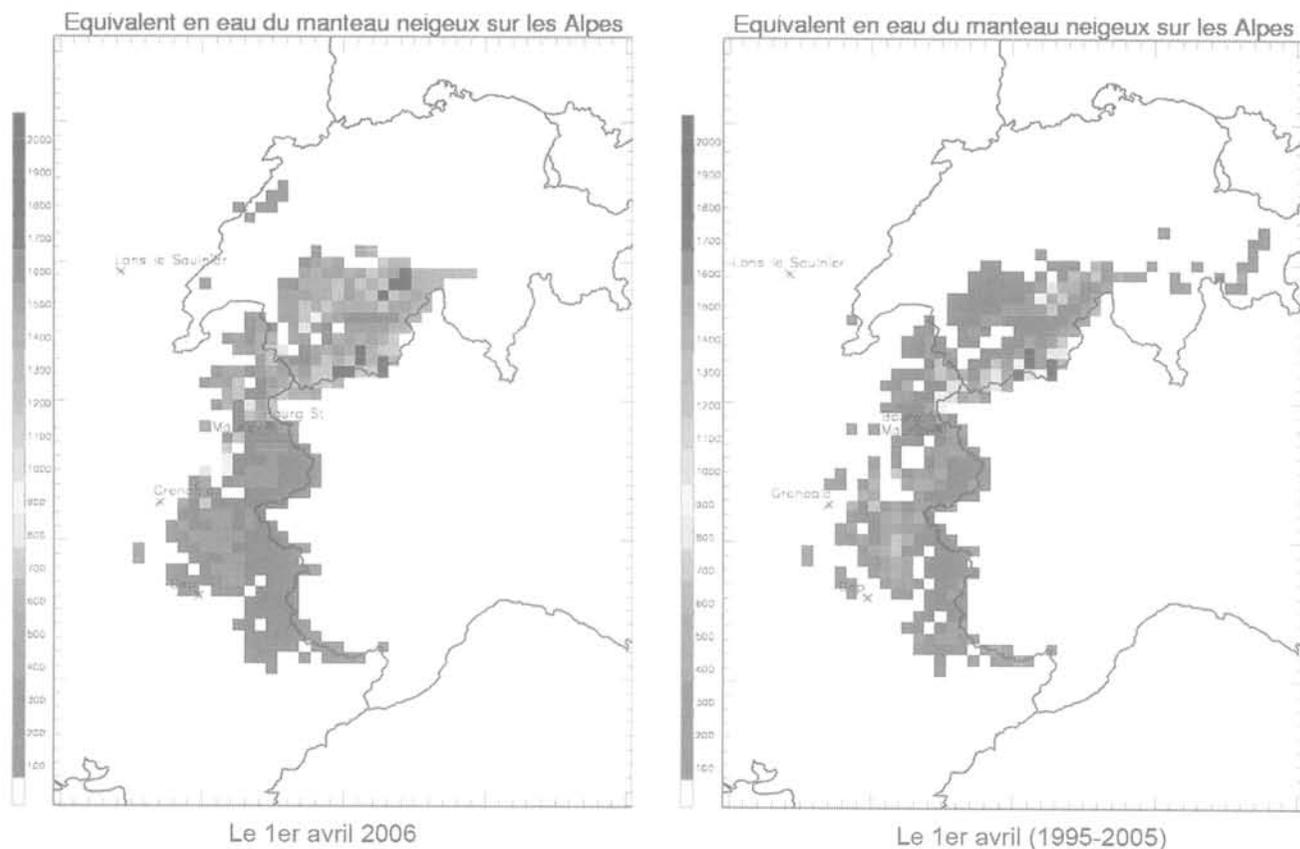


FIG. 10 Contribution de Météo-France à la rubrique manteau neigeux du BSH national : (a) équivalent en eau du manteau neigeux sur les Alpes au 1^{er} avril 2006 (kg/m²/s); (b) moyenne de l'équivalent en eau du manteau neigeux au 1^{er} avril sur la période 1995-2005.

Contribution of Météo-France to the column snow-covered coat of the national BSH: (a) snow water equivalent over the Alps on April 1st, 2006 (kg/m²/s); (b) average of the snow water equivalent over the Alps on April 1st over the period 1995-2005.

Bibliographie

- Boone A., Calvet J.C., Noilhan J. - Inclusion of a third layer in a land surface scheme using the force restore. *J. Appl Meteor*, 38(11), 1999, p. 1611-1630.
- Brochet - Aspects climatiques de la sécheresse 1976. *La Météorologie*, 6^e série, n° 7, décembre 1976.
- Caballero Y., Morel S., Habets F., Noilhan J., Le Moigne P., Lehenaff A., Boone A. - Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne river basin to climate change. *Water Resources Research*, 2007.
- Ducharne A., Baubion C., Beaudoin N., Benoit M., Billen G., Brisson N., Garnier J., Kieken H., Lebonvallet S., Ledoux E., Mary B., Mignolet C., Poux X., Sauboua E., Schott C., Théry S., Viennot P. - Long term prospective of the Seine river system: Confronting climatic and direct anthropogenic changes. *Science of the Total Environment*, vol. 375, Issues 1-3, 2007, p 292-311.
- Durand Y., Brun E., Mérindol L., Guyomarc'h G., Lesaffre B., Martin E. - A meteorological estimation of relevant parameters for snow models. *Annales Geophysicae*, 18, 1992, p. 65-71.
- Etchevers P., C. Golaz, Habets F. - Simulation of the water budget and the river flows of the Rhone basin from 1981 to 1994. *J. Hydrol.* 244, 2001, p. 60-85.
- Etchevers P., Golaz C., Habets F., Noilhan J. - Impact of climate change on the Rhone river catchment hydrology. *Journal of Geophysical Research*, 107, n° D16, 10.1029/2001JD000490, 2002, p. 1-18.
- Habets F., Etchevers P., Golaz C., Lebouis E., Ledoux E., Martin E., Noilhan J., Otle C. - Simulation of the water budget and the river flows of the Rhone basin. *Journal of Geophysical Research*, vol. 104, 1999, p. 31145-31172.
- Habets F., Boone A., Champeaux J.-L., Etchevers, P., Franchistéguy L., Lebouis E., Ledoux E., LeMoigne P., Martin E., Morel S., Noilhan J., Quintana Segui P., Rousset Regimbeau F., Viennot P. - The Safran-Isba-Modcou hydrometeorological model applied over France. Soumis au *Journal of Geophysical Research*, 2007.
- Jacquart C., Choissnel E. - Un modèle de bilan hydrique simplifié à deux réservoirs utilisables en agrométéorologie. *La Météorologie*, 8^e série, n° 9, 1995.
- Ledoux E., Girard G., De Marsily G., Deschenes J. - Spatially distributed modelling: Conceptual approach, coupling surface water and ground-water. *Unsaturated flow hydrologic modeling: theory and practice*, H. J. Morel-Seytoux (ed.), 1989, p 434-454, NATO Sciences Service.
- Masson V., Champeaux J.-L., Chauvin F., Meriguet C., Lacaze R. - A global database of land surface parameters at 1 km resolution in meteorological and climate models. *Journal of Climatology*, 16, 2003, p. 1261-1282.
- Noilhan J., Planton S. - A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Monthly Weather Review*, 117, 1989, p. 536-549.
- Noilhan J., Mahfouf J.F. - The ISBA land surface parameterization scheme. *Global Planetary Change*, 13, 1996, p. 145-159.
- Quintana Segui P., Le Moigne P., Durand Y., Martin E., Habets F., Baillon M., Canellas C., Franchistéguy L., Morel S. - Analysis of near surface atmospheric variables: validation of the Safran analysis over France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2007.
- Voirin-Morel, S. *Modélisation distribuée des flux d'eau et d'énergie et des débits à l'échelle régionale du bassin Adour Garonne*. PhD Thesis, université Toulouse III, Toulouse, France, 2003 (<http://www.cig.enscm.fr/~hydro/THE/the.htm>).

Retour d'expérience de la sécheresse 2003

H. DE SOLÈRE

MEDAD, DPPR
20 avenue de Ségur
75302 Paris 07 SP
Actuellement MEDAD,
CERTU VOI/SECUR
helene.de-solere@
equipement.gouv.fr

Résumé

Une synthèse sur la sécheresse de l'été 2003 est présentée. L'accent est mis sur les questions nouvelles apportées par cet événement qui a conduit à développer de nouvelles approches sur la façon de prendre en compte le risque de sécheresse géotechnique.

Mots-clés : sécheresse, été 2003, retrait gonflement des sols argileux, dommages au bâti. commission Cat-Nat, réglementations.

Lessons drawn from the 2003 drought

Abstract

A synthesis related to the 2003 summer drought is presented. The paper underlines the new questions that have arisen as a consequence of this particular meteorological event and its consequences on the foundations of houses.

Key words: drought, 2003 summer, shrink-swell hazard, building damage, Cat-Nat commission, regulations

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 30 avril 2008.

Introduction et particularité de l'été 2003

L'été 2003 a été caractérisé par des températures estivales exceptionnelles : des températures dépassant 35 °C ont été mesurées dans deux tiers des stations météorologiques dans 180 communes. Des températures dépassant 40 °C ont été mesurées dans 15 % des stations, y compris en Bretagne, ce qui n'était jamais arrivé depuis le début des mesures météorologiques.

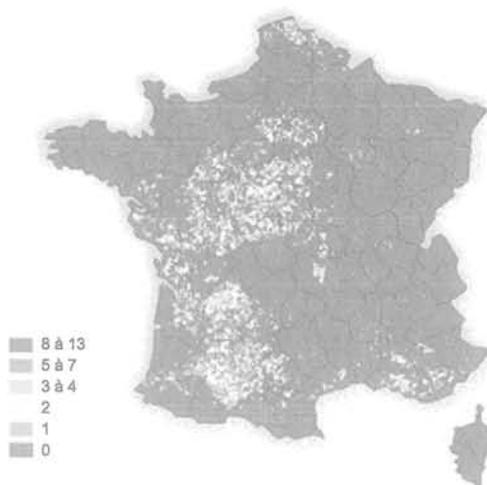
Les désordres sur les constructions sont apparus dès le mois de juillet 2003. Or si l'on considérait les critères utilisés par la Commission de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle, l'année 2003, ne présentait que pour très peu de départements les caractéristiques météorologiques d'une sécheresse. En effet, le critère météo employé par la commission avait, pour une de ses conditions, une « sécheresse hivernale », c'est-à-dire sur une faible pluviosité en période de recharge hydrique des sols et des nappes d'eau souterraine. Or, l'hiver 2002-2003 fut plutôt pluvieux, et la plupart des départements présentaient une bonne recharge hydrique en sortie d'hiver.

Dès l'été 2003, une réflexion interministérielle a été lancée afin d'appréhender le phénomène observé, à savoir l'apparition de nombreux désordres aux constructions.

Il faut rappeler la nature du phénomène à l'origine des désordres au bâti et les éléments à prendre en compte pour caractériser ce que l'on appelle la « sécheresse géotechnique ». Ce phénomène ne concerne que les terrains caractérisés par des sols riches en certains minéraux argileux qui ont des propriétés de variation de volume en fonction de la teneur en eau. Ces variations de volume se traduisent à l'échelle macroscopique par des phénomènes de retrait en période sèche et de gonflement en période humide. En climat tempéré, les argiles sont souvent proches de leur état de saturation, ce qui explique que les mouvements observés sont plus importants en période sèche. La tranche superficielle du sol (1 m à 2 m de profondeur, voire davantage) est soumise à l'évaporation en période sèche, il en résulte un retrait des argiles qui se manifeste par un tassement vertical et l'apparition de fissures verticales. L'amplitude de ce retrait est d'autant plus importante que la couche de matériau argileux est épaisse et qu'elle est riche en minéraux gonflants.

Les désordres liés à ces mouvements de terrain sont pris en compte par le régime de Catastrophe Naturelle depuis 1989 (Figure 1). L'étude des reconnaissances de l'état de catastrophe naturelle pour ce phénomène, nous permet d'établir un état des lieux des zones les plus touchées en France.

Les données communiquées par la Caisse centrale de réassurance (CCR) en octobre 2003, indiquent que la région parisienne est tout particulièrement concernée par le phénomène, puisque les sept départements de la région Ile-de-France (hors Paris) font partie des dix-sept départements pour lesquels les coûts cumulés d'indemnisation pour des sinistres liés au retrait/gonflement des argiles sont les plus élevés. Viennent ensuite la Haute-Garonne, les Bouches-du-Rhône, le Nord, le Puy-de-Dôme, le Loiret et le Gers.



Source : MEDD (www.prim.net, extraction du 06/02/2004)

FIG. 1 Nombre d'arrêtés Cat-Nat sécheresse par commune 1989-2004 (arrêtés relatifs à la sécheresse 2003 non pris en compte)
Numbers of Cat-Nat orders per district 1989-2004 (orders related to the 2003 drought being not taken into account)

Présentation de l'ampleur du phénomène avant la sécheresse de 2003

Les principales sécheresses prises en compte en France par une reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle se sont déroulées au cours des années : 1989-1992, et 1996-1997. Ces sécheresses ont touché 5 000 communes réparties sur 75 départements. Le coût des indemnisations des désordres liés à ces événements s'élève à 3,3 milliards d'euros, ce qui place ce risque en deuxième position derrière les inondations pour les indemnisations. Le coût moyen d'un sinistre est de 10 000 €.

Les désordres observés sont l'apparition de fissures en façade, souvent obliques, et passant par les points de faiblesse que constituent les ouvertures. Les désordres se manifestent également par des décollements entre éléments jointifs (garages, perrons, terrasses), ainsi que par une distorsion des portes et des fenêtres, une dislocation des dallages, et des cloisons et, parfois la rupture de canalisations enterrées (ce qui vient aggraver les désordres car les fuites d'eau qui en résultent provoquent localement des gonflements des sols). Les bâtiments qui sont les plus touchés par ce phénomène sont principalement des maisons individuelles fondées superficiellement, avec une structure en maçonnerie sans chaînage horizontal. Un facteur aggravant supplémentaire, est la présence d'un sous-sol partiel, ainsi que de la végétation à proximité de la construction. La présence de végétation à proximité des fondations joue un rôle très important sur l'ampleur des désordres observés, car elle contribue à assécher en profondeur les terrains argileux et augmente par conséquent l'ampleur du phénomène de variation de volume des terrains.

La manifestation de ce mouvement de sol engendrant des désordres sur les constructions est lié à deux types de facteurs : d'une part des facteurs déclenchants

et d'autre part des facteurs aggravants. Les facteurs déclenchants sont liés directement à la météo, ainsi qu'à la nature des sols. En matière de prévention, mis à part la caractérisation de ces paramètres pour évaluer les zones les plus sensibles, il est difficile de les réduire pour limiter l'aléa. Par contre, un ensemble de facteurs aggravants sont maintenant connus et souvent en cause dans l'apparition des désordres, alors qu'il existe des solutions pour s'en affranchir. Ces facteurs sont constitués par des éléments naturels en rapport avec l'environnement de la construction : végétation, présence d'eaux souterraines, pente, ainsi que par des éléments anthropiques en rapport avec des faiblesses structurelles de la construction ou une inadaptation des fondations au terrain.

Les spécialistes du domaine s'accordent pour dire qu'il est techniquement possible de construire en France des bâtiments résistant au phénomène de « sécheresse géotechnique » en prenant des mesures adaptées concernant à la fois l'environnement immédiat de la construction, et la structure même des bâtiments, et ce pour un surcoût faible à la construction. De plus, il faut considérer que les techniques recommandées pour s'affranchir du risque de dommages liés à ce phénomène assurent une « meilleure » construction : construction plus durable, prescriptions concernant le gros œuvre qui vont dans le même sens que celles concernant le bâti parasismique.

Compte tenu de cette possibilité technique de s'affranchir dans la plupart des cas des désordres, et du coût engendré par ce phénomène lors des dernières périodes de sécheresse connues en France, le ministère de l'écologie tente de mettre en place un dispositif de prévention pour limiter ce risque naturel.

3

Actions de prévention engagées par le ministère de l'Écologie

Trois actions principales de prévention sont engagées, portant sur l'amélioration de la connaissance de l'aléa, l'information et la mise en place de plans de prévention des risques liés au phénomène de retrait gonflement des argiles.

3.1

La connaissance de l'aléa

Cette action, menée par le MEDAD, se décline elle-même en plusieurs sous-actions :

- une sous-action visant à améliorer la connaissance de la manifestation du phénomène pour adapter au mieux les techniques pour réduire le risque et mieux caractériser les phénomènes déclenchants (en particulier les conditions météorologiques permettant de distinguer les sécheresses anormales permettant d'améliorer le critère employé par la Commission interministérielle catastrophes naturelles) ;

- une sous-action de cartographie nationale de l'aléa retrait/gonflement des argiles, en cours de réalisation, ayant pour objectif de déterminer les zones à priori sensibles et d'y diffuser des règles de prévention. Cette politique de connaissance de la répartition géographique sur l'ensemble du territoire français de

l'aléa « sécheresse géotechnique » est motivée par la connaissance technique qui existe pour s'affranchir pour les constructions nouvelles des désordres liés à ce risque, en respectant certaines règles de construction et certaines prescriptions concernant l'environnement immédiat de la construction. Cette cartographie de l'aléa consiste en la délimitation des principales zones concernées afin que, sur ces zones, soient mises en œuvre des mesures de prévention. Le BRGM est chargé de concrétiser ce programme de cartographie nationale de l'aléa « retrait/gonflement » des argiles selon une méthodologie validée par le MEDAD : cartographie à l'échelle départementale, au 1/50 000, se basant sur la carte géologique et la caractérisation des couches superficielles vis-à-vis du phénomène de retrait/gonflement. Il s'agit en effet de recenser et de hiérarchiser les zones les plus sensibles. A l'heure actuelle 34 cartes d'aléas ont été finalisées (au 19/09/2007) et sont consultables et téléchargeables sur le site : www.argiles.fr. La cartographie de l'ensemble du territoire métropolitain est prévue pour fin 2010. Les départements les plus sinistrés en terme de coût des désordres et de nombre de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle lié à ce risque ont été cartographiés en premier.

3.2

L'information

Il existe plusieurs axes d'information concernant les risques naturels et plus particulièrement les risques liés à la sécheresse géotechnique.

La filière administrative doit d'abord être citée. L'information des citoyens sur les risques naturels et technologiques majeurs auxquels ils sont soumis dans certaines zones du territoire et sur les mesures de sauvegarde qui les concernent est un droit inscrit dans le code de l'environnement aux articles L 125-2, L 125-5 et L 563-3 et R 125-9 à R 125-27. L'information préventive dans le cadre de cette loi concerne trois niveaux de responsabilité : le préfet, le maire et le citoyen en tant que gestionnaire, vendeur ou bailleur.

En plus de cette information prévue dans le cadre de la loi, le MEDAD met en place d'autres moyens d'information des particuliers pour le risque de sécheresse géotechnique, notamment les cartes d'aléa réalisées par le BRGM présentées ci-dessus.

Prochainement des fiches « mitigations » seront téléchargeables sur le site www.prim.net. Ces fiches décrivent les différentes mesures et techniques concernant à la fois le bâti et l'environnement immédiat de la construction qu'il est conseillé de mettre en œuvre lorsque notre habitat ou notre projet se situe sur un terrain sensible au retrait/gonflement des argiles.

En collaboration avec le ministère de l'Équipement et l'Agence Qualité Construction, le MEDAD a réalisé un outil de communication à destination des professionnels de la construction des maisons individuelles pour diffuser les bonnes pratiques à respecter lorsque l'on construit sur un terrain sensible. Plusieurs réunions régionales rassemblant plusieurs centaines de professionnels se sont tenues pendant l'année 2005.

Beaucoup de services départementaux de l'État diffusent, après validation de la carte d'aléa du BRGM, des plaquettes d'information à destination des particuliers souhaitant construire pour les sensibiliser à l'existence de ce risque.

La mise en place des PPR retrait/gonflement des argiles

En l'absence d'une réglementation nationale concernant des règles de construction sur les terrains sensibles au retrait/gonflement des argiles, le MEDAD a mis en place des PPR ayant pour objectif de diminuer les désordres liés à ce phénomène. Une question préalable à cette démarche a été de savoir si ce risque constituait un risque majeur. En effet ce risque est certes très coûteux en terme de réparation de désordres, mais n'a pour l'instant pas provoqué de dommages humains.

La démarche de mise en œuvre de PPR « sécheresse » a deux objectifs : d'une part ce dispositif permet de diffuser des connaissances et d'éveiller une « conscience du risque », notamment grâce à l'information acquéreur-locataire désormais obligatoire. D'autre part, le PPR rend obligatoire des prescriptions permettant de diminuer le risque sur les zones sensibles. La politique de prescription de PPR sécheresse vise aujourd'hui à traiter par un même PPR l'ensemble des zones concernées par l'aléa au sein du même département. Cette démarche a pour objectif de mettre en œuvre rapidement une prévention de ce risque dans les zones où l'on dispose d'une information sur la répartition géographique de l'aléa, et d'éviter de continuer de « mal » construire sur ces zones.

Afin de faciliter la mise en œuvre des PPR « sécheresse », et d'optimiser les mesures de prévention, la DPPR a réuni un groupe de travail regroupant à la fois des services en charge de la réalisation des PPR, des géotechniciens, des assureurs, des professionnels de la construction et d'autres experts. Ce groupe de travail a pour but d'améliorer le modèle de règlement type, fort de l'avancée des connaissances techniques et scientifiques et du retour d'expérience des services de l'État sur les PPR déjà approuvés. Les interrogations portent actuellement sur l'articulation des différents « axes » de prévention visant à agir sur la construction et sur l'environnement immédiat de celle-ci.

En parallèle de ces actions de prévention, le MEDAD intervient également dans la procédure de régime d'indemnisation de la réparation des désordres liés à ce risque en tant qu'expert technique au sein de la Commission interministérielle de déclaration de l'état de catastrophe naturelle.

4

Zoom sur la situation particulière de la sécheresse de l'été 2003

Dès juillet 2003, le constat de l'apparition de nombreux désordres aux constructions est réalisé. Au cours de l'été apparaissent des désordres très importants qui ont, pour certains d'entre eux, conduit des maires à prendre des arrêtés de périls. Mais, compte tenu de l'hiver 2002-2003 assez pluvieux, malgré cette observation des désordres, ce phénomène ne correspondait pas au critère météo utilisé par la Commission de l'état de catastrophe naturelle pour caractériser un phénomène de sécheresse exceptionnelle.

Le régime d'indemnisation des désordres relève des catastrophes naturelles, garantie incluse dans les polices multirisques habitation prises par les maîtres d'ouvrage. La loi n° 82-600 du 13 juillet 1982 a fixé pour objectif d'indemniser les victimes de catastrophes naturelles en se fondant sur le principe de solidarité nationale. Cette loi concerne les phénomènes : inondations, mouvements de terrains et du sol, séismes, avalanches, submersion marines et cyclones très intenses. Afin de pouvoir signer ou non un arrêté de déclaration Cat-Nat (finances, intérieur), une commission consultative statue sur « l'intensité anormale de l'agent naturel ». La loi du 31/07/2003 a aussi confirmé la franchise obligatoire dont le montant, fixé par arrêté, est de 1 520 € en cas de dommages dus à la sécheresse ou la réhydratation des sols, alors qu'elle est de 380 € pour les autres risques naturels. En absence de PPR prescrit ou approuvé sur une commune, si celle-ci fait l'objet de plusieurs reconnaissances pour un même type de phénomène, cette franchise double à partir du deuxième arrêté, triple ensuite ...

5

Présentation succincte du fonctionnement du système « Cat-Nat »

Après la survenance d'un phénomène naturel non assurable et pris en compte dans le régime Cat-Nat, les particuliers transmettent un dossier au maire de leur commune. Les maires le font suivre ensuite au préfet, accompagné d'une demande de reconnaissance en état de catastrophe naturelle s'ils jugent que le phénomène observé sur leur commune relève de cette instruction. Les dossiers sont instruits par la préfecture : sollicitation des expertises nécessaires, vérification du contenu des dossiers – recensement des études nécessaires et transmission des dossiers complets à la DDSC (direction de la Défense et de la Sécurité civile) du ministère de l'Intérieur. Le ministère de l'Intérieur préside cette commission et assure la transmission des dossiers aux différents membres de la commission : direction du Budget et direction du Trésor pour le ministère des Finances, le ministère de l'Outre-Mer quand des demandes proviennent des DOM-TOM, et le ministère de l'Écologie (qui ne vote pas, mais qui a un rôle d'expert technique sur les dossiers). Une réunion interministérielle de déclaration de l'état de catastrophe naturelle se réunit une fois par mois. Cette commission émet un avis sur les dossiers. A partir de cet avis, les ministres de l'Intérieur et des Finances prennent une décision qui paraît au J.O. Une fois l'arrêté paru au J.O., les citoyens ont un délai de 10 jours pour déclarer un sinistre auprès de leur assurance. Le rôle des experts d'assurance est ensuite de vérifier le lien entre l'agent naturel (le phénomène observé) et la survenance des dommages.

Afin d'être éligible pour le phénomène de retrait-gonflement des argiles, deux questions se posent :

– d'une part, est-ce que l'intensité de la sécheresse peut être qualifiée d'anormale ?

– d'autre part, existe-t-il un rapport de causalité entre l'apparition des dommages et la sécheresse ? Cette question amène trois sous-questions : y a-t-il corrélation temporelle entre la sécheresse observée et l'apparition de dommages ? Les sols de fondation des constructions endommagées sont-ils sensibles au phé-

nomène de dessiccation et ont-ils été affectés par celui-ci ? Peut-on éliminer toute cause non naturelle susceptible de provoquer des effets similaires sur le bâti ?

Pour répondre à la première de ces questions, la Commission s'est dotée, en 2000, d'un critère météorologique. Ce sont les experts des assurances qui auront ensuite à répondre à la deuxième question, la commission demande uniquement, en ce qui concerne la nature du sol une étude de sol attestant de la présence d'argile sur la commune, pour les communes dont c'est la première demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle pour ce type de phénomène. L'éligibilité d'une commune est donc fondée essentiellement sur l'intensité météorologique de la sécheresse observée.

6

Particularité de la sécheresse 2003

La sécheresse qui a été observée pendant l'été 2003 est liée à un déficit hydrique survenu après l'hiver. Le précédent critère météo de la commission Cat-Nat, évoqué ci-dessus, avait pour une de ces conditions un déficit hydrique en période de recharge hivernale, ce qui n'a pas été le cas de l'hiver 2003. Par conséquent, ce critère ne traduisait pas la sécheresse subie par les constructions en 2003. Une réflexion a été menée par les différents services afin de modifier ce critère pour prendre en compte la sécheresse exceptionnelle de 2003. La recherche d'un nouveau critère explique en partie le délai de traitement des demandes de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle pour les dommages causés par les mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols survenus pendant l'été 2003.

La sécheresse 2003, s'est essentiellement distinguée des sécheresses antérieures par son caractère très concentré dans le temps (on a parlé du « coup de chaleur » de l'été 2003) et, surtout, par le fait qu'elle n'avait pas été précédée d'une pluviosité anormalement basse au cours des mois de l'hiver précédent (janvier-mars 2003), alors que le critère appliqué depuis les années 1999-2000 pour caractériser sur le plan météorologique les sécheresses du sol d'une intensité anormale était justement fondé sur ce phénomène de « choc hivernal ».

Dès la fin de la canicule 2003, les services de l'État ont essayé de caractériser au mieux et le plus justement possible le phénomène observé. En effet, compte tenu de l'ensemble des désordres observés, il était urgent de caractériser ce phénomène. La démarche mise en œuvre pour cela a été d'élaborer un nouveau critère météorologique qui permette de qualifier l'intensité anormale de la sécheresse : afin de savoir si les critères proposés étaient représentatifs du phénomène observé, des comparaisons ont été réalisées avec les critères envisagés et les cartes des dommages recensés. Parmi les inconnues techniques pour déterminer ce nouveau critère, on peut citer par exemple les questions sur l'origine des désordres observés : sont-ils dus à la forte chaleur, ou bien à des effets cumulatifs liés aux sécheresses précédentes, ou encore à la manifestation d'effets différés, les désordres liés au retrait des argiles survenant souvent après la fin de la période de sécheresse.

En pratique, ces difficultés pour définir un nouveau critère se sont traduites par des reconnaissances et

donc des indemnisations tardives (les deux premiers arrêtés sont datés des 25 août 2004 et 11 janvier 2005), ainsi que de quelques révisions puisque le critère météorologique adopté au départ a été assoupli par la suite et donc par conséquent, il a fallu reprendre les dossiers rejetés auparavant afin de vérifier s'ils répondaient au nouveau critère.

Pour déterminer ce nouveau critère, plusieurs réunions interministérielles se sont tenues à partir du mois d'août 2003.

Par ailleurs, suite aux difficultés rencontrées dans le traitement de ce phénomène et aux questions générales que posait le régime Cat-Nat, une mission d'inspection a été lancée en février 2005 par les ministres de l'Intérieur, des Finances et de l'Écologie et du Développement durable pour établir un état des lieux du régime des victimes des catastrophes naturelles et faire des propositions en vue de sa réforme éventuelle. Dans ce cadre, un examen particulier du dossier de la sécheresse de l'été 2003 avait été demandé prioritairement et dans des délais rapides.

Enfin, pour les personnes fortement sinistrées, mais dont la commune ne vérifiait pas les nouveaux critères météorologiques arrêtés par la commission Cat-Nat pour traiter du phénomène de l'été 2003, une procédure exceptionnelle a été mise en place. Cette procédure concerne les dommages aux bâtiments causés par la sécheresse survenue entre juillet et septembre 2003 et la réhydratation des sols qui lui a été consécutive, lorsque ceux-ci compromettent la solidité des bâtiments ou les rendent impropres à leur destination. Cette procédure est réservée aux propriétaires des bâtiments à usage d'habitation principale, situés dans les communes qui ont formulé, avant le 1^{er} juin 2005, une demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle prévue aux articles L. 125-1 et suivants du code des assurances au titre de la sécheresse survenue entre juillet et septembre 2003 et qui ne l'ont pas obtenue. Les aides portent exclusivement sur les mesures de confortement nécessaires au rétablissement de l'intégrité de la structure, du clos et du couvert.

7

Conclusion sur la sécheresse 2003 en chiffres : premières estimations

La sécheresse géotechnique (aléa retrait/gonflement des argiles) ayant frappé la France, l'été 2003, a provoqué des désordres coûteux aux constructions entraînant 8 172 demandes de communes pour un classement en état de catastrophe naturelle (seuls cinq départements n'ont pas demandé d'arrêtés de catastrophes naturelles) auxquels il a été donné une réponse favorable dans 4 274 cas en date de juin 2007. De plus, le gouvernement a mis en place une procédure exceptionnelle d'indemnisation hors procédure Cat-Nat. Le coût de cette sécheresse pour le marché de l'assurance est de l'ordre de 1,5 milliard d'euros. Si nous additionnons le coût de cette sécheresse à celles des années 90, le coût des dommages moyens annuels dépasse 300 millions d'euros.

Changement climatique et événements extrêmes : crues, inondations, sécheresses. Que peut-on dire aujourd'hui ?

J.-M. GRÉSILLON,
E. SAUQUET,
B. RENARD,
M. LANG,
E. LEBLOIS

Cemagref Lyon,
Unité de Recherche
Hydrologie-Hydraulique
3 bis quai Chauveau, CP 220
69336 Lyon Cedex 09
gresillon@lyon.cemagref.fr

Résumé

Le changement climatique rendra-t-il les événements hydrologiques extrêmes plus fréquents ? A partir d'une sélection de tests de détection de tendances dans les séries et d'une analyse critique sévère de deux cents chroniques de débits journaliers, on montre qu'aucun changement généralisé à l'échelle de la France ne peut être décelé au cours du siècle dernier. Toutefois, quelques tendances cohérentes paraissent émerger au niveau régional. Ainsi, dans le Nord-Est de la France une légère aggravation des crues se dessinerait ; au contraire les étiages dans les Pyrénées semblent devenir plus sévères alors qu'ils le seraient moins dans les Alpes. Si les débits extrêmes ne semblent pas avoir encore enregistré de modifications, les modèles de circulation générale (GCM) en revanche annoncent des évolutions futures conséquentes des températures et, dans une moindre mesure, des précipitations. Le bilan entre précipitation et évaporation sera nettement modifié et les modèles hydrologiques prévoient pour l'avenir des étiages beaucoup plus sévères, notamment au Sud de la France. Décrire précisément l'évolution des extrêmes à partir des GCMs est prématuré, le couplage des modèles hydrologiques et des modèles climatiques étant à ce jour difficile. Cependant, la prudence suggère de ne pas négliger ces éventuelles évolutions, au prétexte que des outils et données fiables pour les prévoir ne sont pas encore disponibles.

Mots-clés : crues, sécheresses, non stationnarité, changement climatique, étude d'impact, modèle de circulation générale (GCM), France.

Climate Change and Extreme Hydrological Events: What do we know today?

Abstract

Will climate change lead to more floods and droughts? This paper presents an analysis of stationarity performed on an extended data set of time series from two hundred French gauging stations. This study involves the cautious selection of statistical tests to be carried out and a meticulous quality control of data to avoid drawing biased conclusions. Results do not provide any evidence of a generalized and consistent change at the scale of France during the last century. However, some consistent trends emerge at the regional scale: a weak increase of floods is detected in the North-East of France, whereas droughts seem more severe in the Pyrenean area and less extreme in the Alps. However Global Circulation Models (GCMs) forecast major evolutions of temperatures and significant, although contrasted, evolutions of rainfall. The balance between rainfall and evapotranspiration will therefore be strongly affected. Hydrologic rainfall-runoff models predict more severe droughts in French rivers, mainly in the South of France. A more accurate assessment of climate change impacts on hydrological extremes is unfortunately impossible, notably

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 30 avril 2008.

because of scale inconsistencies between GCM and hydrological models. However cautiousness suggests that such evolutions cannot be disregarded even if available numerical tools are unable to calculate reliable numerical values.

Key words: floods, droughts, non-stationarity, climate change, impact study, global circulation model (GCM), France

1

Introduction

Depuis deux décennies, une série de crues et d'inondations catastrophiques a mobilisé l'attention et suscité des questions sur une éventuelle accélération de leur occurrence. A l'échelle française, pour ne citer que les plus meurtrières, l'inondation de Nîmes en 1988 (9 morts), celle de l'Ouvèze à Vaison-la-Romaine en 1992 (41 morts), celles du Nord de la France en 1993, 1994 (21 morts) et 1995, puis celle de l'Aude en 1999 (29 morts) et celle du Gard en septembre 2002 (24 morts) ont amené les pouvoirs publics et la population à s'interroger sur l'origine de ces catastrophes. Des événements exceptionnels ont également touché l'Europe centrale et les Balkans avec les crues de l'Elbe, de la Vltava et du Danube (1997, 2002, 2005 et 2006). L'impact des activités anthropiques à l'échelle du bassin versant (types de cultures, aménagement de l'espace, urbanisation et imperméabilisation des sols, etc.) et, plus récemment, à une échelle globale (réchauffement de la planète) ont été invoqués. Au préalable, une analyse de l'évolution des régimes hydrologiques est requise pour identifier si, de manière objective, une dérive dans les données est perceptible. Une revue de la littérature montre que contrairement aux variables de température, aucune conclusion sur les écoulements ne peut être valide à l'échelle mondiale. En Europe, Hisdal *et al.* (2001) ne décèlent aucune évolution dans les étiages sur plus de 600 stations. Plus localement, des modifications significatives et cohérentes peuvent apparaître. Une diminution des écoulements moyens et des étiages due à une réduction des précipitations est ainsi signalée en Turquie (Cigizoglu *et al.*, 2005) ; au Canada, une diminution des écoulements de fin de printemps due à une fonte des neiges devenue plus précoce est également notée (Zhang *et al.*, 2001) alors qu'aux États-Unis, plusieurs analyses indiquent une tendance récente vers des étiages moins sévères sur une zone centrale comprise entre la frontière mexicaine et la région des Grands Lacs (Lins et Slack, 1999 ; Douglas *et al.*, 2000 ; Groisman *et al.*, 2005)

Il semble tout aussi difficile de conclure quant à une aggravation généralisée des crues (Kundzewicz *et al.*, 2005). A ce jour, nous ne pouvons que soupçonner des changements dans les réponses hydrologiques et la rigueur scientifique impose d'en vérifier la présence dans un cadre méthodologique préalablement consolidé et de mener, en complément, des études d'impact pour « imaginer » l'hydrologie future.

Dans cet article, nous présentons deux types d'approches pour évaluer l'impact du changement climatique sur le régime des écoulements en France, notamment dans leurs extrêmes (crues et étiages). La première approche constitue un regard sur le passé (approche dite de détection) ; à partir de données recueillies pendant au moins quarante ans sur un grand nombre de bassins versants français, elle rend compte d'une analyse statistique sur la détection des changements hydrologiques sur les rivières françaises

menée dans le cadre d'un projet de recherche national (Lang *et al.*, 2003 ; Renard *et al.*, 2006 ; Lang et Renard, 2007). La seconde s'appuie sur des modèles climatiques pour regarder vers le futur. A partir de divers scénarios, elle analyse les impacts possibles du changement climatique sur le régime des rivières (Sauquet *et al.*, 2005).

2

Détection de changements hydrologiques à l'échelle de la France

2.1

Variabilité naturelle des régimes hydrologiques

La détection de changements dans les régimes hydrologiques est une opération difficile. Elle consiste à identifier d'éventuelles modifications dans des signaux qui connaissent une variabilité temporelle intrinsèque : les rivières réagissent à des forçages complexes très variables (pluie, neige, température) qui eux-mêmes subissent des amortissements ou, au contraire, des amplifications au travers de leurs bassins versants. Le comportement d'un bassin versant est donc difficile à caractériser et l'évolution future des débits à son exutoire est encore plus délicate à définir. La figure 1 représentant les variations des débits pendant quatorze années du Serein, mesuré à Chablis, fait apparaître presque chaque année une ou plusieurs valeurs fortes de débits. Le traitement statistique adéquat de ces valeurs fortes constitue un enjeu classique pour les hydrologues. En effet, la valeur des quantiles de période de retour influence les choix et dimensionnements des aménagements dans les vallées.

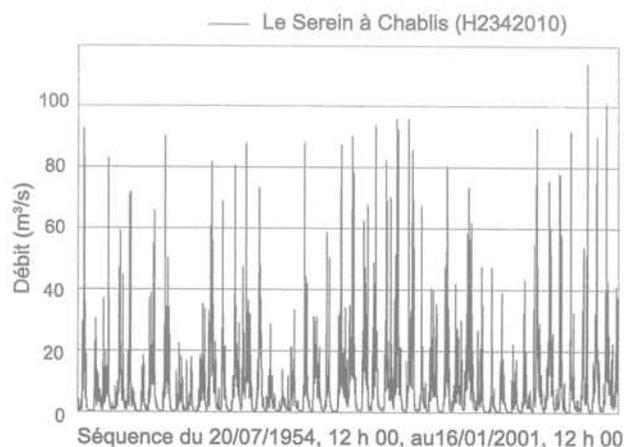


FIG. 1 Variabilité « naturelle » des régimes hydrologiques (le Serein à Chablis). Present climate variability in river flow time series (Serein River at Chablis).

La précision des résultats du traitement statistique (et donc de l'évaluation des probabilités des événements rares) dépend notamment de la longueur des séries observées ; il est, par exemple, difficile de définir la probabilité d'une valeur rare sur une courte série car elle s'appuie sur la partie extrapolée de la distribution statistique. Les séries d'observations sur les rivières françaises couvrant en général des périodes de quelques décades, la précision est en général faible ou très faible sur les quantiles de crue ayant une probabilité inférieure à 1/100 d'être dépassés chaque année (donc de « période de retour » 100 ans ou plus). Dans ces conditions, l'occurrence d'une valeur très forte est difficilement caractérisable : il peut s'agir d'un événement rare, relevé par hasard dans la période d'observation (problème d'échantillonnage). L'attribution d'une telle valeur à une « non stationnarité » du climat n'est pas possible sans une démarche spécifique qui montrerait qu'il existe une évolution cohérente dans le temps et identifiable.

2.2

Analyse locale et critique des données

Une thèse récente (Renard, 2006) a recherché les éventuelles évolutions temporelles dans les séries hydrométriques. Près de deux cents stations ont fourni des chroniques de débits journaliers sur des périodes de quarante années ou davantage. Ces stations, gérées par les directions régionales de l'Environnement (DIREN), par EDF ou par la CNR sont réparties sur l'ensemble du territoire français, avec une concentration plus forte sur la région Centre et le Sud-Est de la France (Fig. 2). Selon les gestionnaires, ces stations sont censées fournir des données de bonne qualité et dénuées d'influences anthropiques.

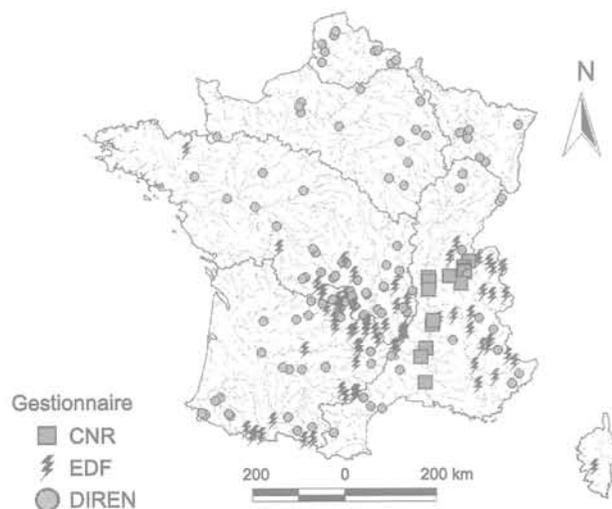


FIG. 2 Localisation des stations de mesures des débits journaliers exploitées dans l'analyse de stationnarité.
Gauging stations used in the stationarity analysis.

Différents types de changements dans les séries sont possibles : ruptures ou évolutions progressives indiquant des modifications dans les séries en moyenne ou variance. D'autre part, les variables à étudier peuvent décrire les hautes eaux, les basses eaux, les formes d'hydrogramme, etc. Pour chaque combi-

naison de types de changement et de variable, un test d'identification a été choisi dans un ensemble de tests paramétriques et non paramétriques, selon une procédure systématique et préalablement contrôlée.

Les résultats de l'analyse font apparaître des changements relativement nombreux, aussi bien sur les variables de hautes eaux que sur celles descriptives des basses eaux. Par exemple, les séries de débits maxima annuels (MAXAN) sont considérées, selon ces tests, comme présentant des changements significatifs au seuil de 10% dans 27% des stations étudiées. Cependant, à l'échelle du territoire, il existe des hausses et des baisses (en proportion équivalente). Il ne semble pas exister de cohérence spatiale nette dans ces évolutions annoncées par les tests (Fig. 3). Au vu de ces résultats, une ré-analyse des données a été effectuée, avec un nouvel examen de l'historique de chacune des stations. Cette opération a conduit à identifier, dans une proportion importante de stations, des interventions et travaux divers sur le dispositif de mesure susceptibles d'expliquer des différences dans les extrapolations des courbes de tarage et donc des artefacts (rupture ou tendance d'origine purement météorologique) dans les résultats des tests. Un tiers environ des stations a ainsi été écarté. L'analyse a été ensuite renouvelée sur l'échantillon réduit aux stations n'ayant pas subi ce type de perturbations.

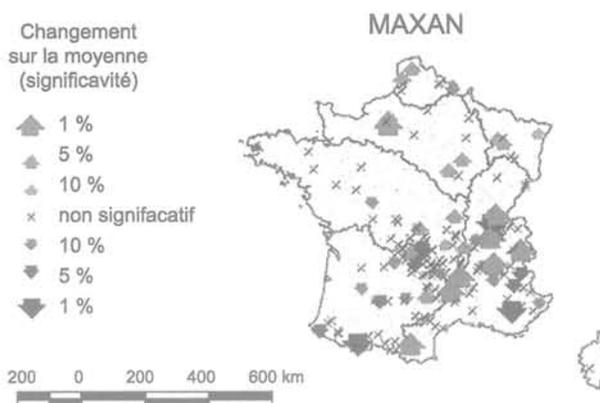


FIG. 3 Changements sur les débits journaliers maximaux annuels.
Results of the trend test for annual maximum of daily discharge.

La proportion des séries composant l'échantillon réduit de stations affectées par des changements significatifs est deux fois plus faible que précédemment. Ces changements affectent le régime de crue (débits maximaux annuels, nombre d'événements de crues par an, date) et même les étiages (durée, débit minimal moyen annuel sur 7 jours, date de ce minimum). Un exemple relatif aux crues est fourni sur la figure 4. On observe par exemple que les maxima annuels présentent beaucoup moins de changements significatifs qu'auparavant, qu'il existe encore des hausses et des baisses et que la cohérence spatiale des évolutions n'est toujours pas très grande. En ce qui concerne les étiages, les résultats sont similaires (peu de changements significatifs et absence de structure spatiale). L'analyse de ces résultats montre qu'aucune des variables (crue et étiage) n'a d'évolution significative à l'échelle de la France. Autrement dit, le nombre de changements détectés n'est pas suffisant pour rejeter l'hypothèse qu'ils soient tous dus au hasard.

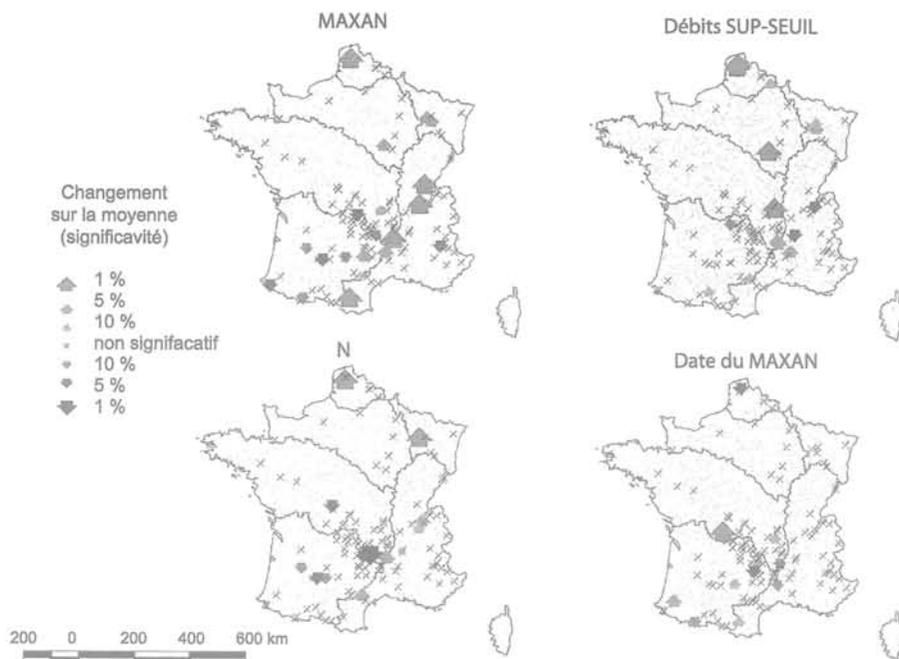


FIG. 4 Évolutions relatives aux crues après critique des données.
 maxan = maxima annuels des débits journaliers ; débit sup-seuil = pointe de débits journaliers au dessus d'un seuil ; N = nombre moyen annuel d'événements au-dessus d'un seuil ; date du Maxan = date du max annuel.
 Results of the trend tests after data analysis.
 maxan = annual maxima of daily discharges ; débit sup-seuil = maximum daily discharges above a fixed threshold ; N = mean annual number of events above a fixed threshold ; Date du Maxan = date of annual max.

2.3

Analyse régionale pour la détection de changements hydrologiques

L'absence de cohérence spatiale dans les résultats des études menées station par station a conduit à une analyse fondée sur des regroupements régionaux. Les stations hydrométriques ont été rassemblées en ensembles homogènes en croisant deux classifications, l'une fondée sur les pluies (Champeaux et Tamburini, 1995), l'autre sur le régime hydrologique (Pardé, 1955). Un test régional a été développé et appliqué pour analyser des évolutions consolidées sur ces regroupements. Peu de changements apparaissent ainsi, à trois exceptions près :

1) en région alpine, la sévérité des étiages diminue (la moyenne du débit minimum sur 7 jours et celle du débit d'étiage sur 30 jours présentent une tendance significative à l'augmentation). L'augmentation avérée des températures de l'air pourrait avoir réduit la quantité d'eau retenue en hiver sous forme de neige, augmentant ainsi les débits sur cette saison. De plus, les écoulements liés à la fonte des neiges semblent présenter une précocité accrue, et le volume écoulé entre juin et octobre semble augmenter pour les rivières soumises à une influence glaciaire. Ces éléments sont à mettre en relation avec les travaux sur le retrait des glaciers (Vincent, 2006) ;

2) dans les Pyrénées au contraire, les étiages deviennent plus sévères. Dans une moindre mesure, l'assèchement est également sensible sur les écoulements annuels et sur les crues pluviales qui ont une tendance à la baisse ;

3) dans le Nord-Est de la France apparaît une légère tendance à l'aggravation des crues décelée sur les séries de maxima annuels journaliers.

En conclusion, l'observation des régimes hydrologiques du passé ne permet pas, pour le moment, de mettre en évidence des changements d'ensemble très nets dans les séries temporelles. Pourtant, à l'échelle régionale, des changements cohérents apparaissent tout de même : augmentation des étiages dans les Alpes ; diminution au contraire de ces étiages et de l'hydraulicité dans les Pyrénées ; légère augmentation des crues dans le Nord de la France.

Bien que ces évolutions soient faibles et d'une amplitude telle qu'elles pourraient être interprétées comme de l'ordre des incertitudes, leur liaison avec l'évolution observée des températures et des précipitations les rend cohérentes (Renard, 2006). Il est nécessaire de surveiller ces évolutions qui pourraient s'amplifier dans les années à venir.

3

Scénario climatique et hydrologie

Tournant notre regard vers le futur, nous utiliserons les données des modèles de circulation générale pour tenter de prévoir quel climat ils proposent pour l'avenir et de traduire cette vision en terme d'hydrologie.

3.1

Les modèles et leurs hypothèses

Les modèles de circulation générale (GCM) reposent sur une description des processus physiques, chimiques et biologiques dans l'atmosphère, les océans, la cryosphère et sur les surfaces continentales à l'échelle de la planète. Ils résolvent les équations de la mécanique et de la thermodynamique des fluides géophysiques dans les trois dimensions spatiales et

dans le temps sur les éléments d'un maillage recouvrant le globe. Ces éléments ont une résolution horizontale d'une centaine de kilomètres, et de quelques dizaines de mètres à un kilomètre sur l'axe vertical. Ils décrivent le climat passé et proposent une projection du climat futur en incluant notamment des évolutions de la composition en gaz à effet de serre. Les modèles diffèrent par leur résolution spatiale et par les lois physiques représentées. Ils ne sont malheureusement pas parfaits du fait de certains processus mal appréhendés à grande échelle. Ainsi, dans le cadre du projet GICC-Seine, Ducharne *et al.* (2004) soulignent un biais de reconstitution sur les précipitations mensuelles pouvant dépasser 50% sur le bassin de la Seine certains mois en hiver. Pour valoriser ces sorties, les hydrologues ont alors recours à une hypothèse forte et pourtant nécessaire : ils supposent que les défauts de reconstitution du modèle identifiés en reconstitution du passé seront présents et équivalents dans les chroniques du futur. En pratique, les sorties pluie et température sont de manière classique exploitées en terme d'« anomalies » (écarts) par rapport au climat passé reconstitué par le GCM.

La suite exploite pour partie des scénarios SRES obtenus en 2001 et mis à disposition sur le site de l'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change Data Distribution Centre* <http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/>).

3.2

Scénarios et anomalies saisonnières

Le rôle du CO₂ étant prépondérant dans le changement climatique, les scénarios envisagés reposent sur différentes hypothèses d'évolution de son contenu dans l'atmosphère. Les hypothèses sur les niveaux de croissance économique et de croissance démographique sont donc à la base des scénarios. L'un des plus pénalisants, mais réaliste, considère, à l'échelle de la planète, une croissance démographique qui se poursuit puis se stabilise au milieu du XXI^e siècle, avec une croissance économique très rapide pourtant compensée par l'introduction de nouvelles technologies « pro-

pres » pour la production d'énergie (scénario A1). Avec ce scénario, à l'horizon 2080, le modèle CCSR/NIES AGCM prévoit, par rapport à la période 1960-1990, des élévations de température moyennes de juin à août qui se situent autour de quatre à cinq degrés sur la plupart des continents (Fig. 5). Il prévoit des anomalies de précipitations légèrement positives (accroissement) de décembre à février sur le nord des continents (Fig. 6) mais nettement négatives (diminution) en été au sud de l'hémisphère nord.

A une échelle spatiale plus fine, celle du bassin du Rhône (Fig. 7), un autre scénario correspondant à un doublement du CO₂ à échéance de 2050, traité par deux autres modèles (modèle du CNRM de Météo France et modèle LMD Paris) prévoit une augmentation des précipitations d'hiver et d'une diminution de celles-ci l'été (Leblois *et al.*, 2004).

3.3

Impacts hydrologiques du changement climatique

La taille des mailles des modèles de circulation générale et encore plus leur résolution temporelle sont beaucoup trop grandes pour permettre, directement, une approche fiable de l'impact du changement climatique sur les crues et les inondations. Tout juste peut-on prévoir que l'augmentation attendue des précipitations d'hiver pourrait induire une aggravation des crues et événements extrêmes.

En revanche les périodes d'étiage, provoquées par de longues périodes sans pluie et associées à des évaporations et évapotranspirations importantes, peuvent être étudiées à partir des sorties des GCMs. Sur plusieurs affluents du Rhône (la Drôme, le Roubion, l'Eyrieux), Sauquet *et al.* (2005) ont analysé les impacts prévisibles à l'échéance de 2050 du changement climatique sur les étiages, caractérisés par la variable QMNA5, débit mensuel minimal dans l'année, de période de retour 5 ans (ou si on préfère, le débit mensuel minimal dans l'année qui aurait aujourd'hui une probabilité de

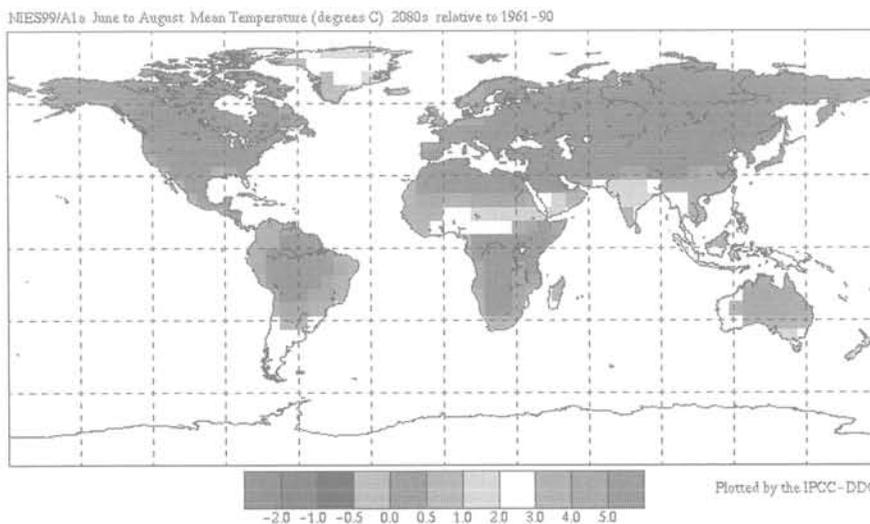


FIG. 5

Anomalies de température à l'échéance 2080, pour la période juin-août. Modèle CCSR/NIES ; scénario A1. Temperature anomalies at 2080 date ; June to August period ; CCSR/NIES model ; A1 scenario.

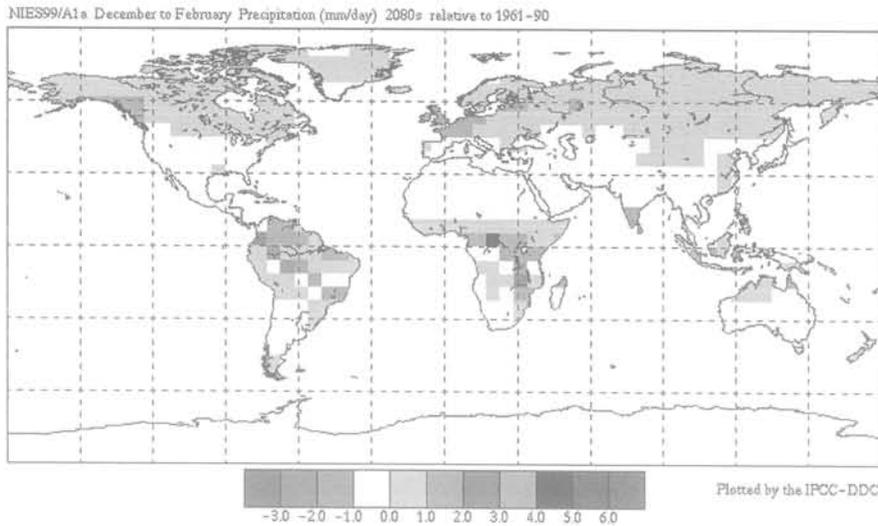


FIG. 6 Anomalies de précipitations à l'échéance 2080, pour la période de décembre-février. Modèle CCSR/NIES ; scénario A1. Rainfall anomalies at 2080 date ; December to February period ; CCSR/NIES model ; A1 scenario.

20 % de ne pas être dépassé, ou une probabilité de 80 % d'être dépassé). Bien entendu, cette probabilité est jugée en référence à la période actuelle.

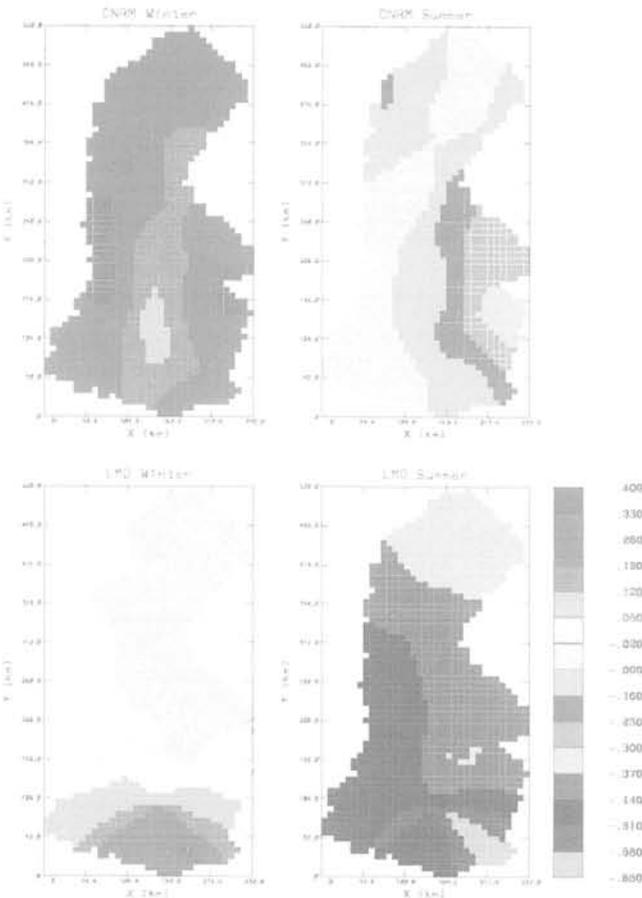


FIG. 7 Figure 7 - Anomalies de précipitations sur le bassin du Rhône ; scénario doublement de CO₂, échéance 2050. Données LMD et Météo-France, mise en forme Météo-France. Rainfall anomalies on the Rhone River basin at 2050 term; CO₂ doubling scenario.

La méthode employée a consisté à caler, pour le climat présent, un modèle hydrologique et à l'appliquer pour le futur, en faisant l'hypothèse d'une transformation pluie débit stationnaire, et en affectant aux pluies actuelles la « perturbation » de grande échelle calculée par le GCM et en calculant une évapotranspiration potentielle (ETP) tenant compte de l'élévation de température. Pour la Drôme, c'est le modèle conceptuel suédois *Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning* HBV (Bergström et Forsman, 1973 et décrit, par exemple, dans Perrin (2000)) qui donne les meilleures performances pour la reconstitution du climat présent. La figure 8 représente les fonctions de répartition des valeurs des débits QMNA5 observés dans le climat présent (points noirs), celles des débits du climat présent mais obtenus par simulation avec HBV évoqué ci-dessus (points rouges) et celles des débits simulés par ce même modèle sous hypothèses du changement climatique (points bleus).

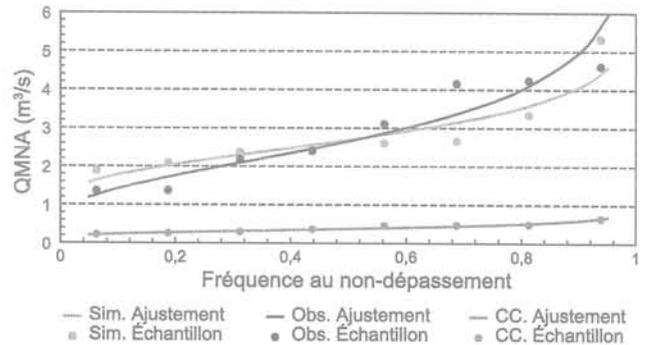


FIG. 8 Fonction de répartition des QMNA de la Drôme, temps présent et dans l'hypothèse d'un doublement de CO₂. Repartition function of QMNA (annual minimum of monthly discharge) for the Drôme River ; present time and at 2050 term with an hypothesis of CO₂ doubling.

La figure 8 permet de mesurer les capacités du modèle à simuler les débits du temps présent. Les points représentent les échantillons et les courbes les

ajustements réalisés à partir de ces échantillons. Il semblerait donc que le changement climatique entraîne une violente réduction du débit caractéristique d'étiage QMNA5. Le même résultat se retrouve pour tous les affluents du Rhône étudiés.

4

Conclusion

Au contraire de ce qu'indiquait le regard sur le passé et la recherche de ruptures ou de tendances dans les séries hydrométéorologiques observées, une étude du futur au travers de modèles couplés hydrologie/changement climatique apporte des résultats d'une grande clarté au moins sur les étiages. Il existe donc une apparente contradiction entre les deux parties de cette étude :

1) pas de conclusion très nette par une approche de détection de tendance sur les séries hydrométéorologiques observées dans les quarante dernières années ;

2) très fort impact du changement climatique sur le régime des rivières, notamment sur leurs étiages.

Cette contradiction s'explique probablement en partie par la difficulté méthodologique associée à la détection de tendances. En effet, les signaux hydrologiques sont extrêmement variables par nature ; les tendances éventuelles peuvent concerner des évolutions plus complexes que celles d'une moyenne ou d'une variance et nécessiter de longues séries pour apparaître. Par ailleurs nous ne nous sommes probablement pas suffisamment écartés du fonctionnement climatique des derniers siècles, pour observer les prémices d'un glissement vers un autre fonctionnement. Pourtant, à l'aide d'une approche régionale, des tendances réelles apparaissent: dans les Alpes, augmentation des débits d'étiage, précocité de la fonte et augmentation du volume généré par la fonte des glaciers; diminution des étiages d'été dans les Pyrénées ; légère augmentation des crues dans le Nord de la France. Ces évolutions doivent être surveillées, et des travaux complémentaires sont nécessaires avant de pouvoir les relier formellement aux évolutions climatiques attendues.

Les modèles appliqués au futur sont en revanche très affirmatifs sur l'évolution des étiages à attendre

dans un avenir relativement proche : au niveau de la ressource en eau (et probablement de l'assèchement des sols), les applications réalisées ici montrent qu'il faut s'attendre à des diminutions importantes pendant les périodes d'été, au moins au Sud de la France. En ce qui concerne les crues et les inondations, les modèles climatiques n'apportent pas de réponse précise pour le moment. Des outils robustes restent à construire pour que les sorties des modèles climatiques soient exploitables à une maille temporelle et spatiale compatible avec les besoins de l'hydrologie des crues. Des travaux sont menés en ce sens. Deux voies sont actuellement explorées : la désagrégation statistique et la désagrégation dynamique. Dans le premier cas, il est fait usage de relations empiriques entre variables locales et des variables décrites de manière efficace par les GCMs (par exemple : Boé *et al.*, 2006). Dans le second cas, les GCMs viennent piloter des modèles climatiques régionaux à base physique pour décrire la dynamique locale du système climatique (par exemple : Christensen et Christensen, 2006). Les deux approches sont dépendantes des progrès des GCMs qui les alimentent d'une façon ou d'une autre.

En tout état de cause, les résultats actuels doivent nous alerter : les basses eaux pourraient être nettement plus sévères dans le futur. Le principe de précaution recommande également de ne pas ignorer les quelques évolutions observées régionalement dans les régions Pyrénéennes et Alpines ou dans le Nord-Est : le rôle du changement climatique, s'il ne peut être établi formellement aujourd'hui, ne peut pas être totalement écarté.

REMERCIEMENTS

Le présent article est la synthèse de travaux de recherche soutenus financièrement par le Programme National de Recherche en Hydrologie (AO2002) et par le ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables dans le cadre d'appels à propositions GICC Gestion et Impacts du Changement Climatique (AO1999) et Risque Décision Territoire (AO2003). M. Lang, E. Leblois et E. Sauquet ont rédigé ces lignes en tant que coordinateurs des projets de recherche désormais achevés. Ils tiennent à remercier l'ensemble des partenaires de leur contribution à la réussite des projets.

Introduction

Les récentes sécheresses que la France a connues rappellent que des précipitations insuffisantes pendant une période prolongée conduisent à des déficits en eau qui affectent la végétation et les sols. Les interactions entre le sol, la végétation et l'atmosphère sont complexes. La végétation intervient sur : 1) la redistribution et l'évaporation des précipitations qu'elle intercepte ; 2) l'extraction de l'eau par le système racinaire ; 3) le contrôle biophysique de la transpiration. Ainsi, la végétation est la principale source naturelle de modification de la teneur en eau des sols. En retour, la teneur en eau du sol contraint l'évapotranspiration de la végétation, en imposant un ajustement de la consommation en eau par fermeture des stomates en fonction de la disponibilité en eau du sol.

La sécheresse édaphique peut être définie comme une période pendant laquelle la quantité d'eau disponible dans le sol est insuffisante pour permettre le développement, la croissance et le fonctionnement optimal de la végétation. C'est donc par la mesure ou la modélisation de la teneur en eau du sol qu'il est possible de caractériser et quantifier les épisodes de sécheresse édaphique. Sous un climat donné, un sol se dessèchera plus ou moins rapidement et profondément selon qu'il est nu, occupé par de la végétation de type herbacée ou ligneuse. Comprendre et estimer l'impact de la végétation sur la dynamique de l'eau dans le sol est essentiel pour pouvoir prédire la propagation spatio-temporelle de la sécheresse dans le sol et les déformations physiques possibles qui peuvent en résulter.

Le sol, un milieu hétérogène

Le sol, ou couverture pédologique, est un objet naturel dont l'existence et l'état actuel résulte d'une évolution au cours du temps d'un matériau géologique sous l'action combinée de facteurs climatiques (précipitations, température) et de facteurs biotiques (animaux et végétaux, microorganismes). Ces différentes actions conduisent à la formation d'un ensemble d'horizons issus de l'altération du matériau originel et de l'incorporation de matière organique. Ces phénomènes créent la porosité (fissurale, texturale, structurale), le milieu s'organise, l'aération et la perméabilité augmentent. Les transferts hydriques et gazeux sont favorisés, ainsi que l'activité biologique.

Des conditions du milieu favorables tendent à augmenter la fourniture d'eau à la plante et améliore sa croissance, et augmente indirectement le retrait/gonflement par une plus grande consommation en eau qui amplifie l'alternance saisonnière des cycles dessèchement - réhydratation.

La végétation intervient dans deux flux opposés du bilan d'eau du réservoir que constitue le sol : d'une part, la végétation réduit et retarde l'entrée d'eau en interceptant les précipitations ; d'autre part, elle intervient directement sur la sortie d'eau, en puisant l'eau nécessaire à sa transpiration. L'évapotranspiration du couvert végétal (transpiration plus évaporation de l'eau interceptée sur le feuillage, qui peut être quantitativement importante sur les arbres) est conditionnée par la demande climatique, souvent caractérisée par

l'évapotranspiration potentielle (ETP). Cette variable climatique intègre à la fois les termes radiatif (rayonnement) et convectif (vitesse du vent, humidité relative de l'air) qui contrôlent l'évaporation. La quantité d'eau maximale prélevée par la végétation dans le réservoir du sol est fonction de cette ETP et de la surface foliaire du couvert. A certaines périodes de l'année, l'eau faiblement retenue s'évacue en profondeur et contribue à alimenter les réserves profondes (nappe phréatique). Si le sol est imperméable (horizon très argileux par exemple) et ne laisse pas l'eau s'infiltrer, il y a alors formation d'une nappe temporaire (dite perchée), où de l'eau libre s'accumule en saturant toute la porosité du sol au dessus du plancher imperméable. Là encore, le régime d'alternance nappe temporaire - sécheresse amplifie les phénomènes de retrait gonflement dans les sols sensibles à ces phénomènes.

Par définition, la réserve utile intrinsèque du sol est la quantité d'eau, exprimée en volume d'eau par volume de sol, comprise entre deux limites appelées états hydriques caractéristiques : la capacité au champ et le point de flétrissement permanent (Fig. 1). La capacité au champ correspond à la quantité maximale de rétention en eau du sol, après le ressuyage de l'eau gravitaire. Ce niveau est généralement atteint en fin d'hiver, juste avant la reprise de la végétation. Cependant, il arrive, en particulier lors de succession d'années à déficit pluviométrique, que cet état ne soit pas reconstitué chaque hiver. Le potentiel hydrique du sol à la capacité au champ est généralement considéré égal à $-0,01$ MPa. La seconde limite, appelée point de flétrissement permanent, correspond à la limite inférieure de teneur en eau en dessous de laquelle la végétation n'est plus capable d'absorber l'eau. Cet état hydrique caractéristique correspond à la teneur en eau du sol à un potentiel hydrique de $-1,6$ MPa. Cette notion, d'origine agronomique, reste assez théorique, car certaines plantes dont de nombreux arbres sont capables d'extraire de l'eau à des potentiels encore plus négatifs. Pour un sol de texture donnée, la réserve utile intrinsèque correspond à la différence entre les teneurs en eau volumiques caractéristiques. La figure 1 montre qu'un sol de texture limoneuse ou de texture argileuse aura une meilleure réserve utile intrinsèque qu'un sol de texture sableuse. Cette réserve utile intrinsèque est généralement exprimée en mm de hauteur d'eau par cm de profondeur de sol. La quantité d'eau effectivement disponible pour un couvert végétal, appelée simplement réserve utile, s'obtient en multipliant la réserve utile intrinsèque du sol par la profondeur d'enracinement effective du couvert.

La plus grande majorité des travaux sur la rétention de l'eau utilisent des relations empiriques permettant de prédire la teneur en eau d'une couche de sol à un de ces états caractéristiques. Ces relations, appelées fonctions de pédotransfert (Bastet et al., 1998), utilisent les propriétés physico-chimiques des sols comme prédicteurs et sont de type :

$$W = a * \text{Argile} + b * \text{Limon} + c * \text{Sable} + d * \text{Corg} + e * \text{Da}$$

avec :

W, teneur en eau massique ;

Argile, teneur en argile ;

Limon, teneur en limon ;

Sable, teneur en sable ;

Corg, teneur en carbone organique ;

Da, densité apparente sèche ;

a, b, c, d et e, coefficients de calage.

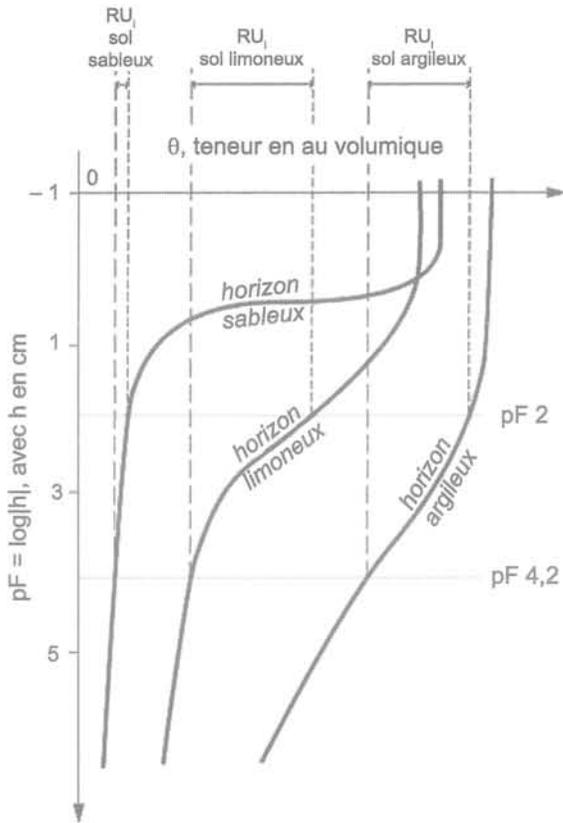


FIG. 1 Représentation de la réserve utile intrinsèque (RU_i) comme la différence entre la teneur en eau à $-0,01$ MPa (pF 2), correspondant, par convention, à la capacité au champ, et la teneur en eau à $-1,6$ MPa (pF 4,2), correspondant au point de flétrissement permanent de la plupart des plantes cultivées. La forme des courbes reliant le potentiel matriciel, h , à la teneur en eau, θ , varie selon la texture. De manière générale, la RU_i du sol limoneux est supérieure à celle du sol argileux et celle du sol sableux est très faible.

Cette fonction utilise des prédicteurs simples à apprécier sur le terrain (texture) ou assez facilement mesurables. Dans d'autres cas, les paramètres utilisés dans ces fonctions sont plus complexes à déterminer, mais mesurés en routine par les laboratoires d'analyse des sols. Par exemple, la figure 2 illustre un exemple de relation utilisable pour prédire la teneur en eau résiduelle (au point de flétrissement) à l'aide de la capacité d'échange cationique (d'après Tessier *et al.*, 1996). D'autres exemples peuvent être retrouvés dans Bastet *et al.* (1998), dans Bruand *et al.* (2003, 2004) ou encore Cresswell *et al.* (2006).

3

La végétation et ses caractéristiques

La végétation est située à l'interface entre l'atmosphère et le sol. Son impact spatial et temporel sur la dynamique de l'eau dans le sol est directement conditionné par les caractéristiques de ses deux surfaces d'échanges : la surface foliaire, siège des échanges plante-atmosphère, et le système racinaire fin, siège des échanges plante-sol. L'interface couvert-atmosphère est caractérisée par sa phénologie (dynamique saisonnière, apparition et chute des feuilles, fanaison) et son indice foliaire. Ce paramètre exprime la sur-

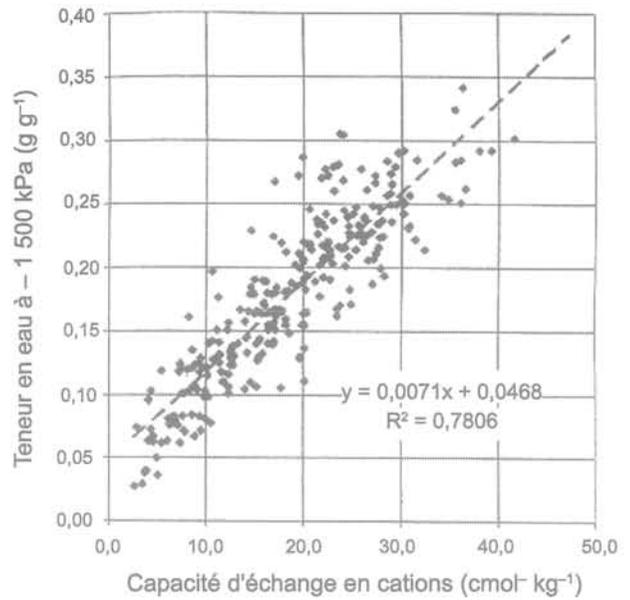


FIG. 2 Prédiction de la teneur en eau résiduelle (au point de flétrissement) à l'aide de la capacité d'échange cationique (CEC) (d'après Tessier *et al.*, 1996).

face de feuilles développée par unité de surface de sol. Ainsi, un indice foliaire de 4 signifie qu'il y a 4 m^2 de feuilles au-dessus d' 1 m^2 de sol. Cette grandeur peut être mesurée soit directement en récoltant les feuilles (en coupant une surface définie pour les couverts herbacés ou en récoltant les feuilles lors de leur chute automnale), soit indirectement en mesurant le rayonnement transmis sous la végétation (Bréda, 1999). L'interface entre sol et plante est caractérisée quant à elle par la distribution verticale et horizontale des racines. Dans le cadre de l'étude du rôle de la végétation sur la propagation de la sécheresse du sol, seule la fraction des racines qui absorbent effectivement l'eau du sol, est à considérer. Cette remarque importe surtout pour les végétations pérennes et ligneuses, dont les systèmes racinaires les plus couramment décrits ne concernent que les racines d'ancrage, souvent plus superficielles et qui servent de support aux racines fines. En outre, les racines fines présentent un renouvellement et une croissance rapides, l'extension verticale des zones de prélèvement d'eau peut donc fortement évoluer au cours de la saison.

4

Quelle approche pour décrire la variation de teneur en eau du sol sous végétation ?

Sous couvert d'arbres, les mesures conjointes de la consommation en eau des arbres (mesure du flux de sève brute dans le tronc) et de teneur en eau du sol renseignent quant à la propagation verticale du dessèchement au cours de la progression de la sécheresse (Bréda *et al.*, 1995). Sur l'exemple présenté figure 3 ; le prélèvement d'eau par des frênes a été estimé par différence de teneur en eau entre deux dates sans épisode pluvieux dans chaque couche de sol (Bréda *et al.*, 2004). Parallèlement, la consommation a été mesurée par flux

de sève dans les troncs des arbres au cours de chaque période et correspond au cumul des absorptions par couche de sol. Une fosse a été ouverte pour décrire la distribution verticale des racines, en distinguant les racines par classes de dimension. Au printemps, l'alimentation en eau par les arbres est assurée par le premier mètre d'épaisseur de sol. C'est dans cette couche de sol que toutes les racines pérennes ont été observées et que la densité de racines fines est la plus importante. Au cours du mois de juin, le dessèchement progresse en profondeur, et l'absorption d'eau est assurée dans une couche où seules des racines fines sont présentes. Dans cet exemple, cette couche capable de fournir de l'eau est à texture argileuse et présente une rétention en eau forte. Au cours de l'été, le premier mètre de sol ne fournit pratiquement plus d'eau. Les arbres mobilisent alors des réserves hydriques profondes, à l'aide des quelques pourcents de racines situées entre 1,2 m et 1,6 m. On constate donc que les prélèvements ne sont pas proportionnels à la quantité de racines fines tout au long de la saison. Des résultats comparables ont été obtenus sous chênaie (forêt de Champenoux, Bréda *et al.*, 1995), avec une prospection efficace par

les racines fines dans les horizons argileux. Les niveaux de dessèchement obtenus ont atteint des potentiels hydriques de $-2,5$ MPa dans l'horizon argilo-limoneux et de $-3,0$ MPa dans les horizons profonds (Fig. 4). Les horizons argileux carbonatés comportent 70 à 80 % d'un mélange smectite-vermiculite à forte potentialité de retrait gonflement. Ces deux exemples mettent en évidence l'importance de la profondeur, de la répartition et de la dynamique du système racinaire.

5

Exemples de bilans hydriques modélisés en fonction de la végétation

Un premier exemple concerne la comparaison de la dynamique d'eau dans le sol sous un couvert d'arbres à feuilles caduques (hêtre) et sous résineux à feuilles persistantes, avec un indice foliaire maximal comparable égal à 7,5. Cette situation est tout à fait réaliste et représente par exemple le cas d'une plantation résineuse

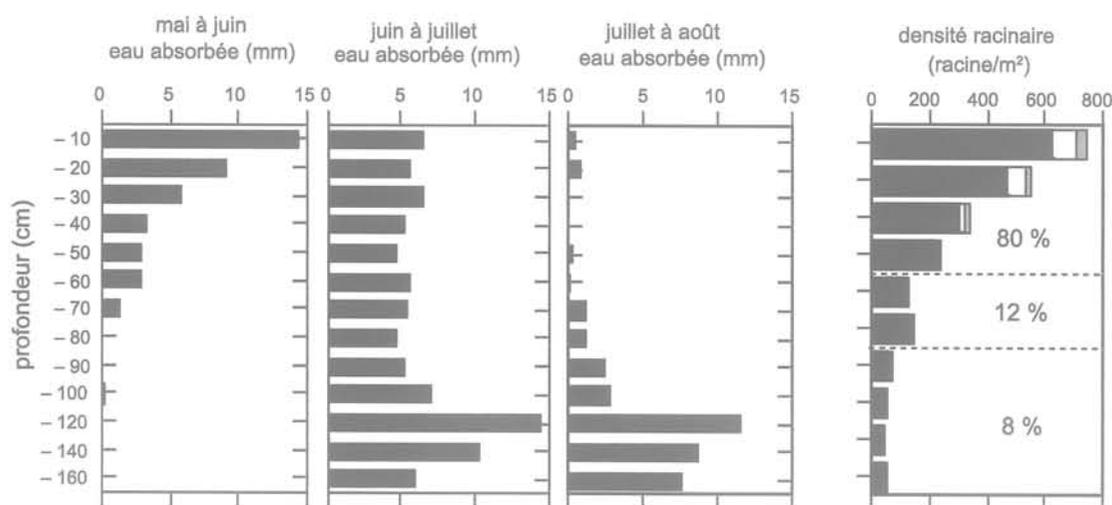


FIG. 3 Progression en profondeur des prélèvements d'eau dans le sol au cours de l'établissement d'une sécheresse estivale naturelle sous un peuplement de frênes. L'eau absorbée est calculée à partir des variations de teneur en eau du sol mesurées à la sonde. La distribution verticale des racines est présentée en parallèle, en distinguant les racines par classes de dimensions (0-2 mm en noir, 2-5 mm en blanc, 5-10 mm et >10 mm en grisé). Les pourcentages de racines fines (0-2 mm) par horizon pédologique sont indiqués (d'après Bréda *et al.*, 2002).

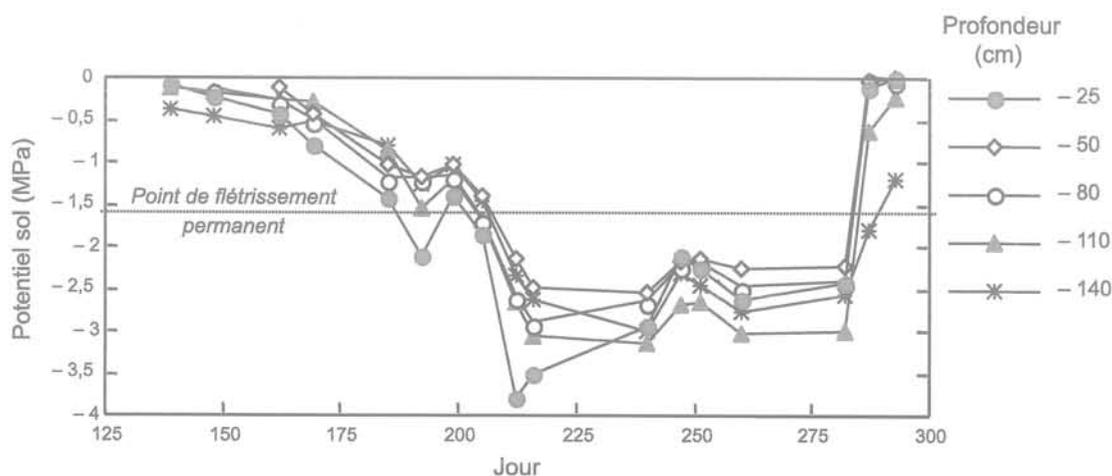


FIG. 4 Évolution du potentiel hydrique mesuré sous un sol forestier à 5 profondeurs à l'aide de mycropychromètres au cours d'un dessèchement saisonnier. Les potentiels mesurés dans le sol sont très nettement inférieurs au potentiel théorique correspondant au point de flétrissement permanent (ligne pointillée) (d'après Bréda *et al.*, 1995).

dense et une futaie de hêtre, sur un sol limono-argileux sans contrainte majeure, d'une profondeur utile de 2 m pour les deux espèces, et présentant une réserve utile de 175 mm. Les différences illustrées sur la figure 5 résultent de l'impact de la différence de phénologie (mise en place de toutes les feuilles au printemps sur feuillus). Cet effet de la phénologie est de bien plus grande importance que toutes les différences subtiles, telles que la régulation stomatique, qui jouent à la marge dans ce schéma de fonctionnement. Le dessèchement du sol au printemps est plus précoce sous les résineux, dont la consommation en eau débute dès que la température et le rayonnement augmentent. A l'opposé, la réhydratation du sol est retardée, en raison du maintien d'une forte interception des précipitations lors du retour des pluies d'automne. Sur l'exemple de l'année 2003 en Lorraine, on peut calculer le début de la période de sécheresse au 28 mars sous résineux et au 16 juin sous feuillus (Bréda *et al.*, 2004) : c'est la date à laquelle la réserve en eau chute en dessous de 40%

de la réserve utile, limite représentée sur la figure 5. Pour les forêts, et ceci quelle que soit l'espèce, nous définissons en effet le déficit hydrique par rapport à ce seuil qui affecte à la fois la croissance, qui s'arrête, et la transpiration (régulation stomatique) (Granier *et al.*, 1999). Dans la suite, le déficit hydrique que nous utiliserons correspond pour chaque courbe à la surface comprise entre ce seuil et la courbe d'évolution de la réserve en eau du sol. Ici cet indice est une grandeur sans dimension et est illustré par la zone hachurée en encart de la figure 5. Ce type de calcul de bilan hydrique a été appliqué sur une série climatique de 50 ans et permet d'établir un classement objectif des intensités de déficit hydrique entre les années, sous différents types de couvert végétal. Il s'agit ici de quantifier l'impact d'un profil climatique sur la contrainte subie par couvert forestier donné, sans présager des ajustements ou réactions (de type dépérissement par exemple) qui pourraient s'en suivre. La figure 6 illustre ainsi le classement des 10 années à déficit hydrique

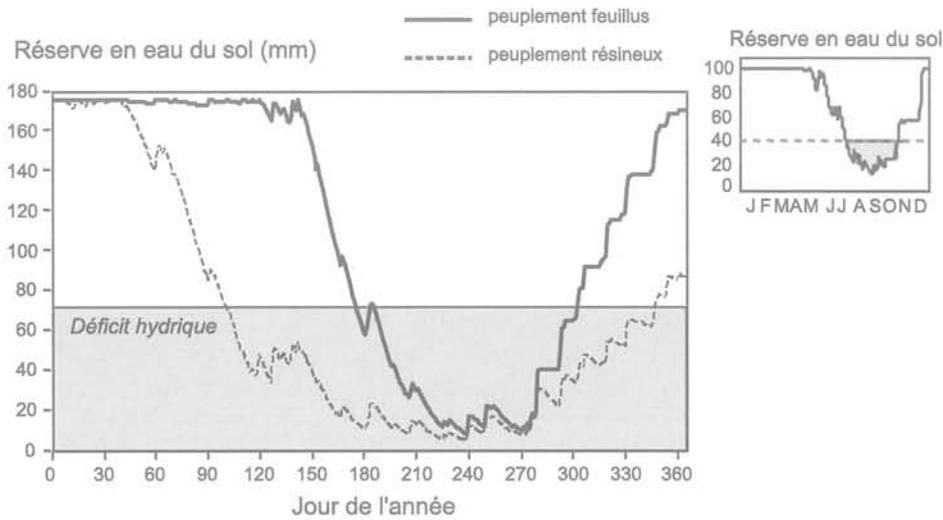


FIG. 5 Évolution simulée de la réserve en eau d'un sol à forte réserve (175 mm) au cours de l'année 2003 à Nancy, sous peuplement feuillus ou résineux à indice foliaire équivalent (7,5). Modélisation BILJOU (Granier *et al.*, 1999), données climatiques INRA-Champenoux.

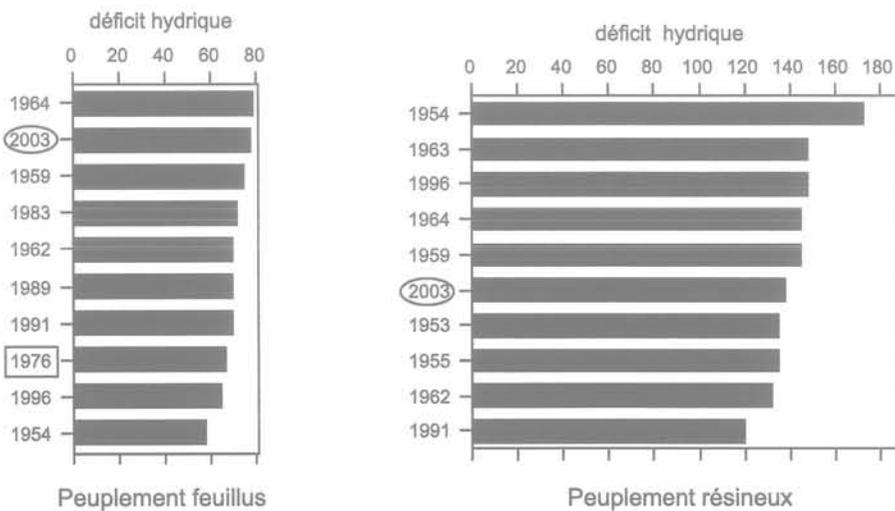


FIG. 6 Classement des dix années à déficit hydrique les plus sévères par ordre décroissant d'intensité en Lorraine entre 1950 et 2003, sous peuplement feuillus (à gauche) ou résineux (à droite) à indice foliaire égal est assez fort (7,5), sur sol à réserve utile de 130 mm. Les intensités des déficits hydriques sont environ deux fois plus intenses sous résineux que sous feuillus. L'année 2003 n'est pas la plus grave sous résineux des 50 dernières années et l'année 1976 n'est pas classée parmi les 10 années les plus sévères pour ces hypothèses et sous ce climat. Sous feuillus, la sécheresse de l'année 1964 avait été légèrement plus forte que celle de 2003. Modélisation BILJOU (Granier *et al.*, 1999), données climatiques INRA-Champenoux.

les plus graves sous peuplement forestier feuillu et résineux. On constate à nouveau des déficits hydriques deux fois plus sévères sous résineux que sous feuillu, et ceci malgré des différences de comportement éco-physiologique. La sécheresse de l'année 2003 apparaît bien comme parmi les plus intenses sous feuillu, alors que sous résineux d'autres années ont présenté des contraintes plus fortes. Face à ces intensités de déficit hydrique, tous les types de végétation ne répondent pas de manière identique : certains meurent, d'autres ajustent leur consommation à la restriction d'eau, d'autres encore perdent leurs feuilles précocement pour éviter de se dessécher. Un synthèse récente illustre ces différentes stratégies pour les arbres forestiers (Bréda *et al.*, 2006).

Le déficit hydrique est illustré par la surface hachurée dans l'encart, à partir d'un exemple de réserve utile de 100 mm : en dessous de 40 % de cette valeur, soit lorsque la réserve du sol chute en dessous de 40 mm (illustré ici par la ligne pointillée), la croissance des arbres s'arrête. Pour plus de détails, le lecteur se reportera à Granier *et al.*, 1999.

Dans un second exemple, la dynamique de l'eau dans le sol sous couvert de résineux est comparée à celle simulée sous couvert prairial et sous culture de maïs (figure 7). Dans le cas des deux couverts végétaux pérennes (résineux et prairie), le dessèchement débute simultanément, mais son intensité diffère très rapidement. Le dessèchement sous prairie est limité par le faible enracinement du couvert végétal qui n'exploire que les 30 premiers centimètres du sol, alors que l'ensemble des 160 cm du profil de sol est exploré par les racines des arbres. La dynamique hydrique du sol sous maïs est similaire à celle du sol sous peuplement feuillu en ce qui concerne l'aspect temporel (Fig. 6). Ceci s'explique par l'apparition tardive des surfaces de feuilles, liée à l'implantation au printemps de la culture de maïs avec une émergence des plants de maïs début mai. Toutefois, l'extraction de l'eau par le maïs reste limitée par son enracinement maximal, qui ne dépasse pas 1 m de profondeur dans la plupart des cas, et par sa sensibilité au stress hydrique. L'état hydrique du sol à la fin de l'année 2003 est intéressant à comparer (Fig. 7). Que

ce soit pour le couvert prairial ou la culture de maïs, le sol a reconstitué sa réserve hydrique dès la fin de l'année 2003, ce qui est aussi quasiment le cas pour le sol sous peuplement de feuillu. En revanche, la réserve en eau reste largement déficitaire en fin d'année sous peuplement de résineux.

6

Quelle approche pour modéliser la variation de teneur en eau et de volume du sol ?

L'approche la plus rigoureuse consiste à simuler de façon mécaniste à la fois le déplacement de l'eau et celui de la phase solide du sol (Angulo *et al.*, 1990a ; Garnier *et al.*, 1997). Deux options sont alors possibles. La première possibilité, qualifiée de 'méthode eulérienne' consiste à décrire le déplacement de l'eau et du solide par rapport à un repère géométrique cartésien (généralement, l'observateur). L'équation de transport de l'eau est alors nettement plus complexe que dans le cas des sols rigides. La seconde possibilité, appelée 'méthode lagrangienne' consiste à décrire le déplacement de l'eau non plus par rapport à un repère géométrique fixe, mais par rapport à la phase solide du sol (le repère va donc bouger par rapport à l'observateur). On utilise alors des coordonnées dites 'matérielles' à la place des coordonnées spatiales cartésiennes classiques (Smiles et Rosenthal, 1968). L'avantage de cette méthode est que l'équation de transport de l'eau est alors identique à celle utilisée pour les sols rigides (équation de Richards). Les deux méthodes ont été utilisées par Angulo *et al.* (1990b) pour décrire l'infiltration de l'eau dans une colonne de bentonite.

Une approche plus simple, mais moins rigoureuse, consiste à séparer la simulation du transport de l'eau de celle de la déformation du sol. Le transport de l'eau est alors simulé dans le sol considéré comme rigide. Les variations de teneur en eau du sol sont ensuite traduites en terme de déformation du sol à l'aide de la

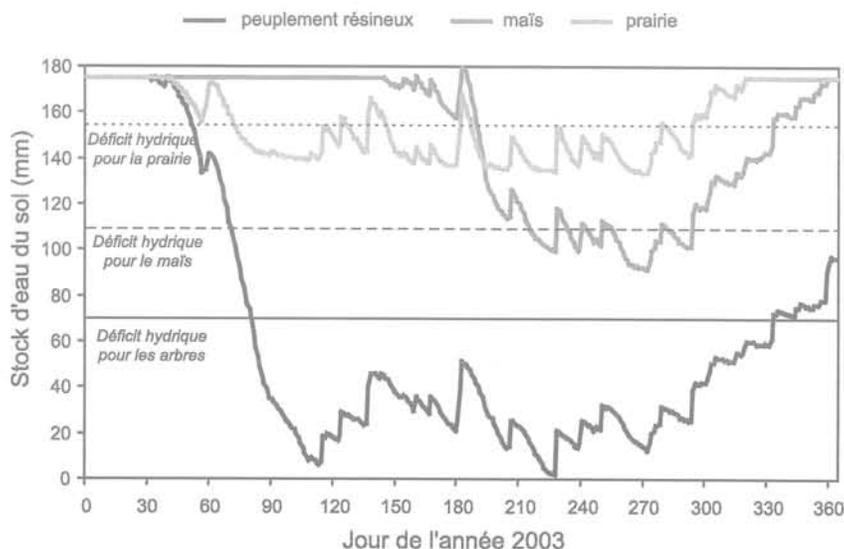


FIG. 7 Évolution simulée de la réserve en eau d'un sol à forte réserve (175 mm) au cours de l'année 2003 à Grignon, sous peuplement de résineux, sous culture de maïs et sous prairie. Modélisation SWAP (van Dam *et al.*, 1997), données climatiques INRA-Grignon.

courbe de retrait. L'application de cette méthode au cas présenté en figure 7 permet de calculer le profil de variation maximale de volume par rapport à l'état initial (sol à la capacité au champ). Ce profil (Fig. 8) est simplement calculé en utilisant les variations du profil de teneur en eau entre l'état initial et le maximum de dessèchement du sol simulé pour chacune des cultures et en les transformant en variation de volume à l'aide de la courbe de retrait du sol (Fig. 9). En supposant une déformation isotrope du sol, il est alors possible de calculer la variation d'altitude de la surface du sol correspondante : elle est de 8,5 cm sous peuplement de résineux, 4 cm sous culture de maïs et 2 cm sous prairie. De telles valeurs ont pu être effectivement mesurées dans la nature (Bozouk et Burn, 1960 ; Cabidoche et Ozier-Lafontaine, 1992 ; Arnold *et al.*, 2005).

Bien que cette méthode ne soit pas totalement exacte, elle est cependant d'une précision nettement suffisante pour la plupart des sols rencontrés, y compris les sols argileux (Garnier *et al.*, 1997). Cependant, pour ces sols, la déformation conduit le plus souvent à l'apparition de fissures qui modifient alors profondément le fonctionnement hydrodynamique du sol. Celles-ci peuvent en effet conduire l'eau qui ne s'infiltrait pas à la surface du sol vers la profondeur, de façon très efficace. Le modèle SWAP (van Dam *et al.* 1997) permet de prendre en compte ce processus, en affectant une partie de la variation de volume du sol due au retrait à la création de fissures. L'eau en excès par rapport à la capacité d'infiltration de la surface du sol est alors directement envoyée dans les fissures (Fig. 10). Ce type de transport rapide de l'eau vers la profondeur a pu être mis en évidence dans le cas de sols argileux déformables (Coulomb *et al.*, 1993 ; Arnold *et al.*, 2005).

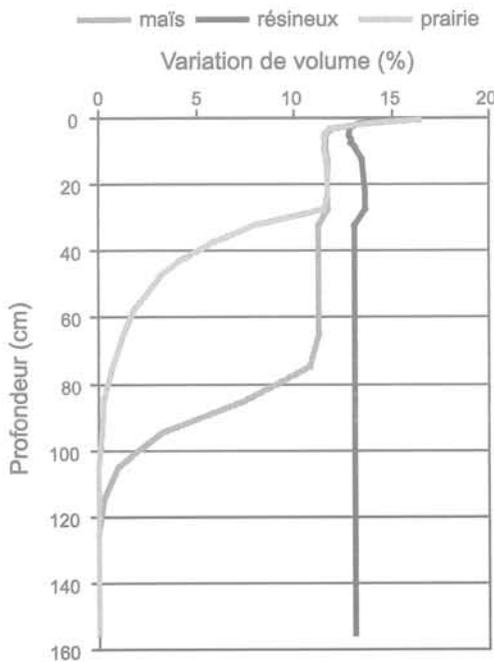


FIG. 8 Profil de variation de volume du sol (en % du volume initial) entre l'état initial (capacité au champ) et l'état de dessèchement maximal (le 16 août pour le peuplement de résineux, le 13 août pour la culture de maïs, le 29 septembre pour la prairie). La variation de volume est calculée à partir de la courbe de retrait du sol (Fig. 9).

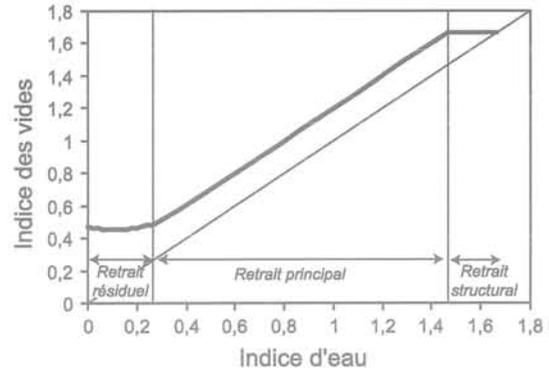


FIG. 9 Exemple de courbe de retrait d'un sol argileux. L'indice des vides correspond au volume de la porosité du sol rapporté au volume de sa phase solide. L'indice d'eau correspond au volume d'eau rapporté au volume de la phase solide du sol. Le modèle de Kim *et al.* (1992) est utilisé pour décrire la courbe.

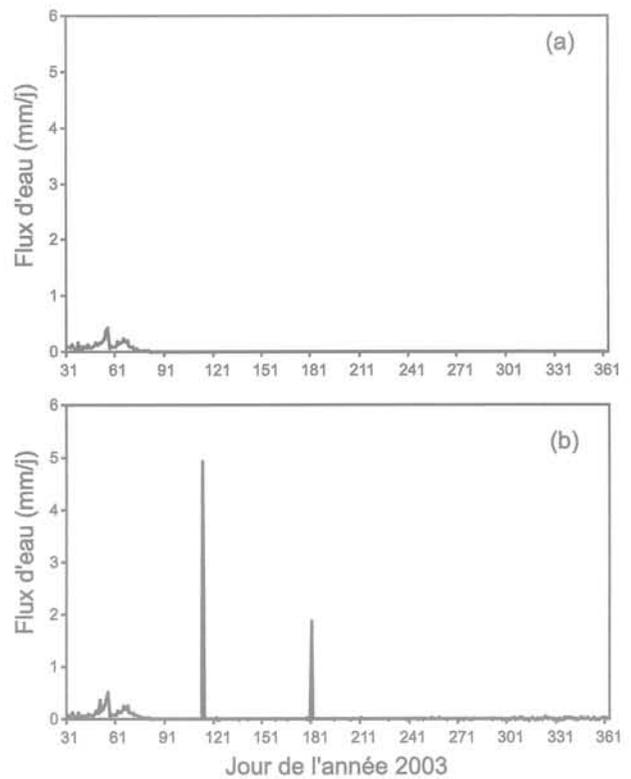


FIG. 10 Flux d'eau (en mm/j) à la base du profil de sol (à 160 cm de profondeur), sous peuplement de résineux, sans prendre en compte la fissuration du sol (a), avec la prise en compte de la fissuration et des flux d'eau dans les fissures (b). Les fortes intensités de pluie conduisent à des flux importants d'eau à la base du sol lorsque les fissures créées par le retrait du sol sont prises en compte. Modélisation SWAP (van Dam *et al.*, 1997), données climatiques INRA-Grignon.

7

Conclusion – discussion

La modélisation permet de traduire l'influence de la végétation sur le phénomène de retrait/gonflement des sols de manière quantitative. A ce titre, elle constitue un outil potentiellement intéressant pour la prévision

des risques géotechniques liés aux aléas climatiques de type sécheresse. Il existe toutefois un certain nombre de limitations qu'un travail de recherche et de développement devrait pouvoir lever à l'avenir.

L'architecture racinaire des arbres et arbustes utilisés à des fins ornementales ou paysagères, et surtout sa traduction en terme d'efficacité hydraulique effective, c'est-à-dire l'architecture des racines qui puisent l'eau du sol de manière effective, sont encore mal connues. Cette architecture n'est pas seulement déterminée par le type d'arbre, mais aussi par les contraintes pédologiques auxquelles il est soumis (i.e. présence d'un horizon de sol tassé ou engorgé en permanence). L'existence d'une information précise sur la répartition des racines et leur fonctionnement hydrique est essentielle pour une prévision fiable des variations de teneur en eau du sol, et donc de ses déformations.

La sensibilité des sols au retrait/gonflement est délicate à évaluer. Elle implique la connaissance des types minéralogiques des argiles pouvant être présentes dans le sol. L'information sur les sols ne doit donc pas seulement comprendre des données permettant de prévoir les propriétés hydriques du sol. Elle doit

aussi inclure des informations permettant de prédire sa sensibilité au retrait/gonflement. Des fonctions de pédotransfert permettant cette prédiction mériteraient d'être développées et testées à l'avenir.

Il faut souligner enfin qu'il n'existe pas à l'heure actuelle de modèle réalisant le couplage complet entre les fonctionnements mécanique et hydrique du sol et le fonctionnement hydrique de la végétation. Un tel modèle semble indispensable au développement des recherches sur la prévision du retrait/gonflement des sols. Ce modèle devrait permettre la description de problèmes tridimensionnels, tels qu'on peut les rencontrer en géotechnique (ex. arbres isolés au voisinage d'un bâtiment). La mise au point d'un tel modèle réclame un travail réellement pluridisciplinaire entre géotechniciens, pédologues et forestiers. Ce travail en collaboration devrait permettre d'élaborer de nouvelles normes, par exemple sur l'implantation de végétaux au voisinage de structures, plus efficaces dans la prévention des sinistres. Il importe donc de sensibiliser dès à présent la communauté des géotechniciens à l'importance d'une bonne connaissance du fonctionnement du continuum sol-plante-atmosphère pour la prévision du retrait/gonflement des sols.

Bibliographie

- Angulo R., Gaudet J.-P., Thony J.-L., Vauclin M. - *Conductivité hydraulique d'un milieu poreux partiellement saturé déformable*. I. Principes de détermination. Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, série 2, 310, 1990a, p. 161-164.
- Angulo R., Gaudet J.-P., Thony J.-L. - *Conductivité hydraulique d'un milieu poreux partiellement saturé déformable*. II. Résultats expérimentaux. Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris, série 2, 310, 1990b, p. 341-345.
- Arnold J.G., Potter K.N., King K.W., Allen P.M. - Estimation of soil cracking and the effect on surface runoff in a Texas Blackland Prairie watershed. *Hydrol. Process.*, 19, 2005, p. 589-603.
- Bastet G., Bruand A., Quentin P., Cousin I. - Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à l'aide de fonctions de pédotransfert (FPT) : une analyse bibliographique. *Étude et Gestion des Sols*, 5, 1, 1998, p. 7-28.
- Blanchart E., Achouak W., Albrecht A., Barakat M., Bellier G., Cabidoche Y.M., Hartmann C., Heulin T., Larré-Larrouy C., Laurent J.Y., Mahieu M., Thomas F., Villemain G., Watteau F. - Déterminants biologiques de l'agrégation dans les vertisols des Petites Antilles. Conséquences sur l'érodibilité. *Étude et Gestion des Sols*, 7, 2000, p. 309-328.
- Bozozuk M., Burn K.N. - Vertical ground movements near elm trees. *Geotechnique*, 10, 1960, p. 19-32.
- Braudeau E. - *Essai de caractérisation quantitative de l'état structural d'un sol basé sur l'étude de la courbe de retrait*. C. R. Acad. Sci. II, 307, 19, 1998, p. 1933-1936.
- Bréda N. - L'indice foliaire des couverts forestiers : mesure, variabilité et rôle fonctionnel. *Revue forestière française*, n° LI, 1999, p. 135-150.
- Bréda N., Granier A., Aussenac G. - Évolutions possibles des contraintes climatiques et conséquences pour la croissance des arbres. *Revue forestière française*, n° LII, 2000, p. 73-90.
- Bréda N., Granier A., Aussenac G. - La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiological et influence sur les arbres forestiers. *Revue forestière française*, n° LVI, 2, 2004, p. 109-131.
- Bréda N., Granier A., Barataud F., Moyne C. - Soil water dynamics in an oak stand. Part I. Soil moisture, water potentials and root water uptake. *Plant and Soil*, n° 172, 1995, p. 17-27.
- Bréda N., Granier A., Huc R., Dreyer, E. - Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Sciences*, vol. 63, n° 6, 2006, p. 625-644.
- Bréda N., Lefèvre Y., Badeau V. - Réservoir en eau des sols forestiers tempérés : spécificité et difficultés d'évaluation. *La Houille Blanche*, n° 3, Forêts et Eau, 2002, p. 25-40.
- Bruand A., Duval O., Cousin I. - Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à partir de la base de données SOL-HYDRO : une première proposition combinant le type d'horizon, sa texture et sa densité apparente. *Étude et Gestion des Sols*, 11, 3, 2004, p. 323-332.
- Bruand A., P. Pérez Fernández, O. Duval - Use of class pedotransfer functions based on texture and bulk density of clods to generate water retention curves. *Soil Use and Management* 19 (3), 2003, p. 232-242.
- Cabidoche Y.M., Ozier-Lafontaine H. 1992. Gestion agricole de l'eau à la parcelle et systèmes de culture irrigués dans la zone caraïbe. *Usage agricole de l'eau. Sixièmes journées hydrologiques de l'ORSTOM*, Montpellier, 12-13 sept. 1990. P. Carré éd., ORSTOM, coll. « Colloques et Séminaires », 1992, p. 15-31.
- Coulomb C., Vachier P., Dever L. - *Utilisation de l'oxygène 18 comme traceur in situ de l'infiltration : cas d'un sol argileux drainé*. C.R. Acad. Sci., 317, série II, 1993, p. 49-55.
- Cresswell HP, Coquet Y, Bruand A., McKenzie NJ - The transferability of Australian pedotransfer functions for predicting water retention characteristics of French soils. *Soil Use and Management* 22:1, 2006, p. 62-70.
- Garnier P., Perrier E., Angulo-Jaramillo R., Baveye P. - Numerical model of 3-dimensional anisotropic deformation and 1-dimensional water flow in swelling soils. *Soil Science*, 162 (6), 1997, p. 410-420.
- Granier A. - *Évapotranspiration des forêts*. Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France, 82, 1996, p. 119-132.

- Granier A., Bréda N., Biron P., Villette S. - A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling*, 116, 1999, p. 269-283.
- Granier A., Badeau V., Bréda N. - Modélisation du bilan hydrique des peuplements forestiers. *Revue forestière française*, n° XLVII, 1996, p. 59-68.
- Kim D.J., Vereecken H., Feyen J., Boels D., Bronswijk J.J.B. - On the characterization of properties of an unripe marine clay soil. 1. Shrinkage processes of an unripe clay soil in relation to physical ripening. *Soil Science*, 153 (6), 1992, p. 471-481.
- Smiles D.E., Rosenthal M.J. - The movement of water in swelling materials. *Australian Journal of Soil Research* 6, 1968, p. 237-248.
- Tessier D., Bruand A., Lebissonais Y., Dambrine E. - Qualité chimique et physique des sols: Variabilité spatiale et évolution. *Étude et Gestion des Sols*, 3, 4, 1996, p. 229-244.
- van Dam J.C., Huygen J., Wesseling J.G., Feddes R.A., Kabat P., van Walsum P.E.V., Groenendijk P., van Diepen C.A. - Theory of SWAP version 2.0. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil-Water-Atmosphere-Plant environment. Report 71, Department Water Resources, Wageningen Agricultural University, Technical Document 45, DLO Winand Staring Centre, Wageningen, 1997.

Suivi expérimental des profils hydriques et des déplacements verticaux dans des sols argileux sujets au phénomène de retrait-gonflement

**M. VINCENT,
S. LE ROY**

BRGM
Service Aménagement
et Risques naturels /
Risques mouvement
de terrain
117, avenue de Luminy,
BP 167
13276 Marseille
m.vincent@brgm.fr ;
s.leroy@brgm.fr

**I. DUBUS,
N. SURDYK**

BRGM
Service Eau/Modélisation
hydrogéologique
et hydrogéochimique
3, ave Claude-Guillemin,
BP 6009
45060 Orleans cedex 2
i.dubus@brgm.fr ;
n.surdyk@brgm.fr

Résumé

Les nombreux sinistres survenus en 2003 et attribués au retrait-gonflement des argiles ont mis en évidence les difficultés à caractériser clairement les périodes de sécheresse exceptionnelle à l'origine de ces désordres. Ce constat a motivé le lancement de plusieurs projets de recherche appliquée, auxquels participe activement le BRGM, et qui visent à identifier plus précisément les mécanismes de déclenchement de ce phénomène naturel. Dans ce cadre ont été instrumentés, à la demande du ministère en charge de l'environnement, deux sites expérimentaux, l'un à Mormoiron (Vaucluse) depuis décembre 2004, l'autre près de Poitiers (Vienne) depuis fin 2005. Sur chacun de ces sites ont été implantés en forage des capteurs capacitifs (de type Humitub) pour le suivi à différentes profondeurs et en continu des variations d'humidité du sol, ainsi que des extensomètres pour enregistrer les mouvements verticaux du sol jusqu'à 1,5 m de profondeur. Les premiers résultats confirment que des variations saisonnières importantes de teneur en eau se produisent dans les premiers mètres de sol, en corrélation étroite avec les conditions météorologiques, et que des mouvements rapides de gonflement et de tassement sont observés près de la surface, avec des amplitudes pouvant atteindre 2 cm en quelques mois. Des modélisations numériques effectuées avec l'aide du logiciel MACRO, qui intègre les écoulements préférentiels caractéristiques des sols argileux, permettent de simuler, à partir des données météorologiques depuis 1964, les variations de teneur en eau sur les deux sites et pour différents types de couverts végétaux, ce qui met en évidence les déficits hydriques cumulés observés lors des principales périodes à l'origine de sinistres par retrait-gonflement.

Mots-clés : sol argileux, teneur en eau, retrait-gonflement, argile, sécheresse, profil hydrique, suivi in situ, Humitub, modélisation, écoulements préférentiels

Experimental monitoring of water content and vertical displacements in clayey soils exposed to shrinking and swelling

Abstract

During the year 2003, numerous damages due to swelling and shrinkage of clayey soils occurred in France. They have demonstrated the difficulties to characterize exceptionally drought periods. In order to identify the triggering mechanism of this natural phenomenon, several applied research subjects have been initiated in which the BRGM is actively involved.

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 30 avril 2008.

On the initiative of environment department, one of these consists in monitoring soil moisture variations and ground movements by the instrumentation of two experimental sites, one in Mormoiron (France, Vaucluse) since December 2004 and the other in Poitiers (France, Vienne) since the end of 2005. On each site, capacitive sensors inside drilling (Humitub) have been installed to track soil moisture variations continuously and at different depths and also extensometers to monitor soil vertical displacements until 1.5 meter depth. The first results have confirmed that the seasonal soil moisture variability in the first meters is correlated with the weather conditions and have shown that swelling and settlement ground movements which occur near the surface can reach 2 centimeters in only a few months. Then, numerical modelings have been conducted with the software MACRO which takes into account clayey soils preferential flows. MACRO has been used to simulate soil moisture variations from weather conditions since 1964 for each site and with different vegetational cover. These simulations have highlighted the period of water lack observed during principal drought and characterized by numerous damages.

Key words: clayey soil, water content, swelling and shrinkage, clay, drought, monitoring, Humitub, modelling, preferential flow

1

Introduction

Le retrait-gonflement d'un sol argileux est un phénomène naturel qui se traduit par des mouvements verticaux différentiels sous l'effet des variations de teneurs en eau dans le sol. Ces mouvements génèrent des contraintes relativement élevées dans les structures, en particulier dans les fondations de maisons individuelles, généralement peu rigides, ce qui occasionne des fissurations, parfois très préjudiciables et souvent coûteuses à réparer.

L'ampleur du phénomène est d'autant plus importante que le sol est riche en minéraux argileux de type smectites et qu'il est soumis à de fortes variations hydriques sous l'effet de facteurs climatiques. Mais de nombreux paramètres très localisés tels que certaines actions anthropiques (terrassements, drainages, fuites de canalisations enterrées, etc.) et surtout l'assèchement du sol par les racines d'arbres conditionnent largement son déclenchement.

Il est donc particulièrement difficile de caractériser régionalement les conditions de déclenchement du phénomène. Dans le cadre du régime d'assurance institué en 1982, la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle « sécheresse » repose depuis 2000 sur le modèle de réserve hydrique développé par Météo France : ce modèle à deux réservoirs utilise les données de précipitations et d'évapotranspiration relevées auprès d'une centaine de stations météorologiques, les résultats étant analysés avec un pas de temps décennal. Le critère retenu, qui consiste à vérifier l'existence de quatre trimestres secs consécutifs avec au moins une décade hivernale particulièrement sèche, permet de prendre en compte les sécheresses correspondant à un déficit hydrique prolongé. Il s'est cependant révélé insuffisant en 2003 pour traduire les effets de la sécheresse liée à la canicule (sécheresse brève et intense faisant suite à un hiver très humide). C'est pourquoi les pouvoirs publics souhaitent désormais améliorer la connaissance du phénomène de retrait-gonflement afin de redéfinir, sur des bases plus objectives, ce critère de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle « sécheresse ».

Dans ce cadre, le BRGM (service géologique national) a engagé plusieurs programmes de recherche, cofinancés en particulier par le ministère de l'Écologie et du Développement durable¹ (MEDD), le Réseau génie civil et urbain² (RGC&U) et l'Agence nationale de la recherche³ (ANR). L'objectif de ces programmes de recherche est d'approfondir la compréhension des mécanismes de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement des argiles afin de préciser les critères de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle. La démarche adoptée consiste notamment à étudier les variations hydriques et les mouvements verticaux mesurés *in situ* dans des sols argileux afin de caractériser les paramètres (sols, climat, végétation) qui influent sur le déclenchement du phénomène, ceci afin de caler des modèles numériques qui permettront ensuite, moyennant des études paramétriques, d'extrapoler les résultats dans différentes configurations types.

Le présent article illustre les résultats préliminaires acquis dans le cadre de ces programmes de recherche qui se poursuivent actuellement. Il fait état de quelques résultats significatifs sur le déclenchement et les manifestations du retrait-gonflement, résultant d'observations antérieures réalisées *in situ* et déjà publiées. Il explique comment ont été choisis et instrumentés les deux sites de mesure d'ores et déjà équipés et qui font l'objet d'un suivi en continu afin d'acquérir des données expérimentales. Enfin, il présente les premiers résultats enregistrés à ce jour sur ces sites et des modélisations effectuées à l'aide d'un logiciel utilisé habituellement pour évaluer l'infiltration des solutés dans des sols agricoles.

¹ Programme co-financé par le ministère de l'Environnement, dont une première phase réalisée en 2004-2006 a permis notamment l'équipement en capteurs capacitifs de deux sites expérimentaux.

² Projet de recherche cofinancé par le programme RGC&U, réalisé en 2005-2006 en collaboration avec le LMSSMat (École centrale de Paris), le LAEGO (Institut national polytechnique de Lorraine), le CSTB (Centre scientifique et technique du bâtiment) et le bureau d'études géotechniques CEBTP-Solen.

³ Programme ARGIC, cofinancé par le programme ANR-RGC&U, débuté en 2006 pour trois ans et réalisé en collaboration avec le LCPC, l'INRA, Météo France, le LMSSMat, le LAEGO, le CERMES, Armines, Insavalor, le CDGA, l'INERIS, HydrASA et Fondasol.

Expérimentations *in situ* : état des connaissances

Plusieurs expériences *in situ* de suivi du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux ont été conduites en Angleterre depuis les années 1970. Ainsi, Driscoll (1983) cite des mesures de tassement vertical sous l'effet de variations hydriques sur des argiles anglaises allant de 4,1 à 5,8 cm et des gonflements atteignant 3,5 cm lors de l'hiver 1976. Il insiste en particulier sur les mouvements de sols argileux consécutifs à des abattages d'arbres, faisant notamment état d'un soulèvement d'une amplitude totale de 10 cm dans l'Argile de Londres qui s'est poursuivi pendant une vingtaine d'année suite à l'arrachage de gros ormes dont les racines avaient asséché le sol jusqu'à 5 m de profondeur.

Une étude statistique (Cutler et Richardson, 1981) portant sur les espèces et les dimensions des arbres situés à proximité de sinistres attribués au retrait-gonflement des sols argileux a permis d'estimer que le rayon d'influence de la plupart des espèces arborées rencontrées dans les jardins anglais était de l'ordre de 1 à 1,5 fois la hauteur de l'arbre, allant jusqu'à 2,5 fois cette hauteur dans le cas du saule par exemple.

Biddle (1983) a également cherché à préciser l'influence des arbres sur la dessiccation des sols en procédant à des mesures régulières, par sonde à neutrons, à diverses profondeurs et distances de plusieurs espèces d'arbres plantés dans différents types de sols, ce qui permet de visualiser l'influence des arbres sur les profils d'humidité. Ces observations mettent notamment en évidence l'influence prépondérante des peupliers sur la dessiccation du sol, autant en profondeur (jusqu'à 3,50 m) qu'en distance horizontale (rayon d'influence sensiblement égal à la hauteur de l'arbre). Sous une couverture herbeuse, les mesures indiquent que la dessiccation estivale ne pénètre pas au-delà de 1 m de profondeur, même dans des sols relativement perméables de type *Boulder clay*; en revanche, à proximité d'un peuplier (Fig. 1), on observe une dessiccation permanente du sol jusqu'à une profondeur de 2,90 m, ce qui explique le gonflement observé lors du retour à l'équilibre hydrique après suppression d'un arbre.

Le fait que la tranche de sol affectée par la dessiccation saisonnière soit relativement superficielle en l'absence d'arbre a été notamment confirmée par des observations effectuées en Israël par Ravina (1983) qui, sur la base de cinq années consécutives de mesures de profils hydriques par sonde à neutrons dans un sol argileux, note des teneurs en eau moyennes comprises entre 10 et 30 % en automne dans le premier mètre de sol alors qu'elles atteignent une valeur de l'ordre de 50 % au printemps, mais constate que ces différences saisonnières ne sont plus significatives au delà d'une profondeur de 1,50 m. Ce même auteur cite par ailleurs les travaux de Yallon et Kalmar, qui se sont intéressés aux déplacements verticaux dans des sols argileux très plastiques en Israël (*grumusolic soil*) en surface et en profondeur. Un gonflement de 5,4 cm a été enregistré en surface, tandis qu'à 0,5 et 1 m de profondeur, les gonflements respectifs sont de 1,8 et 1,5 cm. Pendant la période de progression du front de dessiccation, le tassement moyen a été de 0,3 mm par jour.

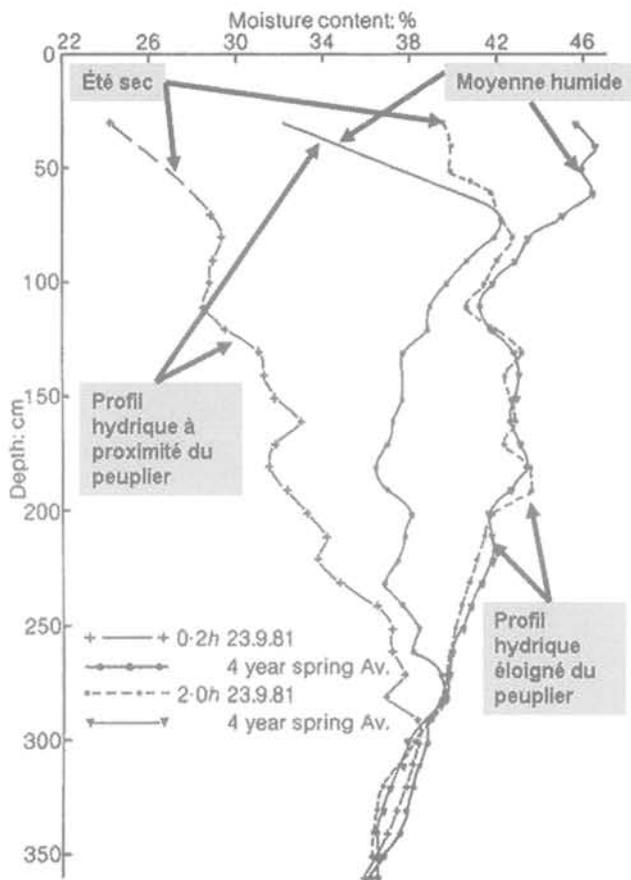


FIG. 1 Profils hydriques mesurés dans un sol type Boulder clay en fin d'été et au printemps à différentes distances d'un peuplier (Biddle, 1983).

Soil moisture profiles measured at the end of summer and in spring, at various distances of a poplar tree on boulder clay (Biddle, 1983).

La plantation d'arbres à proximité d'un bâtiment se traduit par un dessèchement progressif du sol à proximité et éventuellement par des tassements de nature à engendrer des désordres sur le bâti. Ces phénomènes ont notamment été décrits en Australie par Richards et al. (1983), à partir de l'exemple du musée national d'art d'Adélaïde, construit à la fin des années 1890 et fissuré en 1969, suite à la plantation d'arbres le long de sa façade, quelques années plus tôt. Des mesures de succion ont montré que l'influence des arbres sur la dessiccation des sols est sensible jusqu'à plus de 3 m de profondeur et se traduit par des tassements supérieurs à 3 cm alors que ces mouvements ne dépassent pas 1 cm loin des arbres. L'abattage des arbres, effectué en 1971, a provoqué un gonflement dont l'amplitude, cumulée sur 5 ans, a atteint localement 5 cm. D'autres expérimentations menées *in situ* par les mêmes auteurs à Adélaïde, dans des terrains argileux du Pléistocène, ont mis en évidence des suctions très élevées en valeur absolue (jusqu'à 3,5 MPa) à proximité d'un groupe d'eucalyptus de grande taille (> 17 m), jusqu'à au moins 8 m de profondeur. Dans les horizons les plus superficiels (premier mètre de sol), cette influence est significative jusqu'à une distance de l'ordre de 20 m des arbres.

En Afrique du Sud, dans des sols particulièrement riches en montmorillonite et avec un climat très contrasté, Williams et Pidgeon (1983) citent le cas d'un tassement de 20 cm à l'origine d'un sinistre sur une

maison individuelle située à 5 m seulement d'un eucalyptus. Ils indiquent aussi avoir évalué à 37,4 cm le soulèvement consécutif à l'abattage d'un arbre à Kimberley.

Le comportement des arbres face à la sécheresse a montré que l'évapotranspiration des arbres diminuait rapidement lorsque la quantité d'eau extractible descendait en dessous d'un certain seuil, ce qui correspond à un « stress hydrique » (Bréda *et al.*, 1992). Une étude de la répartition racinaire réalisée par Bréda *et al.* (1995) a montré que la majeure partie des racines d'un chêne (dont les plus grosses qui servent à l'ancrage mécanique de l'arbre) est située en surface, mais que certaines racines fines (celles qui participent effectivement au puisage d'eau dans le sol et dont la croissance peut être très rapide) pouvaient descendre plus profondément. La dessiccation générée par l'arbre commence par les horizons les plus superficiels avant de se propager plus en profondeur, au fur et à mesure que le sol s'assèche en surface. L'analyse de la sécheresse 2003 (Bréda *et al.*, 2004) a montré que les comportements de différentes espèces d'arbres varient face à la sécheresse, certaines d'entre elles étant capables de processus d'adaptation, soit en allant rechercher l'eau plus profondément par le développement de leurs racines, soit en adaptant leur fonctionnement physiologique à des succions plus élevées, soit en limitant leur consommation d'eau (contrôle stomatique notamment), autant de stratégies différentes qui se traduisent par des conséquences très diverses sur l'état de dessiccation du sol en période sèche. En particulier, du fait de leur feuillage persistant, les résineux favorisent la dessiccation du sol en interceptant une part supérieure des précipitations et en allongeant la durée annuelle de transpiration, ce qui les rend *de facto* plus vulnérables aux périodes de sécheresse prolongée.

3

Méthodologie : mesures d'humidité *in situ*

Plusieurs méthodes de suivi de l'humidité dans les sols sont classiquement utilisées et ont été envisagées pour le suivi *in situ* des teneurs en eau :

- mesure gravimétrique (pesée d'échantillons intacts, avant et après séchage) : méthode habituellement utilisée en laboratoire mais peu adaptée à un suivi *in situ* car destructive (suppose des prélèvements périodiques qui par ailleurs perturbent l'état du site) ;

- mesure de la résistivité électrique du sol, cette dernière étant fonction de l'humidité, de la lithologie, de la concentration en sels... Bien que facile d'utilisation, non destructive et peu coûteuse, cette méthode a été jugée mal adaptée à la problématique, d'une part parce que le dispositif permet difficilement l'automatisation de l'acquisition des mesures et, d'autre part, parce que l'interprétation des mesures brutes dépend fortement de la texture du sol ;

- mesure par sonde à neutrons, utilisant une source radioactive d'émission de neutrons à haute énergie, qui subissent une perte d'énergie cinétique en rencontrant les noyaux d'hydrogène présents dans l'eau du sol : le décompte des noyaux lents revenant à la source permet ainsi de caractériser l'humidité du sol. Bien que précise, non destructive et rapide, cette méthode se révèle trop contraignante pour une utilisation continue

(éléments radioactifs, calibrage, interventions nécessaires sur site, etc.) ;

- mesure par gammamétrie, basée sur l'utilisation d'une source de rayons gamma et d'un détecteur permettant la mesure de l'absorption des rayons, fonction de la nature de la source, de la densité du matériau et de la géométrie du système : lorsque la densité est constante, seule la teneur en eau influe sur les mesures. Cette méthode de mesure, également non destructive, se révèle délicate à mettre en œuvre *in situ*, et elle est plutôt utilisée en laboratoire, lorsque tous les paramètres peuvent être contrôlés ;

- mesures par sondes TDR (réflectométrie en domaine temporel), consistant à émettre une impulsion électromagnétique le long de 2 ou 3 guides d'ondes enfoncés dans le sol, grâce à un courant alternatif de fréquence de l'ordre du GHz, puis à mesurer l'amplitude et le délai des réflexions afin de caractériser la permittivité électrique du milieu, elle-même fonction de la teneur en eau. Cette méthode, non destructive et facilement automatisable, permet des mesures précises pour les teneurs en eau courantes, tout en restant relativement indépendante de la salinité et de la texture du sol. Les capteurs TDR s'avèrent cependant délicats à implanter en sondage, et ne permettent pas l'obtention directe de profils hydriques sur une même verticale ;

- mesures par sondes capacitatives fondées, comme les sondes TDR, sur la caractérisation de la permittivité du sol : le principe consiste à réaliser un condensateur entre deux électrodes, puis à lui appliquer un champ électrique sinusoïdal afin de déterminer la fréquence de résonance du système pour déterminer la permittivité du sol, moyennant un étalonnage préalable du capteur. Assez similaires aux capteurs TDR, les capteurs capacitifs offrent de plus, par leur géométrie plus libre, la possibilité d'une implantation en sondage avec plusieurs capteurs sur une même canne afin de mesurer des profils hydriques. C'est donc cette méthode de mesure, non destructive et facilement automatisable, qui a été retenue pour l'équipement des sites expérimentaux.

Des capteurs capacitifs développés par l'INRA à des fins agronomiques, et commercialisés sous le nom d'Humicap avaient été utilisés par le BRGM à Boulcen-Diois, dans la Drôme (Leroi, 1995). Ces capteurs se sont cependant révélés fragiles et peu adaptés à une mise en place en forage. Le BRGM a donc développé, en 1994-1995 un matériel plus spécifiquement adapté à ses besoins, sous le nom d'Humilog, en collaboration avec Antea et Iris Instruments. Équipés d'une électrode annulaire et d'une électrode conique, à l'extrémité d'une canne implantable en forage pour une longue durée, ces capteurs contrôlés par une carte électronique peuvent être reliés, via un multiplexeur, à une centrale d'acquisition de type Osiris, laquelle pilote l'acquisition des mesures de permittivité et de température à des pas de temps variables. Afin de permettre les mesures quasi-simultanées sur un même profil vertical, de nouveaux capteurs ont été développés en 1998 : les électrodes sont devenues annulaires afin de pouvoir équiper plusieurs capteurs sur une même canne. Ce système a fait l'objet en mai 2001 d'un dépôt de brevet du BRGM sous le nom d'Humitub. Ce système a ensuite été utilisé à plusieurs reprises par le BRGM pour des suivis de mouvements de terrain. Ce sont ces capteurs qui ont été retenus pour l'étude du front de dessiccation dans les argiles (Fig. 2).

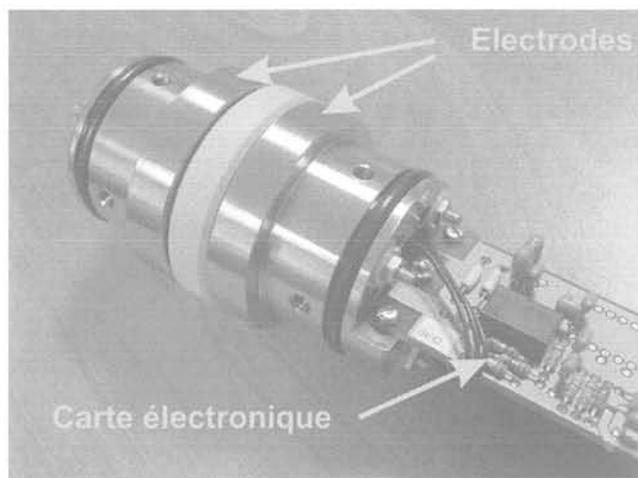


FIG. 2 Capteur Humitub.
Humitub capacitive sensor.

Pour des raisons pratiques, la géométrie des cannes Humitub a été légèrement modifiée : le diamètre a été augmenté de 43 mm à 50 mm afin de faciliter la mise en place en forage ; l'écartement entre les électrodes, initialement fixé à 10 mm, a été augmenté à 11,8 mm sur l'un des deux sites afin de compenser le décalage de l'échelle de mesures induit par l'augmentation de la surface de contact entre les électrodes et le sol. Il est cependant apparu à l'usage que ces modifications de géométrie ont généré dans la réponse du capteur, dont la gamme est comprise entre 4 et 20 mA en raison de l'électronique utilisée, un offset qui tend à réduire la gamme de mesures exploitable. Les essais d'étalonnage des capteurs ont ainsi montré que les mesures sont impossibles dans l'eau pure (permittivité relative de 80) car la réponse théorique du capteur se situe alors au delà de 20 mA, ce qui se traduit par des variations apparemment erratiques de la mesure entre 4 et 20 mA. Cependant, les essais réalisés en laboratoire montrent que ce phénomène de saturation du capteur n'intervient que pour des teneurs en eau volumiques dans les sols de l'ordre de 50 %, ce qui limite le désagrément en résultant. Une autre difficulté liée aux mesures *in situ* avec ce type de configuration provient de la nature même du phénomène de retrait-gonflement : en période estivale, le retrait induit par la dessiccation du sol argileux peut occasionner une perte de contact entre les électrodes et le sol environnant, ce qui se traduit par une brusque chute de la permittivité mesurée.

4

Les sites expérimentaux de Mormoiron et du Deffend

L'objectif de l'étude nécessite de travailler dans plusieurs environnements afin d'identifier la part respective des paramètres susceptibles d'influencer le déclenchement du retrait-gonflement. Il a donc été décidé de travailler sur deux sites expérimentaux soumis à des influences climatiques différentes (l'un en climat méditerranéen, l'autre en climat océanique à semi-continentale) et de visualiser pour chacun l'effet de la végétation sur la propagation du front de dessiccation. Les sites ont été choisis selon plusieurs critères, parmi lesquels une lithologie relativement homogène avec des sols à dominante argileuse riches en smectites jusqu'à au

moins 8 m de profondeur et un nombre significatif de sinistres dans les environs immédiats. S'ajoutaient à ces critères un certain nombre de contraintes pratiques, telles que la proximité d'une station météorologique avec des chroniques disponibles sur une longue durée, l'absence de nappe temporaire dans les premiers mètres et une situation d'accès facile dans un site sécurisé et non inondable avec possibilité de conventionnement pour une utilisation pendant plusieurs années successives.

Les sites finalement retenus sont un terrain communal à Mormoiron (Vaucluse), près de Carpentras, et un terrain géré par l'université de Poitiers sur la commune de Mignaloux-Beauvoir (Vienne), près de Poitiers, au lieu-dit Le Deffend.

Le site de Mormoiron se situe sur la formation des *Sables et Argiles vertes à smectites de Mormoiron* (notés g1aS sur la carte géologique au 1/50 000, feuille de Carpentras, Blanc *et al.*, 1975), dont la partie inférieure est datée de l'Éocène terminal, la limite avec l'Oligocène inférieur passant au sein de la formation (Fig. 3). Le site a été reconnu en sondage jusqu'à 7 m, mais la puissance de la formation est de l'ordre de 80 à 100 m. Le cortège argileux des *sables et argiles vertes à smectites de Mormoiron* est constitué essentiellement de smectites aluminos-ferriques accompagnées d'attapulgite, issues probablement du remaniement du Bartonien sous-jacent (*calcaire de Jocas et argiles vertes à attapulgite de Mormoiron*). Quelques passées silteuses ont également été identifiées lors des sondages réalisés sur le site. Ces passées silteuses peuvent être le siège de circulations d'eau temporaires, tendant à freiner la dessiccation des couches argileuses sous-jacentes par remontées capillaires.



FIG. 3 Plan de situation de l'installation de Mormoiron (géologie extraite de la carte BRGM 1/50 000, feuille de Carpentras). Sketch map of experimental site in Mormoiron (from geological map of Carpentras at 1: 50,000, edited by BRGM).

Une première série d'essais de caractérisation du matériau a été réalisée à partir d'échantillons prélevés dans deux sondages carottés, réalisés en septembre 2004 : la masse volumique de la fraction solide (à 1,50 m de profondeur) est de 2,61 g/cm³, les mesures de granulométrie indiquent des passants à 2 µm compris entre 24 et 65 % dans les 4 premiers mètres, les teneurs en carbonates sont de l'ordre de 40 % et les valeurs de bleu de méthylène atteignent 12,9 g de bleu pour 100 g de matériau (à 2 m de profondeur). D'autres prélèvements effectués ultérieurement ont permis de caractériser une passée silteuse localisée dans laquelle le passant à 2 µm est inférieur à 5 % et la valeur de bleu de méthylène de l'ordre de 5 g de bleu pour 100 g de matériau.

Lors de la cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles sur le département de Vaucluse (Marçot *et al.*, 2004), cette formation des *sables et argiles vertes à smectites de Mormoiron* avait été classée en aléa fort, et 59 sinistres y avaient été recensés, soit une densité de sinistres dépassant 400 sinistres pour 1 km² d'affleurement urbanisé. De plus, lors de l'installation du site, une vingtaine de sinistres supplémentaires ont été identifiés sur la seule commune de Mormoiron, ainsi que des fissurations attribuées au retrait-gonflement sur une partie de la voirie départementale.

Ce site est soumis à un climat de type méditerranéen dont les caractéristiques ont été établies à partir des données fournies par Météo France sur la station de Carpentras (située à moins de 10 km à l'ouest de la parcelle, à une altitude de 99 m NGF contre 280 m NGF pour Mormoiron). La pluviométrie mensuelle moyenne sur Carpentras présente un maximum relatif en mai

(63 mm d'eau) et un maximum absolu en octobre (96 mm d'eau), le minimum se situant en juin (seulement 29 mm d'eau), mois au cours duquel l'évapotranspiration potentielle est maximale (près de 200 mm).

L'instrumentation installée en décembre 2004 sur le site de Mormoiron (Vincent *et al.*, 2006) se compose de deux cannes Humitub équipées chacune de 12 capteurs, espacés entre eux de 50 cm à 1 m, la première canne étant implantée à proximité d'un orme et la seconde en terrain dégagé (Fig. 4). L'ensemble de ces capteurs est relié via des multiplexeurs à une centrale d'acquisition et à un modem GSM permettant la télétransmission des mesures. Un pluviomètre équipe également le site et un panneau solaire fournit l'alimentation électrique nécessaire. Enfin, depuis le mois de décembre 2006, l'instrumentation a été complétée par 3 extensomètres afin de mesurer les déplacements verticaux près de la surface (0,2 m) et aux profondeurs de 0,5 et 1 m.

Les formations superficielles rencontrées sur le site du Deffend correspondent quant à elles au *complexe des Bornais*, constitué d'argiles limoneuses, de couleur grise à jaunâtre, parfois ocre à rouge (Mourier *et al.*, 1986). Ce complexe recouvre les *calcaires du Dogger*, dont le toit présente des ondulations telles que les niveaux calcaires affleurent en partie orientale du site, mais peuvent se trouver par endroit à 27 m de profondeur par rapport au terrain naturel. Des argiles de décalcification sont localement développées au toit du calcaire. De nombreux sondages réalisés antérieurement sur ce site dans le cadre d'un programme de suivi hydrogéologique, ainsi que des sondages complémentaires accompagnés d'essais de laboratoire ont permis

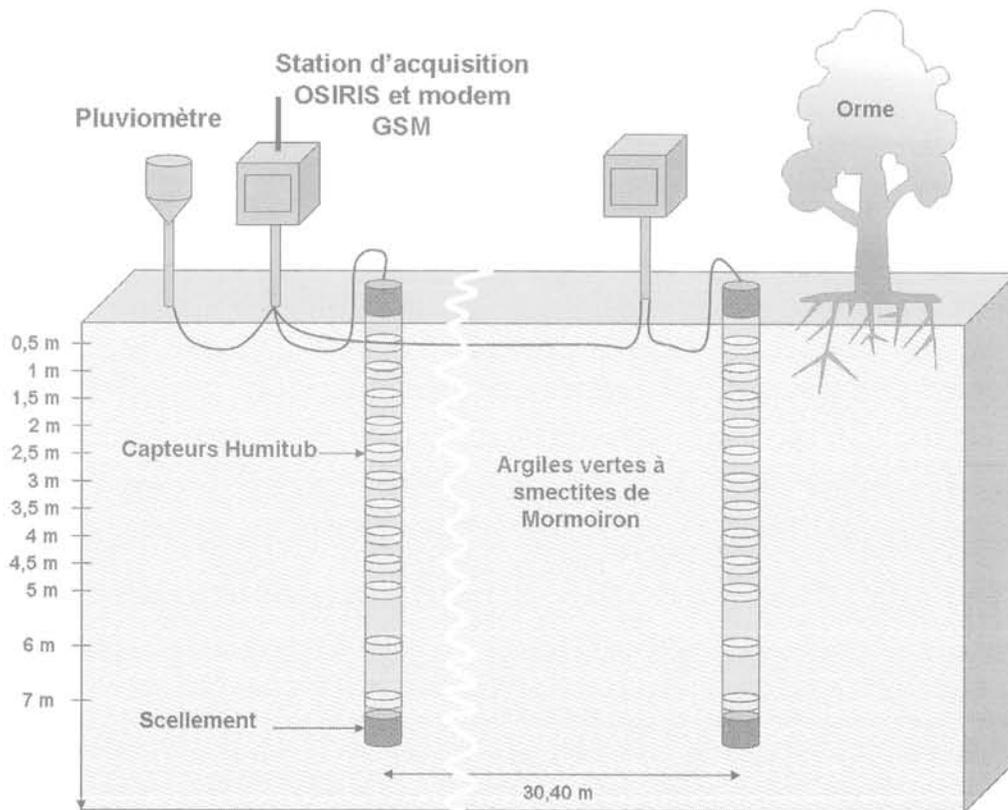


FIG. 4 Schéma d'installation des cannes Humitub implantées à Mormoiron. Configuration diagram of capacitive sensor (Humitub) implemented at Mormoiron site

de choisir le lieu le plus approprié pour l'instrumentation afin de garantir notamment une épaisseur suffisante du recouvrement superficiel (Fig. 5).

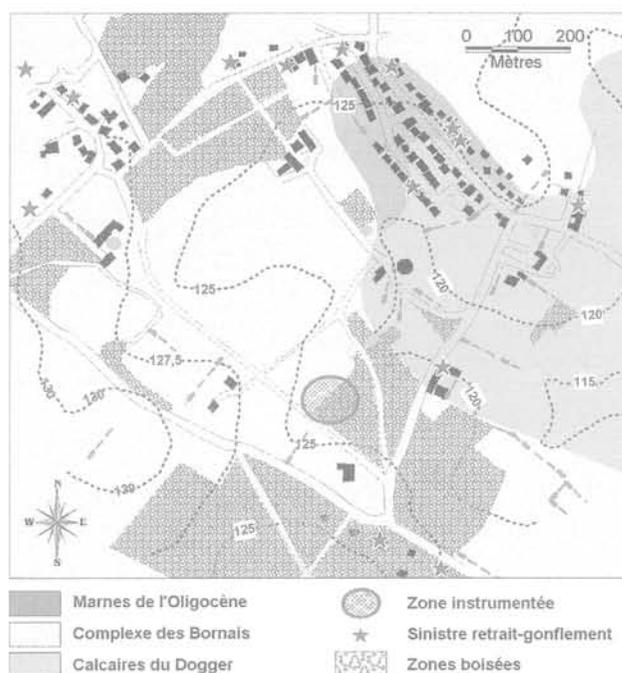


FIG. 5 Plan de situation de l'installation du Deffend (géologie extraite de la carte BRGM 1/50 000, feuille de Poitiers).

Sketch map of experimental site in Le Deffend (from geological map of Poitiers at 1: 50,000, edited by BRGM).

Deux sondages carottés réalisés en novembre-décembre 2005 ont permis de prélever des échantillons intacts qui ont fait l'objet, par le LAEGO (Laboratoire environnement, géomécanique et ouvrages, de l'Institut national polytechnique de Lorraine) de nombreuses analyses d'identification et de caractérisation hydromécanique. La masse volumique de la fraction solide atteint en moyenne $2,63 \text{ kg/m}^3$ pour les prélèvements réalisés en prairie et $2,66 \text{ kg/m}^3$ dans la zone boisée ; les valeurs de bleu de méthylène obtenues sont comprises entre 1 et 4 g de bleu pour 100 g de matériau sur les 3,5 premiers mètres à dominante limoneuse, puis entre 5 et 8 g de bleu pour 100 g de matériau au-delà, malgré quelques valeurs localement plus faibles en zone boisée.

La cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles sur le département de la Vienne (Renault *et al.*, 2002) avait permis de retenir le *complexe des Bornais* comme soumis à un aléa moyen, alors que les *calcaires du Dogger* étaient caractérisés par un aléa fort (lié aux recouvrements locaux par des argiles de décalcification). L'étude avait permis de recenser une cinquantaine de sinistres sur la commune de Mignaloux-Beauvoir, dont 28 dans un rayon de 1 km autour du site du Deffend. Cependant, au cours de l'été 2003, environ 600 sinistres ont été recensés sur les 10 communes de la Communauté d'Agglomérations de Poitiers, dont une bonne partie sur la commune de Mignaloux-Beauvoir, qui est donc particulièrement concernée par ce risque.

Les caractéristiques climatiques du site du Deffend sont de type océanique et sont connues grâce à la station installée par Météo France à Poitiers-Biard (située

à environ 8 km du site, dans un environnement très comparable) à partir d'enregistrements disponibles depuis le 1^{er} janvier 1949. La pluviométrie mensuelle moyenne y présente un maximum relatif en mai (près de 69 mm d'eau) et un maximum absolu en novembre-décembre (respectivement 71,6 et 71 mm), le minimum se situant au mois d'août (près de 41 mm) ; l'évapotranspiration potentielle est quant à elle maximale au mois de juillet (139 mm). Le site du Deffend se distingue donc de celui de Mormoiron par une pluviométrie plus régulière et par des températures et une évapotranspiration généralement inférieures. Le climat méditerranéen, bien que plutôt plus sec que le climat océanique, se distingue cependant par des précipitations ponctuelles très importantes correspondant en particulier aux pluies automnales, ainsi que par des variations interannuelles supérieures.

L'instrumentation mise en oeuvre au Deffend consiste en 22 capteurs Humitub répartis en deux grappes, l'une en lisière de zone boisée, l'autre au milieu d'une prairie. Installés en décembre 2005, ces capteurs sont disposés à raison d'un seul capteur par forage afin d'améliorer le contact sol-capteur. Quatre capteurs extensométriques implantés à des profondeurs comprises entre 0,1 m et 1,5 m équipent également le site. L'acquisition des mesures se fait, comme à Mormoiron, par une centrale automatisée, alimentée depuis octobre 2006 par un panneau solaire. Il n'a pas été nécessaire d'implanter de pluviomètre car le site en est déjà équipé dans le cadre d'un programme de recherche à but hydrogéologique.

5

Suivi des teneurs en eau et profils hydriques obtenus

Les données brutes issues des capteurs Humitub sont des intensités comprises entre 4 et 20 mA, qui peuvent être converties par l'intermédiaire d'un étalonnage dans des milieux de permittivités connues (azote, éthanol et eau déminéralisée).

Le passage des permittivités ainsi obtenues aux teneurs en eau volumiques se fait en utilisant différentes relations empiriques qui dépendent assez peu du type de sol (Topp *et al.*, 1980, Gaidi *et al.*, 2000). La conversion retenue est celle proposée par Weiller *et al.* (1998), qui semble être la plus réaliste sur l'ensemble de la gamme utile des teneurs en eau : $k = (7,62 \times Wv + 1,71)^2$, où k désigne la permittivité relative du milieu et Wv la teneur en eau volumique correspondante.

Les valeurs ainsi obtenues doivent ensuite être traduites en teneurs en eau massiques qui sont plus couramment utilisées en mécanique des sols. On utilise pour cela des corrélations obtenues en laboratoire sur des échantillons intacts. Cette caractérisation est aisée sur le site de Mormoiron car les matériaux rencontrés, au moins en partie supérieure du profil, sont relativement homogènes, mais elle s'avère plus difficile sur le site du Deffend en raison de la présence de plusieurs horizons différents. Les deux courbes présentées par la suite pour le site du Deffend restent donc exprimées en teneurs en eau volumiques.

Un certain nombre de difficultés ont été rencontrées lors des mesures, en particulier les problèmes de saturation des capteurs au delà d'un certain niveau d'humidité du sol. Ceci n'est pas trop gênant lorsque le

phénomène est temporaire, ce qui est le cas des capteurs les plus superficiels, mais s'avère rédhibitoire pour certains capteurs profonds dont l'environnement proche a été humidifié lors de leur mise en place alors que le retour à l'équilibre est très long du fait de la très faible perméabilité du matériau argileux à cette profondeur. Sur le site de Mormoiron, il n'est par ailleurs pas exclu que, malgré toutes les précautions prises lors de l'installation, des circulations temporaires d'eau se produisent à l'interface, le long des cannes de mesures, raison pour laquelle la disposition des capteurs a été modifiée lors de l'équipement du site du Deffend (avec un capteur unique par forage et un système de bouchon étanche 30 cm plus haut). Sur les graphiques ci-après (Fig.6), les oscillations observées en périodes de saturation des capteurs ont été effacées pour plus de lisibilité. Une seconde difficulté rencontrée est directement liée au phénomène de retrait-gonflement, puisque la période estivale se traduit sur certains capteurs par des « créneaux » temporaires traduisant la perte de contact entre le sol et les électrodes.

L'ensemble des résultats obtenus montre néanmoins une bonne corrélation entre les précipitations et l'évolution des teneurs en eau estimées à partir des capteurs les plus superficiels (Fig. 6), cette corrélation s'atténuant rapidement avec la profondeur.

Les résultats de la figure 6 correspondent aux mesures réalisées par les deux premiers capteurs (à 0,5 et 1 m de profondeur) sur le site du Deffend, en prairie. On remarque en particulier qu'en période estivale, les précipitations permettent la réhumidification des cou-

ches superficielles asséchées sans atteindre cependant les couches plus profondes. A l'inverse, une fois que les couches superficielles sont relativement humides, l'effet des nouvelles précipitations s'atténue alors qu'il commence à apparaître (avec un léger retard) dans les horizons plus profonds, lesquels sont donc davantage sensibles aux effets du cumul des précipitations sur une période prolongée. Inversement, en période sèche, on observe que la dessiccation des horizons superficiels est ralentie lorsque le sol est encore humide dans les horizons sous-jacents.

Les mesures permettent également d'aboutir à des profils hydriques de teneur en eau en fonction de la profondeur, bien que, sur le site du Deffend, les capteurs soient disposés en grappe et non pas le long d'une verticale, ce qui ne permet pas d'exclure totalement de légères variations latérales de faciès même si les capteurs sont très proches les uns des autres. La figure 7 illustre le type de résultats obtenus sur une des cannes installées à Mormoiron (en site herbeux). Le graphique de gauche montre le profil hydrique obtenu le 19 décembre 2006 par mesures directes effectuées lors de la mise en place des extensomètres et le compare aux valeurs indiquées à cette même date par les capteurs Humitub placés à quelques mètres de distance : jusqu'à une profondeur de 3 m, les résultats sont manifestement très comparables, ce qui confirme l'intérêt de ces mesures malgré les difficultés de calibration qui restent à résoudre (au delà de 3 m, les capteurs donnent à cette date des oscillations inexploitable).

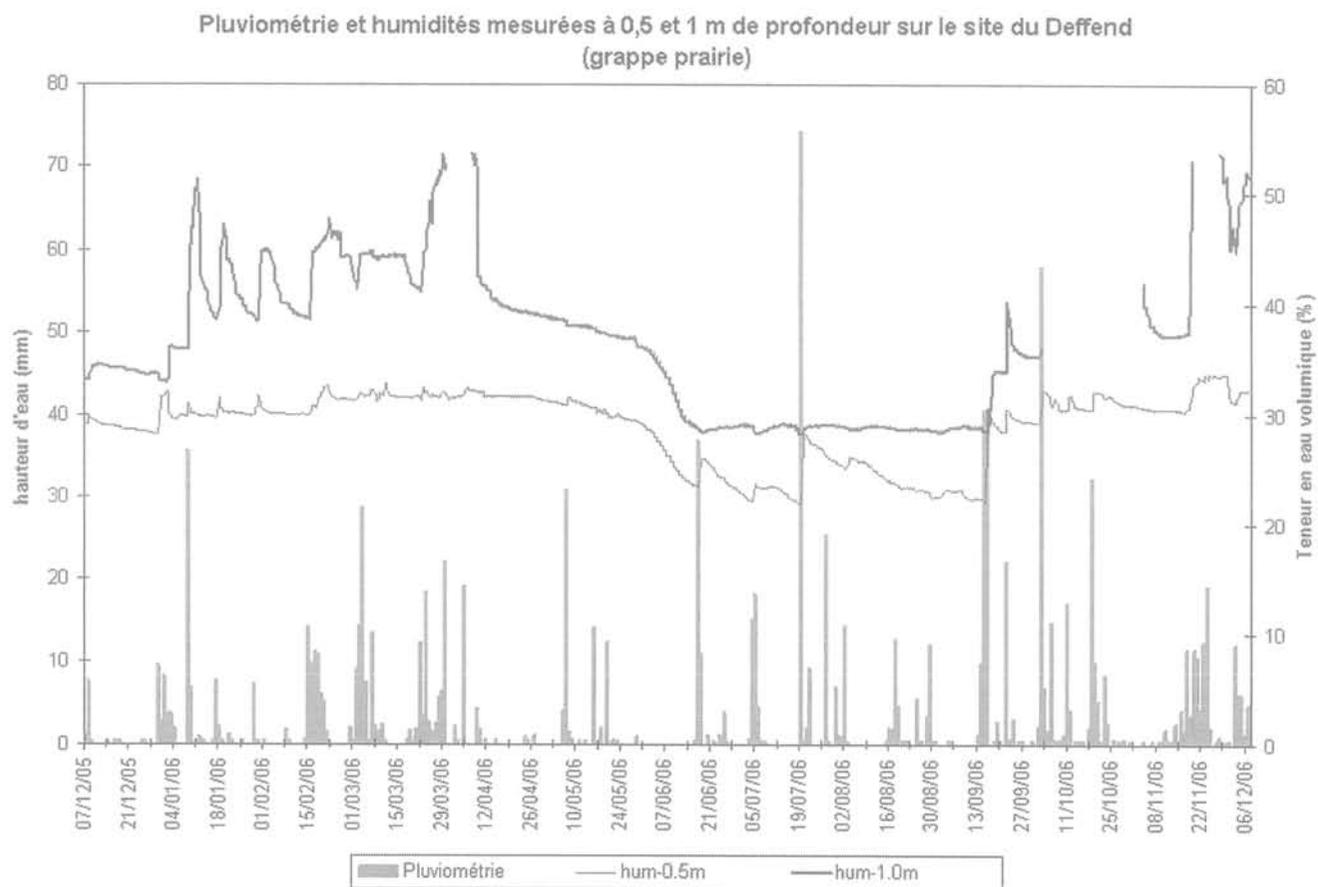


FIG. 6 Mesures obtenues sur le site du Deffend en prairie, capteurs implantés à 0,5 et 1 m de profondeur. Data recorded on Le Deffend site by capacitive sensors at 0.5 and 1 meter depth.

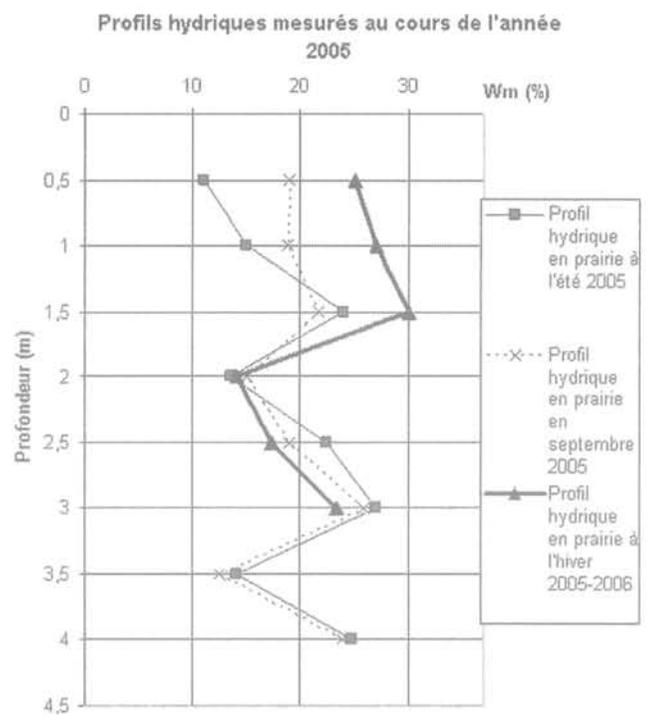
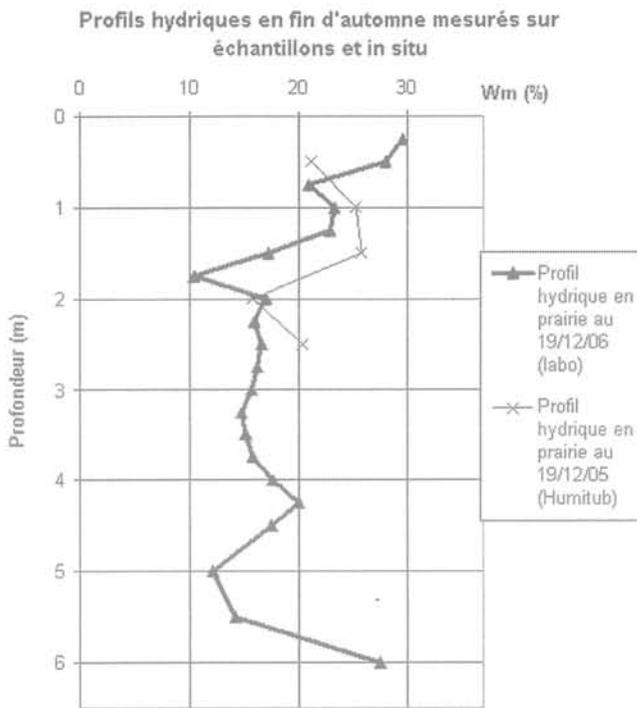


FIG. 7 Profils hydriques obtenus sur le site de Mormoiron à différentes périodes. Water content profile monitored on Mormoiron site at various periods.

Le graphique de droite montre trois profils type enregistrés durant la première année de mesure et illustre la phase de réhumidification automnale (certains profils ne sont pas rigoureusement synchrones et ressemblent des mesures prises à quelques jours de distance pour pallier les déficiences de certains capteurs, soit par effet de saturation, soit par déficit de contact avec le sol environnant en période sèche). En juillet-août 2005, les teneurs en eau sont minimales jusqu'à une profondeur de 1,5 m, avec des valeurs de l'ordre de 11 % à 0,5 m. En septembre, les horizons de surface ont commencé à se réhumidifier après les premières pluies importantes (45 mm les 8 et 9 septembre) et atteignent de l'ordre de 19 % pour le premier capteur où la teneur en eau augmente rapidement jusqu'à se stabiliser vers 27 % en début d'hiver. Cette réhumidification automnale est nettement visible jusqu'à une profondeur de 1,5 m alors que les horizons plus profonds montrent peu de différences entre été et hiver, sinon peut-être un léger décalage avec un front de dessiccation qui continue à s'approfondir alors que les horizons de surface sont en train de se réhumidifier.

Par ailleurs, on constate, au delà d'une profondeur de 3,5 m, un phénomène parasite de réhydratation du sol à partir d'écoulements temporaires qui se produisent au niveau d'une lentille limoneuse repérée à 4,5 m. Ces écoulements sont détectés à partir de fin septembre et provoquent une réhumidification progressive des couches sus-jacentes, en décalage avec les précipitations enregistrées. Les variations de teneur en eau dans le sol de Mormoiron sont donc influencées d'une part par les précipitations directes sur le site (avec une corrélation temporelle forte jusqu'à 1,5 m de profondeur) et d'autre part par ces écoulements temporaires à la faveur de niveaux limoneux lenticulaires plus ou moins anastomosés, eux-mêmes alimentés par les pluies automnales mais avec un important décalage dans le temps.

6

Suivi des mouvements verticaux du sol

Les déplacements verticaux sont mesurés par l'intermédiaire de capteurs extensométriques installés en forage sur le site du Deffend depuis décembre 2005 et sur le site de Mormoiron depuis décembre 2006. Les extensomètres, scellés en profondeur au niveau d'un point supposé fixe (7 m au Deffend, 6 m à Mormoiron), mesurent les déplacements relatifs du sol à des profondeurs variables (1,50 m, 1 m, 0,5 m et 0,1 m au Deffend ; 1 m, 0,5 m et 0,2 m à Mormoiron).

Les premiers résultats enregistrés au Deffend (Fig. 8) montrent que le début de la période de mesure est caractérisé par un léger retrait sur l'ensemble des extensomètres, suite à l'absence de précipitations significatives au début de l'hiver 2005. Un important orage le 8 janvier 2006 (35,4 mm) interrompt le phénomène et provoque un rapide gonflement sur l'ensemble des capteurs. On remarque que le mouvement observé à 0,5 m est significativement plus important que les autres (plus de 6,5 mm de gonflement en 10 jours contre 2 mm seulement pour le capteur de surface), ce qui peut s'expliquer en particulier par des hétérogénéités spatiales, cet extensomètre étant implanté à quelques mètres des autres. La succession des épisodes pluvieux de l'hiver 2006 contribue ainsi à des déplacements importants en extension sur l'ensemble des capteurs jusqu'au mois de mars 2006 : plus de 1 cm en surface par rapport à la situation initiale, plus de 9,3 mm à 0,5 m de profondeur (le capteur ayant atteint sa course maximale dès le mois de février, le gonflement réel est en réalité estimé à au moins 1,3 cm), près de 7,9 mm à 1 m de profondeur et de plus de 2,1 mm à 1,5 m de profondeur. A partir du mois de mars, un

Pluviométrie et déplacements verticaux mesurés par les extensomètres sur le site du Deffend (en prairie)

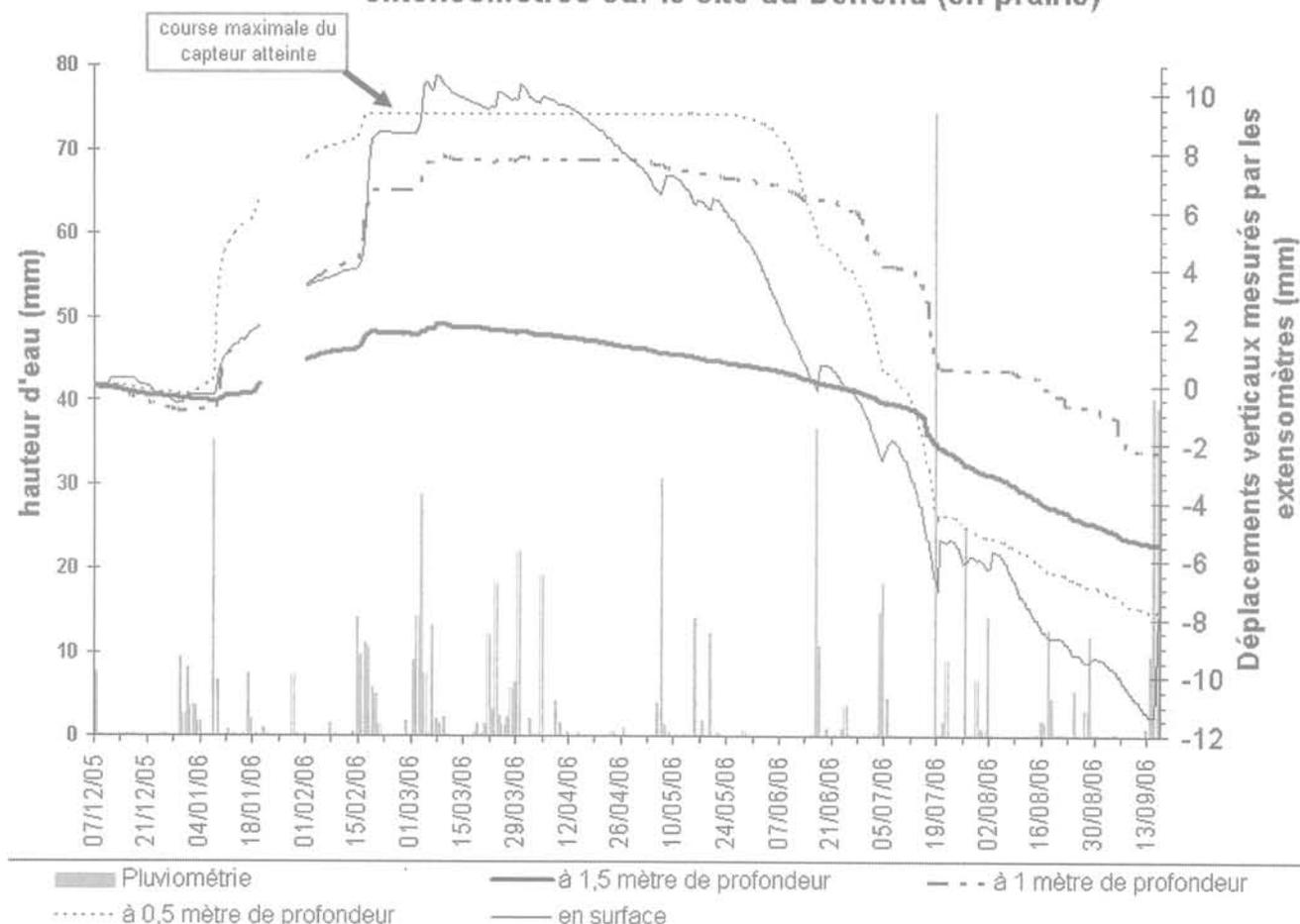


FIG. 8 Mesures des déplacements verticaux sur le site du Deffend.
Vertical displacements recorded on Le Deffend site.

phénomène de retrait significatif commence à apparaître à 1,5 m de profondeur, alors que les couches plus superficielles restent stables, leur état hydrique étant entretenu par les quelques précipitations printanières. Le retrait devient significatif sur l'ensemble des capteurs entre avril et mai et s'accélère durant l'été, les orages estivaux n'induisant en général qu'un très court gonflement ou une brève stabilisation du retrait.

L'amplitude globale du tassement mesurée entre mai et septembre 2006 atteint 2,2 cm en surface contre seulement 1 cm à 1 m de profondeur. A 1,5 m, les déplacements restent non négligeables, puisque l'amplitude des tassements mesurés atteint 7,5 mm en moins de 10 mois. Le gonflement hivernal a empêché des mesures continues sur le capteur à 0,5 m, mais l'amplitude estimée des déplacements correspondants est de l'ordre de celle mesurée en surface. Les vitesses atteintes par les déplacements sont, comme pour les amplitudes, décroissantes avec la profondeur. Les phénomènes de gonflement semblent être les plus rapides, avec des vitesses atteignant jusqu'à 3,8 mm/jour après d'importantes précipitations, alors que le retrait reste un phénomène plus progressif, souvent légèrement atténué par les orages estivaux, mais dont la vitesse peut tout de même atteindre 1,2 mm/jour.

A Mormoiron, les premières mesures effectuées permettent de visualiser plusieurs phases de gonflement consécutives à des épisodes pluvieux et un début de phénomène de retrait (Fig. 9).

A partir du 23 janvier 2007, trois épisodes pluvieux successifs se traduisent par des soulèvements verticaux quasi instantanés. Le gonflement se poursuit ensuite, entretenu par plusieurs petites pluies mais, à partir de début avril, le sol commence à se tasser en surface (mouvement enregistré à 0,2 m de profondeur, amorcé plus tardivement à 0,5 m), corrélativement avec une baisse de la teneur en eau dans le sol. Ce retrait est cependant interrompu par l'épisode pluvieux intense observé du 30 avril au 4 mai (62,5 mm de pluie en 5 jours), qui provoque une importante augmentation de l'humidité à 0,5 m le 2 mai, accompagnée instantanément d'un fort gonflement à 0,2 m (près de 8,5 mm entre le 2 et le 8 mai) et d'un mouvement légèrement retardé à 0,5 m (6,4 mm de gonflement entre le 3 et le 10 mai). La quasi-absence de précipitations entre le 4 et le 25 mai se traduit par une reprise rapide de la dessiccation et des tassements, ce qui confirme la bonne corrélation entre les épisodes pluvieux, les variations d'humidité et les mouvements verticaux du sol.

Précipitations, teneur en eau massique à 0,5 m et déplacements mesurés en surface

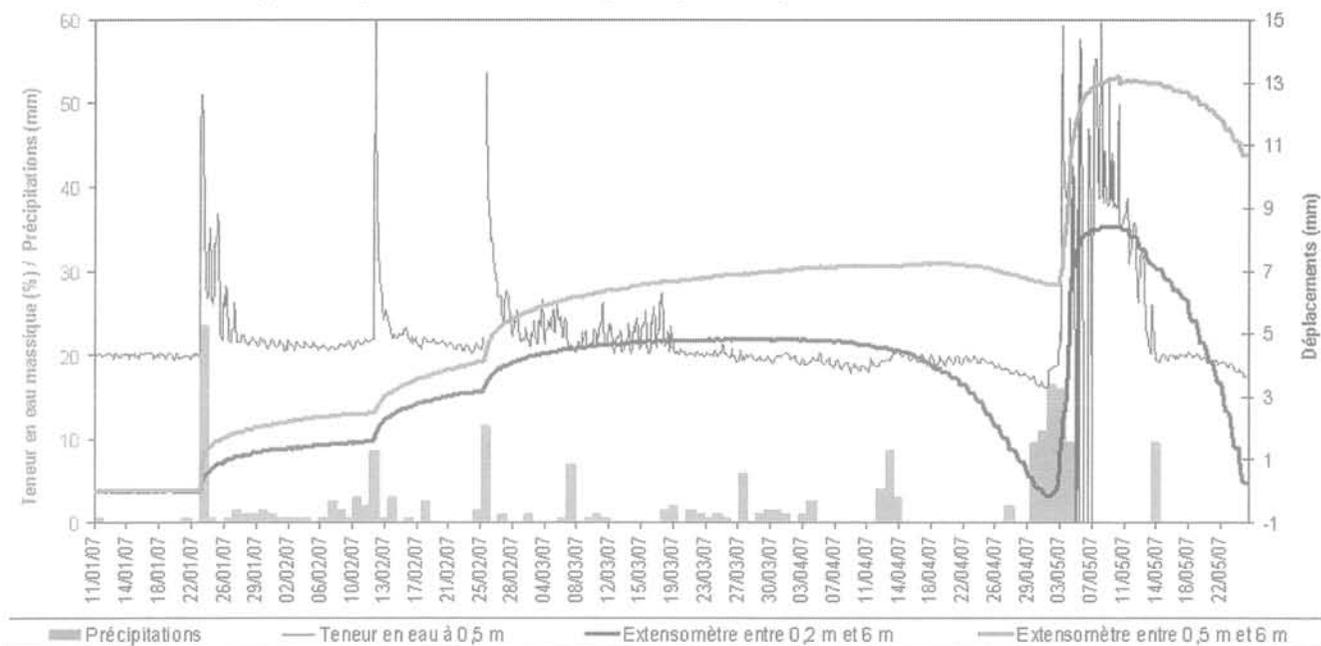


FIG. 9 Mesures des déplacements verticaux superficiels et de l'humidité à 0,5 m sur le site de Mormoiron. Superficial vertical displacements and water content at 0,5 m deep recorded on Mormoiron site.

7

Modélisations à l'aide du modèle à écoulements préférentiels MACRO

7.1

Présentation du modèle

MACRO (Jarvis *et al.*, 1991 ; 1994) est un modèle unidimensionnel déterministe qui permet de simuler les transferts d'eau et de solutés dans les sols. La particularité de ce modèle réside dans sa capacité à pouvoir prendre en compte les transferts de type préférentiel (écoulements par les fractures, les fissures, les biopores) qui sont importants dans les sols argileux et qui déterminent la distribution spatiale et l'évolution temporelle des teneurs en eau dans ces mêmes sols. Développé pour des applications de type transferts de pesticides dans les sols agricoles, le modèle a été testé dans de nombreux contextes : dynamique de l'eau, de traceurs, de solutés réactifs ou non réactifs, pour des sols sableux, limoneux et argileux (Saxena *et al.*, 1994 ; Jarvis, 1995 ; Ludwig *et al.*, 1999 ; Larsson et Jarvis, 1999 ; Brown *et al.*, 2004 ; Vink *et al.*, 1997 ; Armstrong *et al.*, 2000 ; Gottesbüren *et al.*, 2000 ; Garratt *et al.*, 2002 ; Dubus et Brown, 2002). Au vu des études de comparaison inter-modèles s'appuyant sur des jeux de données mesurées, MACRO apparaît comme un modèle obtenant de bons résultats de simulation dans le cadre de transferts d'eau et de solutés dans une gamme étendue de sols, depuis des sols sableux où les transferts sont relativement verticaux jusqu'aux sols plus structurés où le modèle excelle. Le modèle est utilisé dans le cadre des évaluations de risques pesticides (CEE, 1991 ; FOCUS, 2001) pour le calcul des Concen-

trations Environnementales Prévisibles dans les eaux de surface. Le choix du modèle MACRO pour décrire les variations d'humidité dans les sols de Mormoiron et du Deffend se justifie par le fort taux d'argiles dans ces sols et l'omniprésence de structures – pérennes ou non – amenant à un transfert hétérogène de l'eau dans les sols.

MACRO utilise des équations physiques et des schémas de fonctionnement conceptuels pour simuler les transferts d'eau dans les sols en intégrant notamment les écoulements préférentiels. La porosité totale du sol est scindée en deux domaines d'écoulement : les micropores et les macropores. Chaque domaine est caractérisé par une cinétique différente pour les transferts d'eau et de solutés. MACRO décrit les principaux processus régissant les transferts d'eau (pluviométrie, évapotranspiration potentielle, développement d'un couvert végétal, etc.) et de solutés réactifs (diffusion, adsorption, dégradation) dans les sols. Trois modes de simulation du couvert sont possibles : sol nu, couvert annuel ou pérenne. Le développement végétatif ainsi que la croissance racinaire sont simulés à travers des indices foliaires et racinaires ainsi qu'à l'aide d'un calendrier de développement.

L'écoulement de l'eau dans les micropores est décrit par l'équation de Richards tandis que la courbe de conductivité hydraulique est simulée par le modèle de Mualem (Mualem, 1976). La courbe de rétention est calculée à partir de l'équation de van Genuchten (van Genuchten, 1980). L'écoulement de l'eau dans les macropores est essentiellement gravitaire et la conductivité est fonction de la teneur en eau (Larsbo *et al.*, 2005). MACRO ne définit pas de limite physique de taille entre les macropores et les micropores, mais une teneur en eau maximale à partir de laquelle les transferts sont supposés se faire par les macropores. Jusqu'à cette valeur limite, l'eau est considérée comme étant dans les micropores. Ainsi dans le cas d'une humidifi-

cation progressive, les micropores se remplissent jusqu'à ce que la valeur limite d'humidité soit atteinte et l'eau excédentaire est alors transportée par les macropores. Dans ces conditions, à la suite d'un évènement pluvieux, l'humidité d'un horizon profond peut être supérieure à celle d'un horizon situé plus près de la surface. Les échanges entre micropores et macropores sont simulés par une approximation de l'équation de diffusion de l'eau.

7.2

Paramétrisation du modèle

Le modèle MACRO a été utilisé pour simuler les variations de teneurs en eau dans les sols de Mormoiron et du Deffend. Les simulations ont été réalisées sur une période de 41 années (1964-2005) pour différents couverts végétaux (herbe, vigne, olivier, pommier, framboisier). La vigne et le framboisier sont considérés comme représentatifs de couverts arbustifs, tandis que le couvert arboré est représenté par le pommier et l'olivier.

Les valeurs attribuées aux paramètres MACRO relevant du développement végétal ont été sélectionnées sur la base des travaux du groupe « FOCUS » (FOCUS, 2000). Les principales différences entre les couverts végétaux simulés sont la profondeur des racines et les périodes de repos végétatif hivernal. Le tableau I présente les valeurs attribuées aux principaux paramètres de végétation. Les mêmes paramètres ont été utilisés pour les deux sites pour faciliter les comparaisons.

Les données climatiques utilisées dans la modélisation (pluviométrie, température et évapotranspiration journalière) sont celles communiquées par Météo France à partir de ses stations de Carpentras (pour la modélisation de Mormoiron) et de Poitiers-Biard (pour le site du Deffend).

Les paramètres caractérisant le sol sont principalement issus des observations (texture et structure des horizons les plus superficiels) réalisées après l'ouverture d'une « fosse pédologique » sur chacun des deux sites expérimentaux et complétées par une série d'analyses granulométriques et mesure des taux de matière organique des différents horizons pédologiques identifiés. Les données recueillies ont permis d'estimer les paramètres de l'équation de van Genuchten pour les différents horizons de sols sur chacun des sites, en utilisant des fonctions de pédo-transfert HYPRES (Wöestgen *et al.*, 1999). La porosité totale a été estimée par des relations de pédo-transfert développées en Angleterre (Hollis et Woods, 1989). Les autres paramètres ont été caractérisés en se basant sur des modélisations antérieures validées de sols argileux.

7.3

Prédiction des variations de teneurs en eau par le modèle MACRO

La figure 10 présente les résultats de prédiction d'humidité pour les deux sites sur la période 1988-2005. Les résultats sont exprimés en taux d'humidité volumique relatifs [(taux d'humidité - taux d'humidité résiduelle)/(taux d'humidité à saturation - taux d'humidité résiduelle)] afin de permettre une comparaison entre les différents horizons et les deux sites.

L'étude des teneurs en eau relatives entre 1988 et 2005 sur le site de Mormoiron met en évidence deux périodes sèches : une comprise entre 1989 et 1991 et l'autre entre 1998 et 2000. Ces périodes sont marquées par un assèchement significatif du sol et une absence de recharge hivernale, lesquels sont particulièrement visibles sur les simulations qui concernent l'herbe et le framboisier, la profondeur d'assèchement dépendant de la profondeur des racines du couvert considéré.

Trois périodes d'assèchement sont identifiables sur le site du Deffend. La première et la plus importante s'étale de 1990 à 1993. Les deux autres se situent en 1999 et 2002. Toutes ces périodes présentent un assèchement en profondeur. Ces trois périodes sont plus facilement identifiables pour les couverts arborés.

Les périodes de dessèchement simulées par le modèle sur les deux sites peuvent être mises en relation avec les principales périodes où ont été signalés des dommages sur le bâti dans les deux communes. Il faut toutefois noter que l'année 2003, qui fut source de nombreux désordres dans la région de Poitiers, n'apparaît pas comme exceptionnelle dans la représentation des variations temporelles des taux d'humidité. Des analyses statistiques complémentaires prenant en compte le caractère pluriannuel des phénomènes de sécheresse du sol sont en cours et laissent néanmoins supposer que ces périodes de sinistres peuvent être reliées aux variations hydriques du sol modélisées avec l'aide de MACRO.

Outre la corrélation entre les dommages et les taux d'humidité du sol, les différentes simulations permettent de mettre en évidence l'influence des différents couverts végétaux. Outre les degrés variables de dessiccation du sol, l'influence de l'absence de repos végétatif pour des arbres tels que l'olivier conduit à des taux d'humidité faibles en profondeur et ce quelle que soit la saison considérée.

TABEAU I Principales caractéristiques des couverts végétaux simulés.
Main characteristics of vegetal cover used for numerical modeling.

	Herbe	Framboisier	Pommier	Olivier
Entrée/sortie de dormance	Pas de dormance	10 octobre/ 31 mars	1 octobre/ 1 avril	Pas de dormance
Profondeur maximale des racines actives	0,5 m	1 m	2 m	2 m
Activité maximale	-	31 mai	31 mai	-
Profondeur minimale des racines actives	0,5 m	0,9 m	1 m	2 m



FIG. 10 Pluviométrie journalière et variations simulées des taux d'humidité à différentes profondeurs sur la période 1988-2005 pour les quatre couverts végétaux (sites de Mormoiron et du Deffend).
Daily precipitations and calculated soil water content from 1988 to 2005 for various vegetal covers on Mormoiron and Le Deffend.

8

Conclusion et perspectives

Les premières mesures effectuées sur les sites de Mormoiron et du Deffend permettent d'aboutir à des résultats intéressants en ce qui concerne la propagation du front de dessiccation dans les sols argileux et les tassements à différentes profondeurs. Ces résultats devraient pouvoir être affinés prochainement par une meilleure connaissance du comportement des capteurs Humitub dans les sols argileux, ce qui fait l'objet de recherches spécifiques en cours. Les mesures sont d'ores et déjà enrichies par les trois extensomètres installés récemment sur le site de Mormoiron et dont les premiers résultats s'avèrent très encourageants. À terme, il pourrait être envisagé de créer sur le territoire métropolitain un réseau de stations de suivi du phénomène dans d'autres configurations de climat, de sol et de végétation : le Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) envisage actuellement l'éventualité de quelques dizaines de stations permanentes qui pourraient notamment aider à identifier les périodes

de sécheresse exceptionnelle dans les sols, en fonction des conditions climatiques locales.

Les modélisations hydriques réalisées avec l'aide de MACRO s'avèrent également prometteuses, puisqu'elles permettent la prise en compte de l'influence de la végétation sur le phénomène de dessiccation. Les résultats obtenus sont cohérents avec les sécheresses observées en début et à la fin des années quatre-vingt-dix, mais ils ne permettent toujours pas de visualiser les conséquences de l'été 2003. L'amélioration de la description des transferts hydriques, en particulier en ce qui concerne la prise en compte du ruissellement, de l'effet du système racinaire et des courbes de rétention des différents horizons du sol, devrait cependant contribuer à résoudre ce problème. Le travail de modélisation pourra ensuite être prolongé par des analyses en deux dimensions et des études de paramétrage afin d'extrapoler les résultats pour pouvoir à terme proposer des améliorations du critère de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle sécheresse et évaluer l'impact de mesures préventives.

BIBLIOGRAPHIE

- Armstrong A., Aden K., Amraoui N., Diekkrüger B., Jarvis N., Mouvet C., Nicholls P., Wittwer C. - Comparison of the performance of pesticide leaching models on a cracking clay soil: results using the Brimstone Farm dataset. *Agricultural Water Management*, 44, 2000, p. 85-104.
- Biddle P.G. (1983) - Patterns of soil drying and moisture deficit in the vicinity of trees on clay soils. *Geotechnique*, vol. XXXIII, 1983, p. 107-126.
- Blanc J.-J., Masse J.-P., Triat J.-M., Truc G., Anglada R., Colomb E., Clauzon G. et Rouire J. - Notice explicative et carte géologique de la France (1/50 000), feuille Carpentras (941), Orléans, BRGM, 1975, 24 p.
- Bréda N., Cochard H., Dreyer E., Granier A. - Water transfer in a mature oak stand (*Quercus petraea*): seasonal evolution and effects of a severe drought. *Can. J. For. Res.*, n° 23, 1992, p. 1136-1143.
- Bréda N., Granier A., Barataud F., Moyne C. - Soil water dynamics in an oak stand, I/ Soil moisture, water potentials and water uptake by roots. *Plant and soil*, n° 172, 1995, p. 17-27.
- Bréda N., Granier A., Aussenac G. - La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse éco-physiologique et influence sur les arbres forestiers. *Rev. For. LVI*, fév. 2004, p. 109-131.
- Brown C.D., Dubus I.G., Fogg P., Gustin C. - Exposure to sulfoluron in agriculture drainage ditches : field monitoring and scenario based modeling. *Pesticide Management Science*, 60 (8), 2004, p. 765-776.
- CEE - Directive 91/414/CEE du 15 juillet 1991 relative à la mise sur le marché des produits phytosanitaires. *Journal officiel* n° L 230, 19/08/1991
- Cutler D.F., Richardson I.B.K. - *Tree roots and buildings*. London: Construction Press, 1981, 94 p.
- Driscoll R. (1983) - The influence of vegetation on the swelling and shrinking of clay soils in Britain. *Geotechnique*, vol. XXXIII, 1983, p. 93-105.
- Dubus I.G., Brown C.D. - Sensitivity and first-step uncertainty analyses for the preferential flow model MACRO. *Journal of Environmental Quality*, n° 31, 2002, p. 227-240.
- FOCUS - *FOCUS groundwater scenarios in the EU review of active substances*. Report of the FOCUS Groundwater Scenarios Workgroup. EC Document Reference SANCO/321/2000 rev.2, 2000, 202 p.
- FOCUS - *FOCUS surface water scenarios in the European Union evaluation process under 91/414/EEC*. Report of the FOCUS working group on surface water scenarios, EC documents reference SANCO/4802/2001- rev.2, 2001, 245 p.
- Gaidi L. et Alimi-Ichola B. - Étude des caractéristiques hydrodynamiques des sols par la méthode TDR (time domain reflectometry). *Bull. Eng. Geol. Env.*, n°59, 2000, p. 247-255
- Garratt J.A., Capri E., Trevisan M., Errera G., Wilkins R. - Parametrisation evaluation and comparison of pesticide leaching models to data from a Bologna field site, Italy. *Pesticide Management Science*, n° 58, 2002, p. 3-20.
- Gottesbüren B., Aden K., Bärlund I., Brown C., Dust M., Görlitz G., Jarvis N., Rekolainen S., Schäfer H. - Comparison of pesticide leaching models: results using the Weiherbach dataset. *Agricultural Water Management*, n° 44, 2000, p. 153-181.
- Hollis J.M., Woods S.M. - *The measurement and estimation of saturated soil hydraulic conductivity*. SSLRC, Cranfield University, Bedford, 1989.
- Jarvis N.J., Jansson P.-E., Dik P.E. et Messing I. - Modelling water and solute transport in macroporous soil. Part I. Model description and sensitivity analysis. *Journal of Soil Science*, n° 42, 1991, p. 59-70
- Jarvis N. - *The MACRO model, Technical description*. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, (Version 4.3), 1994, 37 p.
- Jarvis N.J., Larsson M., Fogg P., Carter A.D. - Validation of the dual-porosity model MACRO for assessing pesticide fate and mobility in soils. *Pesticide movement to water*, A. Walker et al. (eds.), BCPC monograph 62. The British Crop Protection Council, Farnham, Surrey, UK, 1995, p. 161-170.
- Larsbo M., Roulier S., Stenemo F., Kasteel R. et Jarvis N.J. - An improved dual permeability model of water flow and solute transport in the vadose zone. *Vadose Zone Journal*, 2005.
- Larsson M.H. et Jarvis N.J. - Evaluation of a dual-porosity model to predict field scale solute transport in a macroporous soil. *Journal of Hydrology*, vol. 215, 1999, p. 153-171.
- Leroi E. - *HYCOSI. Impact of Hydrometeorology Changes on Slope Instability*. Rapport d'avancement 1^{re} année. Rapport BRGM R 38389, 1995, 38 p., 11 fig., 7 ann.
- Ludwig R., Gerke H.H., Wendroth O. - Describing waterflow in macroporous field soils using the modified MACRO model. *Journal of Hydrology*, n° 215, 1999, p. 135-152.
- Marçot N., Gonzalez G. avec la collaboration de Fournel S. et Simplet L. - *Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département du Vaucluse*. Rapport BRGM/RP-53187-FR, 2004, 220 p., 47 ill., 7 ann., 3 carte h.-t.
- Mourier J.-P. avec la collaboration de Gabilly M.-J. et Platel J.-P. (1986) - *Notice explicative de la feuille Poitiers, carte géologique de la France (1/50 000)*. Orléans, BRGM n° 589, 47 p. Carte géologique par Gabilly M.-J. et Platel J.-P. (1976).
- Mualem Y. - A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, n° 12, 1976, p. 513-522.
- Ravina I. - The influence of vegetation on moisture and volume changes. *Geotechnique*, vol. XXXIII, 1983, p. 151-157.
- Renault O., Norie A., Karnay G., Vincent M. - *Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département de la Vienne*. Rapport BRGM/RP-51264-FR, 2002, 93 p., 18 fig., 8 tabl., 3 cartes h.-t., 4 ann.
- Richards B.G., Peter P., Emerson W.W. - The effects of vegetation on the swelling and shrinking of soils in Australia. *Geotechnique*, vol. XXXIII, 1983, p. 127-139
- Saxena R.K., Jarvis N.J., Bergström L. (1994) - Interpreting non-steady state tracer breakthrough experiments in sand and clay soils using a dual-porosity model. *Journal of Hydrology*, n° 162, 1994, p. 279-298.
- Topp G.C., Davis J.L., Amman A.P. - Electromagnetic determination of soil water content. Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.*, n° 16, 1980, p. 574-582
- Van Genuchten M.T.H. - A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society American Journal*, vol. 44, 1980, p. 892-898.
- Vincent M., Bouchut J., Le Roy S., Dubus I., Surdyk N. - *Suivi de l'évolution en profondeur de la dessiccation des sols argileux en période de déficit hydrique*. Rapport final de phase 1. Rapport BRGM/RP-54567-FR, 2006, 189 p., 127 ill.
- Vincent M., Bouchut J., Fleureau J.-M. (ECP, LMSSMAT), Masroufi F. (ENSG, LAEGO), Oppenheim E. (SOLENEBTP), Heck J.-V. (CSTB), Ruau N. (CSTB), Le Roy S., Dubus I., Surdyk N. - *Étude des mécanismes de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux et de ses interactions avec le bâti*. Rapport final. BRGM/RP-54862-FR, 2006, 378 p., 308 ill.
- Vink J.P.M., Gottesbüren B., Diekkrüger B., Van der Zee S.E.A.T.M. - Simulation and model comparison of unsaturated movement of pesticide from a large clay lysimeter. *Ecological Modelling*, n° 105, 1997, p. 113-127.
- Weiller K.W., Steenhuis T.S., Bolle J., Kung K.J.S. - Comparison of ground penetrating radar and time domain reflectometry as soil water sensors. *Soil Science of American Journal*, n°62, 1998, p. 1237-1239.
- Williams A.A.B., Pidgeon J.T. - Evapo-transpiration and heaving in South Africa. *Geotechnique*, vol. XXXIII, 1983, p. 141-150.
- Wösten J.H.M., Lilly A., Nemes A., Le Bas C. - Development and use of a database of HYdraulic PROPERTIES of European Soils. *Geoderma*, n° 90, 1999, p. 169-185.

Modélisation des échanges à l'interface sol-atmosphère et simulation numérique des profils hydriques

Y.-J. CUI

CERMES-ENPC
6 et 8 av. Blaise-Pascal
Cité Descartes
Champs-sur-Marne
77455 Marne-la-Vallée
cedex 2
cui@cermes.enpc.fr

Y.-F. LU

Université des Trois-Gorges
Yichang
(République populaire de
Chine)

Y.-B. GAO

Université Tongji
Shanghai
(République populaire de
Chine)

Résumé

Une méthode de simulation des profils de teneur en eau des sols en considérant l'interaction sol-atmosphère a été développée. Cette méthode considère les données météorologiques et les propriétés thermiques et hydrauliques du sol. Deux approches de détermination de l'évapotranspiration sont présentées : l'approche de Penman (1948) et l'approche de Choudhury et al. (1986) ou de Xu et Qiu (1997). La première a été appliquée au site de Boissy-le-Châtel alors que la deuxième a été appliquée à un remblai expérimental du CER de Rouen. Un bon résultat a été obtenu dans les deux cas en termes de variations de la température dans le sol ; les simulations donnent des résultats de variation de la teneur en eau moins satisfaisants, surtout avec l'approche de Penman pour la zone proche de la surface du sol. Une discussion aborde les cas avec présence de la végétation et l'effet de la fissuration du sol.

Mots clés : Interaction sol-atmosphère, évapotranspiration, modélisation, profils hydriques, végétation.

Modelling exchanges at soil-atmosphere interface and numerical simulation of soil water content profiles

Abstract

A method for determining the water content profiles of soils by considering soil-atmosphere interaction was developed. This method considers meteorological data and the soil thermal and hydraulic properties. Two methods for determining evapotranspiration were used: Penman's approach (1986) and the approach by Choudhury et al. (1986) or Xu and Chiu (1997). The former was applied to the site of Boissy-le-Châtel whereas the latter was applied to the experimental embankment of CER-Rouen. Good result in terms of soil temperature changes has been obtained in the two cases. The simulations gave less satisfactory results in terms of changes in water content in the near surface zone, especially with Penman's approach. A discussion considers the cases with the presence of vegetation and the effect of soil cracking.

Keywords: Sol-atmosphere interaction, evapotranspiration, modelling, water content profiles, vegetation.

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 30 avril 2008.

NOTATIONS ET SYMBOLES

C_a : chaleur spécifique de l'air, kJ/(kg K), (1.01 kJ/(kg K) pour l'air sec)
 C_h : chaleur spécifique du sol, kJ/(kg K)
 C_s : chaleur spécifique des solides, kJ/(kg K)
 C_w : chaleur spécifique de l'eau, kJ/(kg K)
 d : hauteur de déplacement, m
 D_v diffusivité de la vapeur, m²/s
 ET : évapotranspiration réelle, mm/jour
 ETP : évapotranspiration potentielle, mm/jour
 G : flux de chaleur dans le sol, W / m²
 ΔG : percolation
 g : accélération de la pesanteur, m/s²
 H : flux de chaleur sensible, W / m²
 h_w : charge hydraulique, m
 k : constante, prise en général égale à 0,41
 k_H : diffusivité tourbillonnaire de l'air, m²/s
 k_s : coefficient de perméabilité à l'état saturé, m/s
 k_v : diffusivité tourbillonnaire de la vapeur d'eau, m²/s
 k_w perméabilité à l'eau liquide, m/s
 k_{w1} : coefficient de perméabilité à une succion de référence s_1 , m/s
 LAI : Leaf Area Index, correspondant au rapport de la surface développée par le feuillage à la surface occupée au sol par la végétation
 L_e : flux de chaleur latente, W/m²
 L_v : chaleur latente de l'évaporation d'eau, J/kg
 M_w : masse molaire de l'eau, 0,018kg/mol
 m_2^w : constante
 P : pression atmosphérique (kPa) ou précipitation (mm/jour)
 P_v : pression de vapeur, kPa
 p_{vza} : pression de vapeur d'eau à z_a , Pa
 P_{vs} : pression de vapeur saturante, kPa
 p_{vz0} : pression de vapeur d'eau à la surface du sol, Pa
 R : constante des gaz parfaits, 8,314J/(mol.K)
 r_a : résistance aérodynamique, m/s
 r_{a0} : résistance aérodynamique dérivée d'un profil de vitesse de vent logarithmique, m/s
 R_i : nombre de Richardson
 R_n : radiation solaire nette, W/m²
 R_{off} : ruissellement en surface, mm/jour
 $r_{st\ min}$: résistance stomatique minimale, m/s
 S : extraction d'eau
 ΔS : quantité d'eau stockée dans un volume de sol
 T : température, °C ou K
 T_a : température à une élévation de référence z_a , K
 T_s : température à la surface du sol, K
 T_0 : température aérodynamique, K
 t : temps, s
 u_a : vitesse du vent à z_a , m/s
 u_2 vitesse du vent à 2 m d'élévation, m/s
 ΔW : variation de la masse totale
 z : élévation, m
 z_0 : longueur de rugosité, m

ρ_w : masse volumique de l'eau, kg/m³
 β : coefficient de Bowen
 χ : paramètre
 δ : constante
 ϵ : rapport du poids moléculaire de l'eau à celui de l'air, $\epsilon = 0,622$
 γ : constante psychrométrique
 η : paramètre, $\eta = 0,75$ en condition instable ($T_s > T_a$) et $\eta = 2$ en condition stable ($T_s < T_a$)
 λ : conductivité thermique du sol, W/(m.°K)
 θ : teneur en eau volumique du sol
 θ_a : teneur en air volumique
 θ_r : teneur en eau volumique résiduelle
 θ_s : teneur volumique des solides
 θ_w : teneur en eau volumique
 θ_{w1} teneur en eau volumique à une succion de référence s_1
 θ_{ws} : teneur en eau volumique à l'état saturé
 $\rho_a (\frac{kg}{m^3}) = 129.29(273.13/T(K))(P(kPa) - 0.3783P_v(kPa))$:
 masse volumique de l'air
 $\rho_a (\frac{kg}{m^3}) = 1.2929(273.13/T(K))$:
 masse volumique de l'air sec
 ν : constante
 ξ : constante
 ζ : constante
 Δ : taux de variation de la pression de vapeur avec la température

1

Introduction

Avec le réchauffement climatique planétaire, la sécheresse devient un phénomène de plus en plus préoccupant. Dans le domaine du génie civil, l'effet de la sécheresse se traduit notamment par des désordres causés par le mouvement du sol, que ce soit un tassement ou un gonflement, à des constructions reposant sur fondations superficielles. Une première analyse de la pathologie des désordres observés montre que l'origine du problème vient de l'interaction sol-végétation-atmosphère qui engendre des variations de la teneur en eau ou de la succion du sol et provoque des variations du volume de ce dernier. Le problème est d'autant plus critique que le mouvement du sol est différentiel. Ainsi, bien comprendre l'interaction sol-végétation-atmosphère est primordial dans l'analyse de l'effet de la sécheresse.

Les avancées récentes dans la mécanique des sols non saturés permettent l'évaluation de ce type de mouvements différentiels du sol, si la variation de la succion dans le sol est connue. Une première approche directe serait bien entendu de suivre la variation de la succion soit à l'aide des techniques comme la tensiométrie, la psychrométrie, la mesure par du papier filtre, etc. (Delage et Cui, 2000), soit en suivant la variation de la teneur en eau à l'aide des techniques comme la mesure par TDR (*Time Domain Reflectometry* ou réflectométrie en domaine temporel) (Pereira dos Santos, 1997), la mesure par sonde capacitive (Martin et Meillier, 2002) ou la mesure par sonde neutronique (Ferber et Delfaut,

2000). Mais cette approche directe s'avère très onéreuse. Une autre approche alternative indirecte serait de modéliser l'interaction sol-atmosphère en utilisant les données météorologiques d'une part et des paramètres caractéristiques du sol d'autre part. Considérant que les données météorologiques sont en général riches et continues, la deuxième approche indirecte a un avantage évident. C'est cette approche que nous utiliserons dans cet article.

2

Évapotranspiration

Quand l'énergie solaire arrive sur la surface de la terre, une partie est réfléchiée par cette dernière en fonction des propriétés de la surface du sol. En faisant le bilan d'énergies rentrant et sortant sur la surface du sol, on détermine la radiation solaire nette, notée R_n . Cette quantité d'énergie est utilisée pour chauffer l'air en augmentant le flux de chaleur sensible H , pour chauffer le sol en augmentant le flux de chaleur dans ce dernier et pour évaporer l'eau du sol en augmentant le flux de chaleur latente L_e . Ainsi le bilan d'énergie solaire à la surface du sol peut s'écrire (Tanner, 1960 ; Blight, 1997) :

$$R_n = G + H + L_e \quad (1)$$

L'évapotranspiration potentielle (ETP) d'un sol peut être estimée en utilisant la méthode proposée par Penman (1948) :

$$ETP = \frac{\Delta R_n / L_v + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad (2)$$

$$\text{où } E_a = 0,165 (P_{vs} - P_v)(0,8 + u_2 / 100) \quad (3)$$

L'équation 2 est empirique et correspond à un cas idéal : large zone couverte de végétation homogène en période de croissance et avec une alimentation d'eau illimitée. Ainsi, ETP correspond à une évapotranspiration maximale. La chaleur latente d'évaporation de l'eau L_v est fonction de la température comme l'indique l'équation 4 (Cui *et al.*, 2005) :

$$L_v = 4,186 \times 10^3 (607 - 0,7 \times T) \quad (4)$$

où T est la température exprimée en °C.

La mesure d'évapotranspiration peut se faire par mesure directe à l'aide d'un lysimètre, par approche du bilan d'eau ou par approche du bilan d'énergie. La mesure directe par lysimètre consiste à suivre la variation de la masse totale ΔW d'un volume de sol représentatif, de la quantité d'eau ΔS stockée dans ce volume de sol et de la percolation ΔG (Benson *et al.*, 2001). L'évapotranspiration réelle ET est ainsi déterminée par :

$$ET = \Delta W - (\Delta S - \Delta G) \quad (5)$$

On note que la détermination de ΔW se fait en général par pesée et que celle de ΔS se fait en utilisant le profil de teneur de eau donné par des sondes de teneur en eau installées dans le volume de sol.

L'approche du bilan d'eau propose de déterminer, dans un système de lysimètre, le terme ΔW en suivant la précipitation P et le ruissellement en surface R_{off} (Khire *et al.*, 1997). On a ainsi l'évapotranspiration calculée par :

$$ET = (P - R_{off}) - (\Delta S - \Delta G) \quad (6)$$

L'approche du bilan d'énergie consiste à déterminer le coefficient de Bowen (équation 9) en partant de

la définition théorique du flux de chaleur sensible H et du flux de chaleur latente L_e :

$$H = \rho_a C_{aH} k_H \frac{\partial T}{\partial z} \quad (7)$$

On note que la valeur de la masse volumique et celle de la chaleur spécifique de l'air sec sont en général considérées dans les calculs.

$$L_e = \frac{L_v \rho_a \epsilon k_v}{P} \frac{\partial P_v}{\partial z} \quad (8)$$

En général, k_v et k_H sont supposés égaux. Ainsi, le rapport de H à L_e , noté β et appelé coefficient de Bowen, devient :

$$\beta = \frac{H}{L_e} = \frac{P C_p}{L_v \epsilon} \frac{\partial T}{\partial P_v} = \gamma \frac{\partial T}{\partial P_v} \quad (9)$$

Connaissant la radiation solaire nette R_n , le flux de chaleur dans le sol ainsi que le coefficient de Bowen β , le flux de la chaleur latente L_e est calculé par :

$$L_e = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad (10)$$

L'équation 9 indique que β peut se déterminer en connaissant le gradient de température et le gradient de pression partielle de la vapeur d'eau. Le système de Campbell Scientific (Campbell Scientific BR023, 1998) propose, pour ce faire, de suivre la variation de la température et celle de la pression de vapeur d'eau à deux élévations différentes à l'aide respectivement de thermocouples et d'hygromètres.

La radiation solaire nette peut être suivie en utilisant un radiamètre (Blight, 1997), alors que le flux de chaleur dans le sol peut se déterminer à l'aide de plaques de chaleur enterrées dans le sol (Campbell Scientific, 1998).

3

Modélisation de l'échange sol-atmosphère

Le phénomène d'échange sol-atmosphère est un problème couplé. En effet, sous l'effet de l'atmosphère, le sol change de teneur en eau ou de succion, engendrant la variation de son volume ; cette variation volumique fait varier les propriétés hydriques et thermiques, influençant ainsi les échanges sol-atmosphère. Ceci est particulièrement le cas pour des sols argileux.

Afin de bien mettre en évidence le phénomène d'échange sol-atmosphère, on se limite ici au cas de sols non déformables comme les sols sableux ou limoneux. On considère seulement l'écoulement de l'eau (liquide et vapeur) et le transfert de chaleur. L'équation 11 décrit l'écoulement de l'eau alors que l'équation 12 décrit le transfert de chaleur. On observe que les deux transferts sont couplés à travers la pression de vapeur d'eau P_v (Wilson *et al.*, 1994) :

$$\frac{\partial h_w}{\partial t} = C_w^1 \frac{\partial}{\partial z} \left(k_w \frac{\partial h_w}{\partial z} \right) + C_w^2 \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial P_v}{\partial z} \right) \quad (11)$$

$$\text{où } C_w^1 = \frac{1}{\rho_w g m_2^w} \text{ et } C_w^2 = \frac{P + P_v}{P (\rho_w)^2 g m_2^w}$$

$$C_h \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) - L_v \frac{P + P_v}{P} \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial P_v}{\partial z} \right) \quad (12)$$

$$\text{où } C_h = C_s \theta_s + C_w \theta_w + C_a \theta_a$$

On note que ces deux équations sont valables seulement pour des milieux non déformables. De plus, pour un incrément de succion donné, il est supposé que la variation de la teneur en eau volumique avec la succion est linéaire. La conductivité thermique du sol λ est déterminée suivant la méthode proposée par De Vries (1963) qui consiste à considérer les effets de chaque phase en fonction de sa teneur volumique.

Deux propriétés hydrauliques sont évoquées dans l'équation 11 : la variation de la perméabilité k_w avec la succion s et la variation de la teneur en eau volumique θ_w avec la succion. On adopte l'équation 13 pour la perméabilité et l'équation 14 pour la teneur en eau volumique (Cui *et al.*, 2005) :

$$k_w = \frac{k_s}{1 + \left(\frac{k_s}{k_{w1}} - 1\right) \left(\frac{s}{s_1}\right)^\xi} \quad (13)$$

$$\theta_w = \frac{\theta_{ws} - \theta_r}{1 + \left(\frac{\theta_{ws} - \theta_r}{\theta_{w1} - \theta_r} - 1\right) \left(\frac{s}{s_1}\right)^\xi} \quad (14)$$

Cui *et al.* (2005) ont montré que ces deux équations permettent de reproduire de façon satisfaisante la courbe de rétention d'eau et celle de variation de perméabilité avec la succion.

Si les conditions aux limites sont définies, la résolution des équations 11 et 12 donne les profils de P_v (succion) et de température. Le profil de teneur en eau peut ainsi être déterminé en utilisant l'équation 14. La définition des conditions à la limite supérieure (surface du sol) se fait en considérant l'interaction sol-atmosphère. Il existe deux cas possibles : cas avec précipitations et cas sans précipitations. En cas de précipitations, c'est l'infiltration d'eau (précipitation - interception - ruissellement) qui est considérée comme le débit d'eau en surface ; dans le cas contraire, on peut considérer deux approches : l'approche de Penman (1948) et l'approche proposée par Choudhury *et al.* (1986) ou par Xu et Qiu (1997).

L'approche de Penman consiste à utiliser l'équation 2 pour calculer l'évapotranspiration potentielle ETP, et à utiliser ensuite ETP pour déterminer le débit de la vapeur d'eau (flux d'évaporation). On note que ETP correspond à une évapotranspiration potentielle, qui peut être nettement supérieure à l'évapotranspiration réelle. Une approche alternative serait de considérer l'équilibre énergétique à la surface du sol en réalisant un calcul de transfert hydraulique et de chaleur dans une couche fine de sol proche de la surface (Choudhury *et al.*, 1986, Xu et Qiu, 1997). Le calcul est plus réaliste, mais au prix d'un calcul plus lourd avec des paramètres physiques souvent mal connus. Dans cette approche, le flux de chaleur sensible H et le flux de chaleur latente L_e sont calculés par :

$$H = \frac{\rho_a C_a (T_a - T_s)}{r_a} \quad (15)$$

$$L_e = \frac{L_v M_w (p_{vz0} - p_{vza})}{R T r_a} \quad (16)$$

La résistance aérodynamique r_a peut être calculée en utilisant l'équation 17 (Choudhury *et al.*, 1986 ; Boulet *et al.*, 2000) :

$$r_a = r_{a0} \frac{1}{(1 + R_i (T_a - T_s))} \quad (17)$$

Le nombre de Richardson R_i et la résistance aérodynamique dérivée d'un profil de vitesse de vent logarithmique r_{a0} sont donnés par :

$$R_i = \frac{5g(z_a - d)}{u_a^2 T_a} \quad (18)$$

$$r_{a0} = \frac{\left[\ln\left(\frac{z_a - d}{z_0}\right)\right]^2}{k^2 u_a} \quad (19)$$

Pour des sols nus, la hauteur de déplacement est égale à zéro.

Xu et Qiu (1997) ont modifié l'approche de Choudhury *et al.* (1986) en proposant une autre formule plus empirique pour le calcul de r_a . On note que les deux méthodes permettent de déterminer numériquement par itération le flux de chaleur latente L_e et la température à la surface du sol T_s . Comme L_e correspond au débit de vapeur d'eau, les conditions à la limite supérieure sont bien définies. En revanche, avec l'approche de Penman, il est nécessaire de déterminer, en plus du flux d'évaporation, le flux de chaleur G à la surface du sol à partir de la radiation solaire nette (on suppose ici que le rapport G/H est constant, égal à δ).

4

Applications

On présente une application de l'approche de Penman au site de Boissy-le-Châtel et une application de l'approche de Choudhury *et al.* (1986) ou de Xu et Qiu (1997) à un remblai expérimental réalisé par le Centre d'Expérimentation Routière (CER) de Rouen.

4.1

Site de Boissy-le-Châtel

Le site de Boissy-le-Châtel est situé à environ 50 km à l'est de Paris. Le sol concerné est un limon des plateaux. Depuis 1996, les données météorologiques sont enregistrées, ainsi que la température et la teneur en eau du sol par des sondes TDR (*Time Domain Reflectometry*). Huit piézomètres et un collecteur sont également mis en place pour suivre le stockage d'eau dans le sol (Cui *et al.*, 2005).

L'approche de Penman est appliquée sur ce site. Les données enregistrées en avril 1999 sont utilisées pour la simulation. Les propriétés de rétention d'eau ont été déterminées à l'aide de la technique de mesure de succion par tensiomètre (Mantho 2005); la variation de la perméabilité avec la succion a été déterminée avec la méthode des profils instantanés (Delage et Cui, 2000) en réalisant un essai d'infiltration (Mantho, 2005). Les paramètres utilisés sont présentés dans le tableau I.

La figure 1 présente la comparaison entre les températures calculées et mesurées à la profondeur de 0,5 m. On observe que la différence entre les deux est assez petite, inférieure à 1 °C, sauf pour les derniers jours du mois où l'écart atteint 2 °C environ.

Sur la figure 2 on présente la comparaison entre les variations de teneur en eau calculées et mesurées à cinq profondeurs différentes (15, 25, 35, 45 et 55 cm). On observe une très bonne correspondance pour les profondeurs de 25, 35, 45 et 55 cm ; en revanche pour le niveau de 15 cm qui est proche de la surface, les calculs surestiment considérablement la teneur en eau volumique pour la période du 13 au 30 avril. Ceci est probablement lié au fait que la couche superficielle a des propriétés hydrauliques et hydriques diffé-

Remblai expérimental de Rouen

entes de celles des couches plus profondes. En effet, cette couche est enherbée, correspondant ainsi à un matériau de mélange sol - racines d'herbes. Il serait plus raisonnable de prendre, dans le calcul, un jeu de paramètres différent pour cette couche particulière. Il est aussi possible que ce résultat soit lié à l'utilisation de l'évapotranspiration potentielle ETP dans le calcul.

TABLEAU I Paramètres utilisés pour le site de Boissy-le-Châtel.

Chaleur spécifique	C_s (J/m ³ °C)	$2,24 \times 10^6$
	C_w (J/m ³ °C)	$4,15 \times 10^6$
Conductivité hydraulique	k_s (m/s)	$1,32 \times 10^{-6}$
	k_{w1} (m/s)	$2,0 \times 10^{-7}$
	s_r (kPa)	600
	ξ	1,48
Teneur en eau volumique	θ_{ws}	0,40
		0,34
	s_1 (kPa)	5,7
	ζ	2,18
Autres paramètres	m_2^w (kPa ⁻¹)	$9,1 \times 10^{-3}$

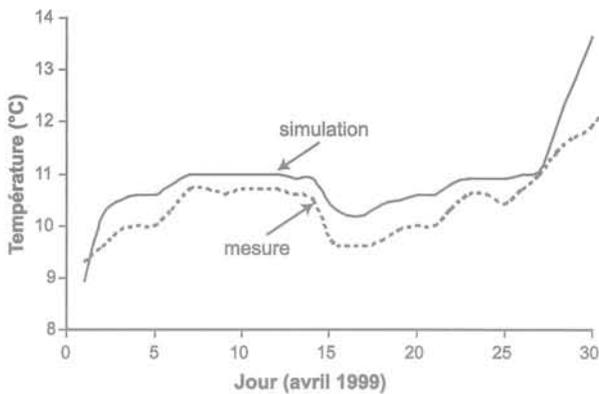


FIG. 1 Comparaison entre les variations de température calculées et mesurées à la profondeur de 0,5 m.

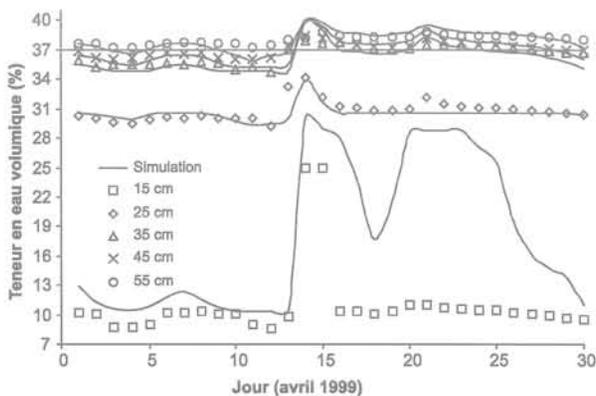


FIG. 2 Comparaison entre les variations de teneur en eau volumique calculées (traits continus) et mesurées (symboles).

Le CER de Rouen du CETE Normandie-Centre a mis en place à Rouen un remblai expérimental en décembre 2004. Le remblai a une hauteur de 5,27 m et il est construit par compactage en 15 couches. Les couches sont numérotées de 1 à 15 de la base à la crête du remblai. Les couches 1 à 5 sont construites avec le limon A28 faiblement compacté alors que les couches 6 à 15 sont construites avec le limon SNEC bien compacté.

Le remblai est instrumenté de différents capteurs à différentes positions :

- 1) 40 TDR pour le suivi de la teneur en eau volumique ;
- 2) 10 capteurs de teneur en eau volumique du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (LRPC) ;
- 3) 15 capteurs de succion de type équitensiomètre ;
- 4) 25 sondes de températures ;
- 5) 18 extensomètres pour le suivi des déformations verticales ;
- 6) 8 capteurs LVCD pour le suivi des déformations horizontales ;
- 7) une sonde de température pour le suivi de la température à la surface du sol.

De plus, une station météorologique est installée sur le remblai, permettant l'acquisition des données suivantes en temps réel :

- 1) la vitesse du vent à 2 m ;
- 2) la radiation solaire ;
- 3) la précipitation ;
- 4) les températures à 0,5 m et 1 m ;
- 5) les humidités relatives à 0,5 m et 1 m ;
- 6) la pression atmosphérique.

Dans la simulation numérique, pour rester dans le cas unidimensionnel, seul l'axe de symétrie du remblai est considéré. De plus, on suppose que le ruissellement en surface R_{off} est nul. L'approche de Choudhury *et al.* ou de Xu et Qiu est utilisée. La température et la teneur en eau volumique du sol mesurées à minuit, le 31 mars 2005, sont considérées pour représenter l'état initial ; la simulation est effectuée sur tout le mois d'avril.

Les paramètres sont estimés en se basant sur des propriétés du limon de Jossigny compacté (Cui et Delage, 1996) et des mesures *in situ* (teneur en eau et succion). Le tableau II regroupe les paramètres utilisés dans la simulation.

Les résultats de suivi en place ont montré qu'en termes de variations de température, seule la mesure la plus proche de la surface du remblai, à 34 cm, présente une variation significative, et qu'en termes de variations de teneur en eau volumique, elles ont été très faibles pour tous les niveaux de mesure. Donc seules les mesures à 34 cm de la surface du remblai sont comparées avec les résultats des simulations.

TABLEAU II Paramètres utilisés pour le remblai expérimental du CER de Rouen.

Chaleur spécifique	C_s (J/m ³ °C)	2,24 × 10 ⁶
	C_w (J/m ³ °C)	4,15 × 10 ⁶
Conductivité hydraulique	k_s (m/s)	1,5 × 10 ⁻⁹ ; (6 × 10 ⁻⁹ m)*
	k_{wet} (m/s)	1,15 × 10 ⁻¹⁰
	s_1 (kPa)	40
	ξ	1,25
Teneur en eau volumique	θ_{we}	0,33 ; (0,44)*
	θ_r	0,05
	θ_{wt}	0,26
	s_1 (kPa)	30 ; (50)*
	ζ	1,0
Autre paramètre	m_p^w kPa ⁻¹	6 × 10 ⁻³

* Valeurs utilisées pour les couches 1 à 5.

La figure 3 montre une comparaison entre les variations de température mesurées et calculées durant le mois d'avril 2005. Une concordance satisfaisante est observée entre la mesure et la simulation.

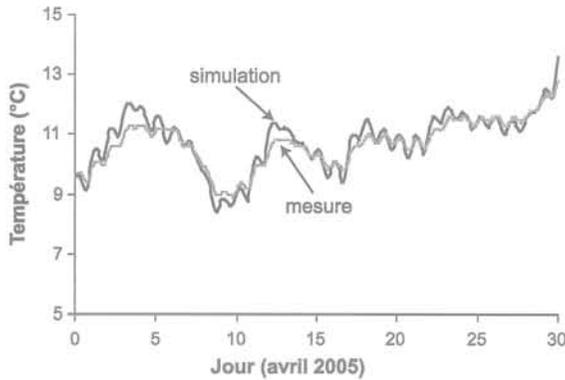


FIG. 3 Comparaison entre les variations de température calculées et mesurées, à 34 cm de la surface du remblai.

La figure 4 montre la comparaison entre les variations de teneur en eau volumique calculées et mesurées durant la même période. On observe que la mesure indique une teneur en eau presque constante alors que la simulation a donné une faible diminution de la teneur en eau d'environ 2 points.

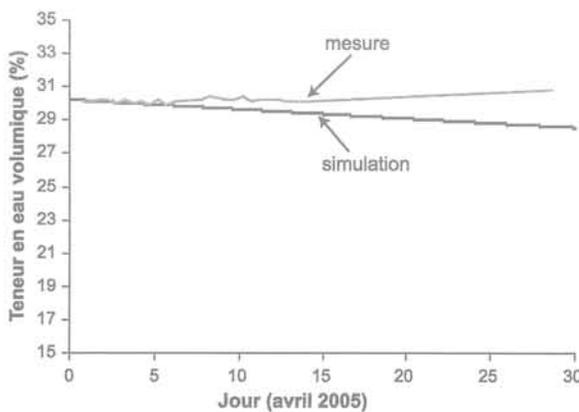


FIG. 4 Comparaison entre les variations de teneur en eau volumique calculées et mesurées, à 34 cm de la surface du remblai.

Discussion

Dans les deux applications présentées précédemment, on n'a pas considéré l'effet de la végétation. Or, elle peut jouer un rôle primordial dans le problème de sécheresse car, d'une part, la végétation puise l'eau du sol d'une manière surprenante : un saule adulte puise 300 litres d'eau par jour dans le sol (Cui et Delage, 2002), et, d'autre part, la végétation a souvent un effet localisé de puisement d'eau, favorisant ainsi le tassement différentiel des constructions concernées. C'est particulièrement le cas pour les arbres isolés.

Sur le plan de la modélisation, quand il s'agit d'un couvert homogène (cultures agricoles, forêt, zone enherbée, etc.), on adopte en général une méthode simplifiée qui est une extension de celle pour sols nus. On définit un paramètre χ qui relie la température à la surface du sol T_s à une température T_0 appelé température aérodynamique (équation 20), χ étant défini par l'indice LAI (*Leaf Area Index*) qui correspond au rapport de la surface développée par le feuillage à la surface occupée au sol par la végétation (équation 20).

$$\chi = \frac{T_0 - T_a}{T_s - T_a} = \frac{1}{e^{0,6 - LAI} - 1} \quad (20)$$

Une fois la température aérodynamique T_0 obtenue, on la substitue, dans l'équation 15 pour le calcul du flux de chaleur sensible H , à T_s ; on considère également, dans l'équation 16 pour le calcul du flux de chaleur latente L_e , une pression de vapeur d'eau à la surface du sol correspondante à T_0 (Boulet et al., 2000). De plus, on considère dans le calcul de L_e une résistance stomatique minimale $r_{st\ min}$ liée à la présence de la végétation.

Ainsi, le cas des sols nus correspond à un cas particulier de couvert homogène, avec $LAI = 0$ et $r_{st\ min} = 0$.

La modélisation du cas d'arbres isolés est plus complexe. La pratique courante consiste à introduire un terme d'extraction d'eau "S" dans l'équation de Richards (Whisler et al., 1968 ; Molz et Remson, 1970 ; Clausnitzer et Hopmans, 1994) :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla [k_w \nabla (h_w + z)] - S \quad (21)$$

On note que l'extraction d'eau par les racines est un phénomène complexe, car elle dépend non seulement de l'essence elle-même (taille, feuillage, enracinement, etc.), mais aussi des propriétés du sol concerné (état hydrique, salinité, état de compaction, etc.). La plupart des travaux réalisés jusqu'à présent sont basés sur le modèle de Feddes et al. (1978) qui considère l'état hydrique du sol, la distribution du système racinaire, etc. (voir Vrugt et al., 2001).

En plus de la végétation, la fissuration du sol est un autre phénomène important à prendre en compte dans l'analyse de l'échange sol-atmosphère. En effet, la fissuration du sol pourrait modifier la quantité de radiation solaire nette à cause de la modification de la valeur de l'albédo (coefficient de réflexion de l'énergie solaire par la terre) et la longueur de rugosité z_0 (équation 19) ; elle modifie le flux de chaleur latente à cause de la modification de la résistance aérodynamique (équation 16) ; elle modifie les propriétés thermo-hydro-mécanique du sol ; elle modifie surtout la géométrie du problème : à cause des fissures, les sols en profondeur, jadis épargnés par les changements climatiques, peuvent être touchés, amplifiant ainsi l'impact de la sécheresse sur les constructions.

Conclusion

Une méthode indirecte de détermination des profils de teneur en eau en considérant l'interaction sol-atmosphère a été présentée. On s'est limité au cas de sols non déformables comme des sols sableux ou limoneux et on a considéré seulement l'écoulement de l'eau (liquide et vapeur) et le transfert de chaleur dans le sol. Deux approches ont été présentées pour la détermination de l'évapotranspiration à la surface du sol : l'approche de Penman (1948) et l'approche proposée par Choudhury *et al.* (1986) ou par Xu et Qiu (1997).

L'application de l'approche de Penman au site de Boissy-le-Châtel a montré que cette approche permettait de bien simuler la variation de la température dans le sol, et qu'en revanche, en termes de variations de teneur en eau, elle donnait des résultats satisfaisants seulement à des profondeurs éloignées de la surface : pour le niveau proche de la surface (15 cm) les calculs surestiment considérablement la teneur en eau volumique. Ceci est probablement lié à l'utilisation de l'évapotranspiration potentielle ETP dans la méthode. En effet, l'évaporation réelle peut être nettement inférieure à l'évapotranspiration potentielle.

Considérant les limitations de la méthode de Penman, l'approche de Choudhury *et al.* (1986) ou de Xu et Qiu (1997) a été choisie pour la simulation du remblai expérimental du CER de Rouen. La comparaison entre les variations de température mesurées et calculées durant le mois d'avril 2005 a montré une bonne concordance entre les mesures et la simulation, avec un écart

nettement plus petit que celui avec la méthode de Penman. Ainsi, dans l'analyse de l'interaction sol-atmosphère, on recommande l'utilisation des approches comme celle de Choudhury *et al.* ou de Xu et Qiu.

Une méthode de prise en compte de l'effet de la végétation a été présentée. Dans le cas de couvert homogène, une extension de l'approche de Choudhury *et al.* (1986) peut être employée simplement en introduisant la notion de température aérodynamique T_0 qui est liée à l'indice LAI. Dans le cas d'arbres isolés, il est nécessaire d'introduire, dans l'équation de transfert d'eau, un terme "S" qui correspond à l'extraction de l'eau par des racines. Ce terme d'extraction d'eau est assez difficile à appréhender sachant qu'il dépend non seulement de l'essence elle-même (taille, feuillage, enracinement, etc.), mais aussi des propriétés du sol concerné (état hydrique, salinité, état de compaction, etc.).

La fissuration du sol est un autre phénomène important à prendre en compte dans l'analyse de l'échange sol-atmosphère car elle peut modifier non seulement la quantité de radiation solaire nette et les propriétés thermo-hydro-mécaniques du sol, mais aussi la géométrie du problème : les sols plus profonds ne sont plus protégés à cause des fissures.

REMERCIEMENTS

Les auteurs adressent leur gratitude au CEMAGREF et au CER de Rouen pour avoir fourni les données sur le site de Boissy-le-Châtel et sur le remblai expérimental respectivement. La construction du remblai expérimental a été réalisée dans le cadre d'une opération LCPC-11j031 intitulée « Terrassements et comportement des matériaux de remblai ». Le LCPC est remercié également.

- Benson C.H., Abichou T., Albright W.H., Gee G., Roesler A.C. - Field Evaluation of Alternative Earthen Final Covers. *International Journal of Phytoremediation*, vol. 3, n° 1, 2001, p. 105-127.
- Blight G.E. - Interaction between the atmosphere and the earth. *Géotechnique*, n° 47, 1997, p. 715-767.
- Boulet G., Chehbouni A., Braud I., Vauclin M., Haverkamp R., Zammit C. - A simple water and energy balance model designed for regionalization and remote sensing data utilization. *Agriculture and Forest Meteorology* 105, 2000, p. 117-132.
- Campbell Scientific Inc. - *BR023 Bowen ratio system instrumentation manual*, 1998.
- Choudhury B.J., Reginato R.J., Idso, S.B. - An analysis of infrared temperature observations over wheat and calculation of latent heat flux. *Agriculture and Forest Meteorology*, 37, 1986, p.75-88
- Clausnitzer V., Hopmans J.W. - Simultaneous modeling of transient three-dimensional root growth and soil water flow. *Plant Soil*, 164, 1994, p. 299-314.
- Cui Y.J., Delage P. -Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt. *Géotechnique* 46, n° 2, 1996, p. 291-311.
- Cui Y.J., Delage P. - *Application de la mécanique des sols non saturés au calcul des ouvrages géotechniques*. Techniques de l'Ingénieur, C303, 2002.
- Cui Y.J., Lu Y.F., Delage P, Riffard M. - Field simulation of in-situ water content and temperature changes due to ground-atmospheric conditions. *Géotechnique*, 55(7), 2005, p. 557-567.
- Delage P., Cui Y.J. - *L'eau dans les sols non saturés*. Techniques de l'Ingénieur, C301-1 - C301-20 et Doc. C304-1 - C304-2, 2000.
- De Vries D. A. - Thermal properties of soils. Physics of plan environment, W.R. Van Wijk (ed.), North Holland Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands, 1963, p. 210-235.
- Feddes R.A., Kowalik P.J., Zaradny, H. - *Simulation of field water use and crop yield*. Wageningen Center for Agriculture and Documentation, Wageningen, The Netherlands, 1978.
- Ferber V., Delfaut A. (2000) Application des sondes de diagraphies nucléaires dans le domaine du contrôle des fondations profondes et des comblements de cavités souterraines. *Bull. des Laboratoires des ponts et chaussées*, n° 228, réf. 4337, 2000, p. 87-98.
- Khire M., Benson C., Bosscher P.-. Water Balance Modeling of Earthen Final Covers. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 123(8), 1997, p. 744-754.
- Mantho A-T. - Échange sol-atmosphère. *Application à la sécheresse*. Thèse de doctorat de l'École nationale des ponts et chaussées, 2005, 250 p.
- Martin R., Meillier D. - Instrumentation du site de Roquevaire (13). Un système d'acquisition autonome développé autour d'une canne de mesure de teneurs en eau du sol. Rapport interne BRGM/RP-MODEM2-FR, 2002, 35 p.
- Molz F.J., Remson I. - Extraction term models of soil moisture use by transpiring plants. *Water Resour. Res.*, 6(5), 1970, p. 1346-1356.
- Penman H.L. - Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Meteorol. Soc.*, London, A 193, 1948, p. 120-145.
- Pereira dos Santos L.A. - *Développement d'une nouvelle méthode de détermination des profils de teneur en eau dans les sols par inversion d'un signal TDR*. Thèse de l'université Joseph Fourier, Grenoble I, LTHE, 1997, 354 p.
- Tanner C.B. - Energy balance approach to evapo-transpiration from crops. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.* 24, 1960, p. 1-9.
- Vrugt J.A., Hopmans J.W., Simunek J. - Calibration of a two-dimensional root water uptake model. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 65, 2001, p. 1027-1037.
- Whisler F.D., Klute A., Millington R.J. - Analysis of steady state evapotranspiration from a soil column. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 32, 1968, p. 167-174.
- Wilson G.W., Fredlund D.G., Barbour S.L. - Coupled soil-atmosphere modelling for soil evaporation. *Can. Geotech J.*, n° 31, 1994, p. 151-161.
- Xu Q., Qiu C.J. (1997). A variational method for computing surface heat fluxes from ARM surface energy and radiation balance system. *Journal of Applied Meteorology*, 36(1), 1997, p. 3-11.

Caractérisation au laboratoire de la sensibilité au retrait-gonflement des sols argileux

M. AUDIGUIER
Z. GEREMEW
S. LARIBI
R. COJEAN

Centre de géosciences,
École des mines de Paris,
Bâtiment IFI, UMLV,
Cité Descartes
77454 Marne-la-Vallée
cedex 2

martine.audiguier@ensmp.fr
zemenu.geremew@ensmp.fr
saoussen.laribi@ensmp.fr
roger.cojean@ensmp.fr

Résumé

La présence de plusieurs formations argileuses affleurantes ou sub-affleurantes en région parisienne classe cette région parmi les plus vulnérables à la sécheresse géotechnique. Deux formations sont plus particulièrement concernées : les Argiles vertes de Romainville et les Marnes bleues d'Argenteuil. Elles sont responsables du plus grand nombre de sinistres enregistrés sur le bâti depuis la loi du 13 juillet 1982 qui reconnaît la sécheresse géotechnique comme catastrophe naturelle. Une diminution anormale du taux d'humidité du sol entraîne un phénomène de retrait, suivi lors des précipitations suivantes, d'un phénomène de gonflement dû à une réhumidification. C'est la conjugaison de ces deux facteurs (retrait et gonflement) qui est responsable des désordres observés sur le bâti.

En prenant appui sur ces deux formations, une étude des facteurs de prédisposition au phénomène de retrait-gonflement des sols a été menée portant sur les caractéristiques minéralogiques, microstructurales, géotechniques et hydromécaniques. Cette étude met en évidence l'importance des minéraux argileux et plus particulièrement des smectites sur le phénomène de retrait-gonflement et sur les transformations microstructurales qui en découlent. Elle souligne aussi le rôle que peuvent jouer d'autres minéraux (carbonates, pyrite) présents dans le sol sur l'évolution microstructurale du matériau naturel ou remanié, lors de l'hydratation.

Les principaux paramètres géotechniques rendant compte de l'activité d'un sol argileux sont énoncés et quelques classifications basées sur ces paramètres sont données en exemple.

Enfin l'évolution de la microstructure de ces matériaux au cours des cycles séchage-humidification est analysée.

Mots-clés : sols argileux, sécheresse géotechnique, retrait-gonflement, minéralogie, microstructure, courbes de rétention, porosimétrie, microscope électronique à balayage, cycles séchage-humidification, gonflement libre.

Laboratory characterization of clayed soils to shrinkage-swelling susceptibility

Abstract

The presence of expansive soils in some parts of the Paris area makes this area one of the most highly affected by drought-induced geotechnical problems. Among these soils, the green clays of Romainville ("Argiles vertes de Romainville") and the blue marls of Argenteuil ("Marnes bleues d'Argenteuil") are responsible for the large amount of damage to buildings as recorded since the swelling-shrinkage phenomenon was recognized as a "natural catastrophe" according to the law dated 13th July 1982. The shrinkage of the clayey soils while water is abnormally evaporated during the summer season is followed by swelling while water infiltrates as a consequence of a long period of rainfall during the autumn or winter seasons. The combination of shrinkage and swelling results in damage observed on the buildings.

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 30 avril 2008.

Both formations were analysed in the laboratory by reference to shrinkage and swelling susceptibility. For this purpose, the mineralogy, the microstructure, the geotechnical and some hydromechanical parameters were characterized. This study highlights the importance of clay minerals, more particularly smectites, on the swelling-shrinkage behaviour of soils as well as on the resulting microstructural transformations. It underlines also the role of other minerals (carbonates, pyrite) on the microstructural evolution of the intact or remolded soils during the hydration process.

The principal geotechnical parameters for characterising the activity of a clay soil are stated and some classifications based on these parameters are given as examples. Finally the microstructural evolution of these materials during cycles of wetting and drying is studied.

Key words: clay soil, geotechnical drought, shrinkage-swelling, mineralogy, microstructure, soil water retention curve, porosimetry, scanning electron microscopy, wetting-drying cycles, free swelling.

1

Introduction

La sécheresse géotechnique est à l'origine de nombreux sinistres enregistrés en France sur les bâtiments et plus particulièrement sur les maisons individuelles fondées superficiellement.

Elle résulte de l'évolution anormale du profil hydrique des sols vers des faibles teneurs en eau après des périodes de sécheresse climatique relativement longues ou survenant alors que l'état hydrique du sol n'est pas encore revenu à son profil d'équilibre. La sécheresse géotechnique se traduit par un phénomène de retrait des sols argileux suivi, à l'épisode de précipitations suivantes, par un phénomène de gonflement dû à une réhumidification.

La répétition des cycles de retrait-gonflement est responsable des désordres observés sur le bâti. En effet, à la fin de chaque cycle le sol ne revient pas totalement à l'état précédent, il subit des transformations microstructurales irréversibles qui sont responsables de déformations à l'échelle macroscopique. Ces dernières ont pour conséquence des mouvements du bâti compensés en partie d'une saison à l'autre, mais qui globalement ont tendance à s'amplifier au cours du temps. Ainsi il peut s'écouler plusieurs mois, voire plusieurs saisons, avant que les premiers désordres n'apparaissent.

Un changement de l'état hydrique du sol se traduit généralement par des variations de volume dont l'origine provient de deux types de phénomènes :

- d'une part, des phénomènes physico-chimiques dus aux interactions entre l'eau interstitielle, la matrice poreuse et les particules argileuses ;
- d'autre part, des phénomènes hydromécaniques découlant de l'histoire des contraintes subies par le matériau au cours des temps géologiques.

Ainsi à un état de contrainte totale donné, un changement dans l'environnement hydrique d'un sol conduit à une modification de la pression interstitielle ou de la succion qui, dans un sol saturé, est directement liée à une variation de l'état de contrainte effective par la relation de Terzaghi. Cette variation de contrainte effective est responsable d'une variation de volume. Dès que le sol se désature, il est nécessaire de prendre en compte

les effets combinés liés aux variations de deux variables de contraintes indépendantes : la contrainte nette ($\sigma - u_a$) et la succion ($u_a - u_w$). La variation de volume est obtenue par le biais de modèles de comportement des sols non saturés de type surface d'état : $e = F(\sigma - u_a, u_a - u_w)$ (Matyas et Radhakrishna, 1968) ou élastoplastique (modèle BBM, Alonso *et al.*, 1990).

L'Ile-de-France, constituée essentiellement de formations d'âge tertiaire où alternent des formations calcaires, gypseuses et argileuses (Fig. 1) est une des régions les plus touchées avec la région Midi-Pyrénées et la région Poitou-Charente.

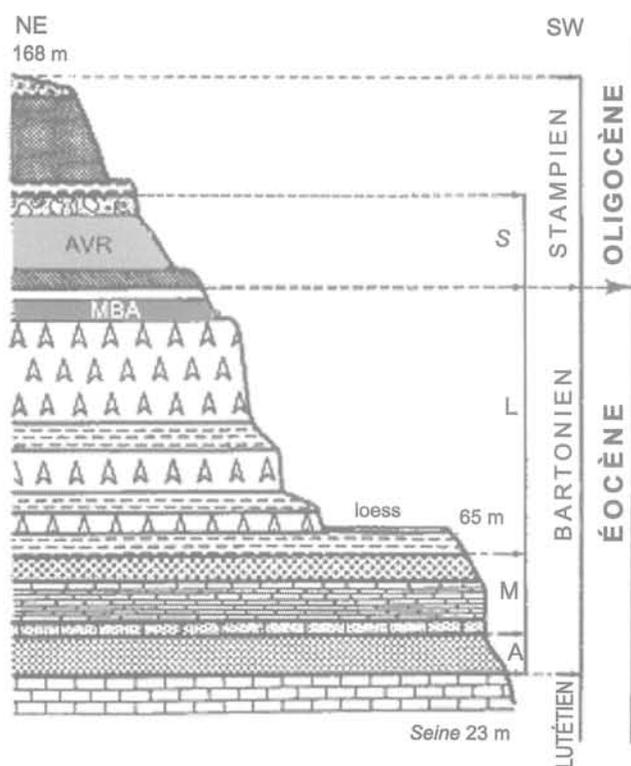


FIG. 1 Coupe géologique de la butte de Corneilles-en-Parisis et localisation des Argiles vertes de Romainville (AVR) et des Marnes bleues d'Argenteuil (MBA).

Geological section of Argiles vertes de Romainville (AVR) and Marnes bleues d'Argenteuil (MBA).

Parmi ces formations argileuses deux sont plus particulièrement sensibles au retrait-gonflement. Il s'agit des Marnes bleues d'Argenteuil (MBA) appartenant au Ludien supérieur, étage de l'Éocène supérieur et des Argiles vertes de Romainville (AVR) appartenant au Stampien inférieur, étage de l'Oligocène inférieur. Elles sont présentes sur l'ensemble de l'Île-de-France et leur profondeur variable résulte du contexte géomorphologique. La vulnérabilité au retrait-gonflement de ces formations est d'autant plus grande qu'elles sont à l'affleurement, ou sous faible recouvrement, ou en situation de pente.

Les travaux présentés dans cet article s'appuient essentiellement sur l'Argile verte de Romainville. Les Marnes bleues d'Argenteuil ne sont citées qu'à titre de comparaison pour souligner le rôle joué par la minéralogie dans le comportement des sols soumis à des sollicitations hydriques.

En prenant appui sur les résultats d'essais, les principales caractérisations au laboratoire de l'aptitude au retrait gonflement sont passées en revue et les conséquences de ce phénomène sur les modifications microstructurales sont étudiées. Les aspects hydromécaniques sont abordés à travers l'étude microstructurale d'échantillons d'Argile verte de Romainville soumis à des cycles successifs de séchage - humidification.

2

Minéralogie des sols argileux

2.1

Les minéraux argileux

De par leurs propriétés cristalochimiques et électriques, les minéraux argileux jouent un rôle déterminant dans le processus de retrait-gonflement. Ils font partie de la famille des phyllosilicates et présentent donc une structure en feuillets. Le feuillet élémentaire est constitué de deux couches :

– la couche tétraédrique (couche T) formée par des tétraèdres dont les bases sont coplanaires et les sommets orientés dans une même direction. Ils forment un réseau plan à maille hexagonale. Les sommets sont occupés par des anions O^{2-} qui enserrant au centre un cation Si^{4+} ;

– la couche octaédrique (couche O) constituée par deux plans d'anions O^{2-} ou OH^- disposés en assemblage hexagonal compact. Le centre des octaèdres est occupé généralement par un cation Al^{3+} .

Les cations peuvent être substitués par des cations de valence moindre, Si^{4+} par Al^{3+} ou Fe^{3+} ou Fe^{2+} ... ; Al^{3+} par Fe^{3+} ou Fe^{2+} ou Mg^{2+} ... Les deux couches sont interdépendantes : les O^{2-} des sommets des tétraèdres sont partagés avec un plan de la couche octaédrique.

L'assemblage de ces deux couches permet de définir plusieurs types de feuillets élémentaires qui constituent différentes familles de minéraux argileux.

Trois familles principales seront abordées ici :

– la famille de la kaolinite (Fig. 2) est constituée d'une couche T et d'une couche O et ne présente que peu ou pas de substitution. L'épaisseur du feuillet élémentaire est de 7 Å.

Les particules argileuses se présentent sous forme de cristallites par association de plusieurs feuillets reliés entre eux par des liaisons hydrogènes ne laissant aucune possibilité de passage aux molécules d'eau (Tessier, 1984). Elles forment ainsi des plaquettes rigides de quelques centaines de nanomètres à quelques microns d'extension et de quelques dizaines de nanomètres d'épaisseur ;

– la famille de l'illite (Fig.3) de type TOT est constituée d'une couche octaédrique entourée de deux couches tétraédriques. Le feuillet élémentaire a une épaisseur de 10 Å. Ce feuillet élémentaire présente des substitutions isomorphiques dans la couche T (Si par Al) et/ou dans la couche O (Al par Mg, Mg par Li, ...) créant ainsi un déficit de charge comblé par des cations K^+ qui ont exactement la dimension des cavités de surface du feuillet où ils sont piégés et qui servent de lien entre les feuillets. Cette liaison par le cation K^+ est si forte que les molécules d'eau ne peuvent accéder à l'espace interfoliaire. Les cations K^+ sont non hydratés et non échangeables (Tessier, 1984). Les particules d'illite se présentent aussi, comme la kaolinite, sous forme de cristallites de quelques dizaines de feuillets ;

– la famille des smectites (Fig. 3) est de même configuration que la précédente mais présente un déficit de charge plus faible, comblé dans l'espace interfoliaire par des cations compensateurs hydratés tel que le sodium (Na^+) ou le calcium (Ca^{++}). L'épaisseur des feuillets varie généralement entre 12 et 20 Å selon la nature et l'hydratation du cation. La liaison entre les feuillets, de faible énergie, est assurée par les cations compensateurs. Les particules de smectite sont caractérisées par une grande extension (1µm) par rapport à l'épaisseur, leur conférant un aspect rubané (Fig. 4).

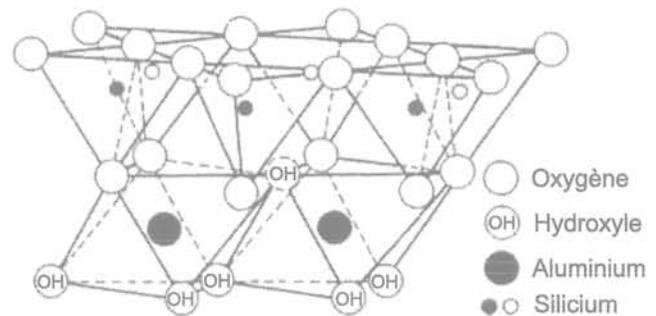


Fig. 2 Schéma structural de la kaolinite (d'après Mitchell et Soga, 2005).

Diagram of the kaolinite structure (after Mitchell and Soga, 2005).

A ces trois familles principales s'ajoute celle des interstratifiés qui regroupe les minéraux argileux formés par une succession de feuillets élémentaires appartenant à deux familles d'argiles différentes. Il existe deux types d'interstratifiés, les interstratifiés réguliers : alternés (ABAB) ou ségrévés (AAABBB) et les interstratifiés irréguliers dont l'empilement des feuillets ne présente aucune périodicité. Les interstratifiés illite-smectite, de différents types, sont très fréquents dans les sols argileux présentant une aptitude au retrait-gonflement.

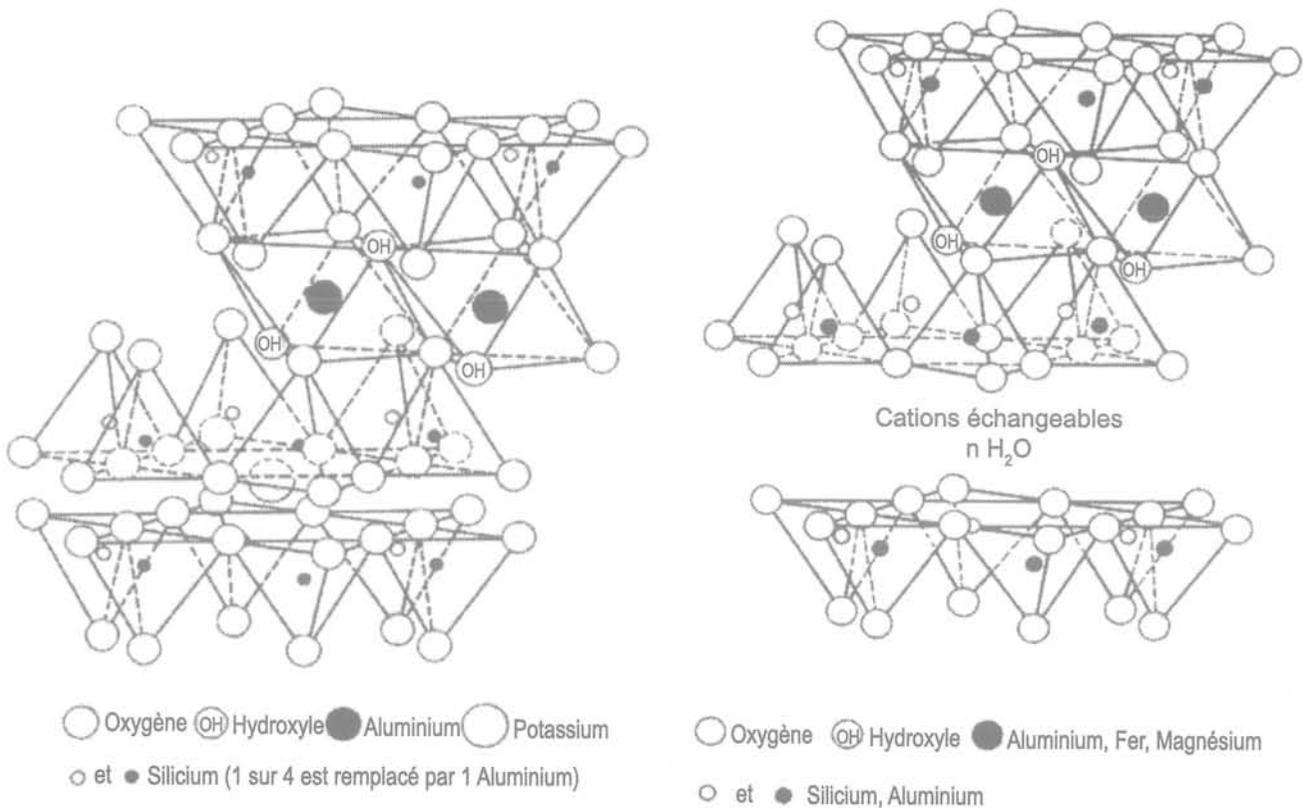


FIG. 3 Schémas structural de l'illite (gauche) et des smectites (droite), (d'après Mitchell et Soga, 2005).
Diagrams of the illite structure (left) and smectite structure (right), (after Mitchell and Soga, 2005).

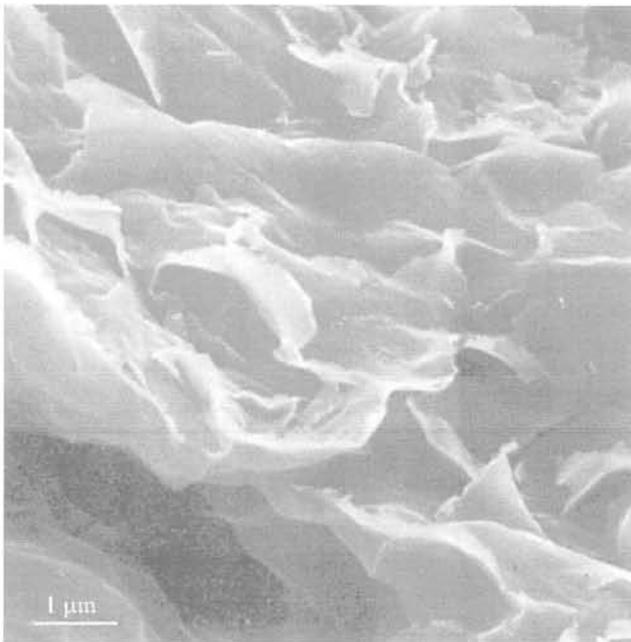


Fig. 4 Image en microscopie à balayage de smectite (d'après Tovey 1971, dans Mitchell J. K. 1976).
SEM picture of smectite (after Tovey 1971, in Mitchell J.K. 1976).

Les minéraux argileux contenus dans les Argiles vertes de Romainville et les Marnes bleues d'Argenteuil sont représentés par de l'illite, de la kaolinite, des smectites et des interstratifiés illite-smectite.

2.2

Relation eau-particules argileuses

Comme il a été souligné dans le paragraphe précédent le processus d'hydratation affecte essentiellement les smectites. Il comporte différentes échelles :

- le déficit de charge des particules argileuses leur confère un pouvoir d'adsorption de dipôles d'eau sur leur surface externe. Dans le cas des smectites, à la surface externe s'ajoute la surface interne (ou interfoliaire) qui, étant donné la morphologie des particules, peut être considérable. Ceci est mis en évidence par les travaux de Saiyouri *et al* (2000, 2004) synthétisés dans le graphe de la figure 5 (Delage, 2007). L'étude de la diffraction RX aux petits angles de l'hydratation d'une smectite MX80 compactée, dont les résultats sont analysés à partir du modèle probabiliste de Pons (Pons *et al.*, 1981), montre qu'au fur et à mesure de l'hydratation (et de la diminution de la succion à laquelle est soumise l'échantillon), la distance entre les feuillets élémentaires augmente par adsorption progressive de couches d'eau. Ainsi pour une succion inférieure à 50 MPa l'hydratation intraparticulaire passe de une à deux couches d'eau, à partir de 7 MPa elle est de trois couches pour atteindre quatre couches dans le cas d'une suc-

cion quasi nulle. Dans le même temps les particules se divisent et leur épaisseur passe de plusieurs centaines de feuillets à une dizaine, augmentant ainsi de façon considérable l'espace interparticulaire accessible à l'eau ;

– à l'échelle de l'agrégat, prend place l'eau adsorbée par condensation capillaire aux points de contact entre les particules ou les agrégats (Prost, 1990 ; Van Damme, 2002).

Certains auteurs (Durand, 1995 ; Qi, 1996) parlent d'eau interne à l'échelle de la particule et d'eau externe à l'échelle de l'agrégat et entre les agrégats. La proportion d'eau interne et externe dépend de la nature de l'argile, des cations échangeables, de la température et de la salinité de l'électrolyte. Ainsi la présence de Na^+ et Mg^{2+} favorise l'eau interne. A l'opposé les cations Ca^{2+} et K^+ favorisent l'eau externe. De même, de fortes températures ou salinités sont défavorables à l'adsorption d'eau interne (Turki, 1987).

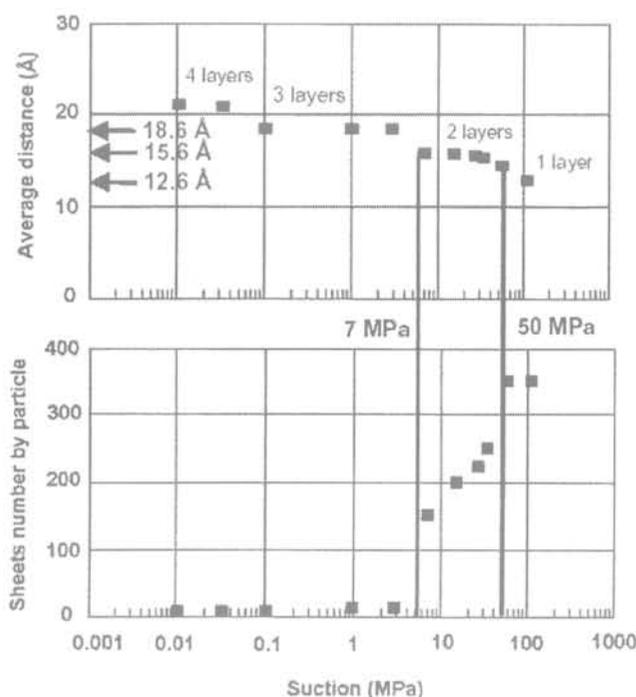


Fig. 5 Effet d'une diminution de la succion (par hydratation) sur l'argile MX80 : augmentation du nombre de couches d'eau adsorbée, diminution du nombre de feuillets par particule (d'après Saiyouri *et al.*, 2000, 2004, dans Delage, 2007).
Effect of a suction decrease (due to hydration) on the MX80 particles: increase in the number of adsorbed water layers, decrease in the number of stacked layers per particle (after Saiyouri *et al.*, 2000, 2004, in Delage, 2007).

2.3

Minéraux non argileux

Les sols argileux sont composés, outre les argiles, d'autres minéraux en proportions variables qui sont susceptibles de jouer également un rôle dans le processus de retrait-gonflement. Ainsi, la plupart des sols argileux de la région parisienne contiennent des carbonates sous forme de calcite et de dolomite. Afin d'il-

lustrer le rôle joué par ces minéraux dans le processus de retrait-gonflement, sont présentés ici des résultats d'essais réalisés sur les deux formations évoquées en introduction : l'Argile verte de Romainville (AVR) et la Marne bleue d'Argenteuil (MBA) (Tableau I).

TABEAU I Caractéristiques minéralogiques, géotechniques et mécaniques de l'Argile verte de Romainville et de la Marne bleue d'Argenteuil.

Mineralogical, geotechnical and mechanical characteristics of Argile verte de Romainville and Marne bleue d'Argenteuil.

Formations	Argiles vertes de Romainville	Marnes bleues d'Argenteuil
Argiles	K, I, Interstratifiés I/S.	K, I, S.
% Carbonates	15-20	30-60
% < 2µm	80-90	80-90
Limite de liquidité W_L %	75	85
Indice de plasticité I_p %	30-35	40-50
Indice de retrait I_r %	55-60	65-75
Gonflement libre état naturel %	15-25	4
Gonflement libre état remanié %	>30	26

Ces deux formations sont des matériaux fins dont le pourcentage de particules inférieures à 2 µm est supérieur à 80 %. Leur composition minéralogique est voisine ; outre les minéraux argileux évoqués dans le paragraphe précédent, les autres minéraux présents sont essentiellement du quartz et des carbonates : calcite et dolomite en proportions variables. Ces carbonates sont plus représentés dans les Marnes bleues d'Argenteuil. Les limites d'Atterberg (w_L , I_p , I_r ...) les classent dans les matériaux à fort potentiel de gonflement (voir tableau I).

Des essais de gonflement libre ont été réalisés sur des échantillons intacts et des échantillons remaniés à la limite de liquidité et ramenés à la teneur en eau initiale. Dans cet essai, un échantillon est placé dans un moule oedométrique, sous une charge très faible (de l'ordre du poids du piston) en contact, par l'intermédiaire d'une pierre poreuse, avec de l'eau à la pression atmosphérique. Le taux de gonflement libre, rapport entre la déformation maximale de l'éprouvette et la hauteur initiale, est mesuré.

Les résultats de ces essais montrent que les gonflements libres des échantillons de AVR intacts et remaniés ne varient que de quelques pourcents avec cependant un résultat légèrement supérieur dans le cas de l'échantillon remanié. Pour les échantillons de MBA le gonflement de l'échantillon remanié est six fois plus grand que celui de l'échantillon intact. Ce résultat peut certainement être attribué à la présence des carbonates dont le pourcentage est plus important dans les échantillons de MBA que dans les échantillons de AVR. Ces minéraux contribuent à l'édification d'un squelette rigide qui s'oppose au gonflement, mais qui est néanmoins fragile puisque détruit par le remaniement.

La pyrite est présente de façon accessoire, généralement concentrée en amas ou lit (Fig. 6). La pyrite s'oxyde en présence d'oxygène pour donner des sulfates qui par association avec des ions Ca^{2+} forment de l'anhydrite (CaSO_4). En présence d'eau l'anhydrite se

transforme en gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Ces transformations sont responsables de pressions de gonflement et de taux de gonflement importants, phénomènes connus et redoutés des géotechniciens car souvent à l'origine de désordres dans les terrassements.

3

Microstructure des sols argileux

3.1

Définitions

Dans les sols argileux, les particules argileuses et les grains minéraux non argileux, en proportions variables, forment un arrangement structural illustré par la représentation schématique de Collins et Mc Gown (1974) (Fig. 7). Dans les sols de faible densité, les minéraux se rassemblent pour donner une structure en agrégats plus ou moins réguliers, formés par des argiles et/ou des grains minéraux. Ces agrégats sont reliés par des ponts argileux. Dans les sols plus denses, la notion de structure en agrégats n'est plus applicable car les agrégats ne sont plus distincts les uns des autres, on parle alors de structure matricielle à dominante argileuse ou granulaire.

La plupart des auteurs, sous des terminologies différentes (Yong, 1999 ; Gens et Alonso, 1992), s'accordent à définir un schéma d'organisation des sols gonflants en trois niveaux structuraux qui jouent un rôle déterminant dans le processus de retrait-gonflement. (Fig. 8) :

– infrastructure = particule argileuse ;

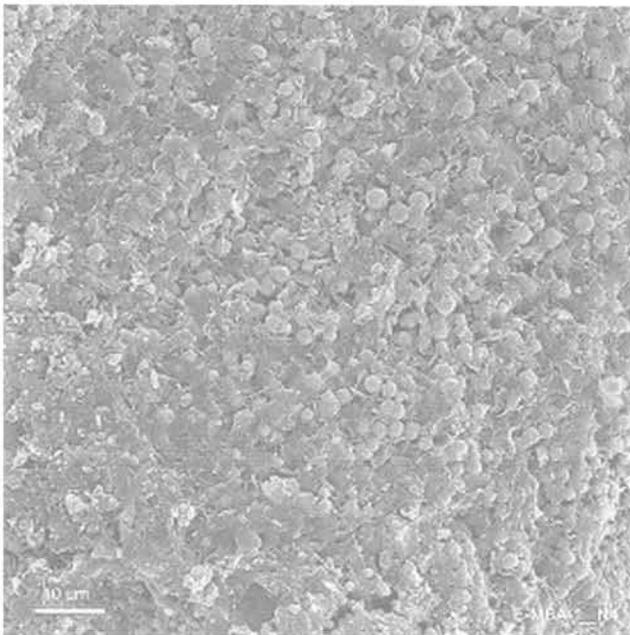


Fig. 6 Image prise au MEB d'amas de grains de pyrite dans la Marne bleue d'Argenteuil.
SEM picture of pyrite lens in marne bleue d'Argenteuil.

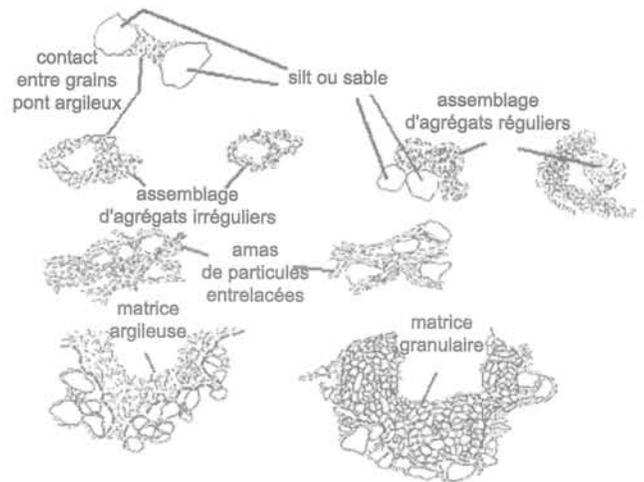


Fig. 7 Représentations schématiques d'assemblages de particules argileuses et de grains non argileux (d'après Collins et Mc Gown, 1974).

Schematic representations of particle aggregations of clay particles and no clayey grains (after Collins and Mc Gown, 1974).

– microstructure = agrégats (clusters en anglais) formés par les particules argileuses et les autres composants du sol ;

– macrostructure = assemblage macroscopique des agrégats formant les « peds ».

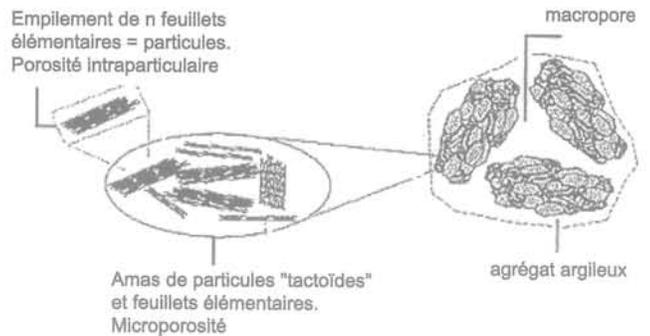


Fig. 8 Organisation des particules argileuses (d'après Yong, 1999).

Clay particles organization (after Yong, 1999).

Cet arrangement structural détermine la forme et la taille du réseau poreux associé. A partir d'un sol contenant essentiellement des minéraux argileux de type smectitique, Touret (1990) a défini trois classes ou familles de pores (Fig. 9) qui sont aussi applicables à des sols contenant une phase granulaire :

– la porosité interfoliaire et lenticulaire ou intraparticulaire ;

– la porosité interparticulaire ou intra agrégat ;

– la porosité interagrégat.

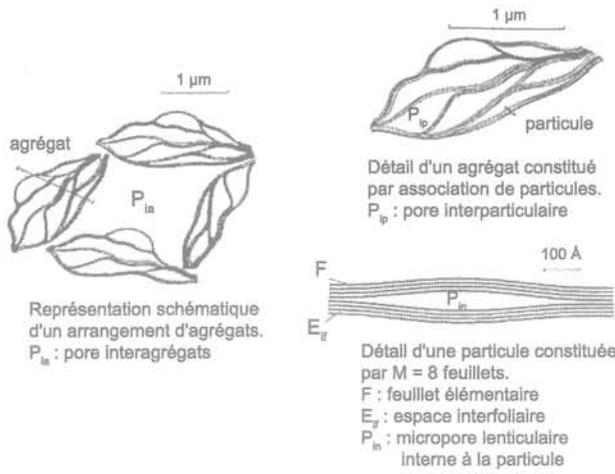


Fig. 9 Représentation schématique des différents types de pores dans des smectites (d'après Touret, 1990).
Schematic representation of pore families in smectite (after Touret, 1990).

La taille moyenne des différentes classes varie suivant les auteurs. Cependant, en s'appuyant sur une synthèse de résultats bibliographiques, Al-Mukhtar *et al.* (1996), Robinet *et al.* (1996) donnent les valeurs moyennes suivantes : 1 à 2,5 nm pour la porosité intraparticulaire, 2,5 à 150-200 nm pour la porosité interparticulaire et supérieure à 150-200 nm pour la porosité interagrégat.

3.2

Exemples

A titre d'exemple, les caractérisations structurales de l'état naturel de l'Argile verte de Romainville (AVR, $w = 25\%$) et de la Marne bleue d'Argenteuil (MBA,

$w = 30\%$) sont présentées, ainsi que celles de l'Argile verte de Romainville sous deux configurations lithologiques différentes. Ces caractérisations sont, d'une part, qualitatives à partir de l'observation au microscope électronique à balayage (MEB) et, d'autre part, quantitatives par la mesure de la distribution des diamètres d'accès de pores par porosimétrie au mercure, en se référant à la loi de Jurin appliquée à un modèle de pores cylindriques (Fig. 10 et 11).

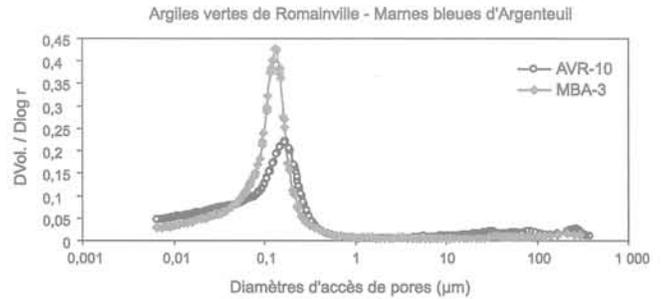
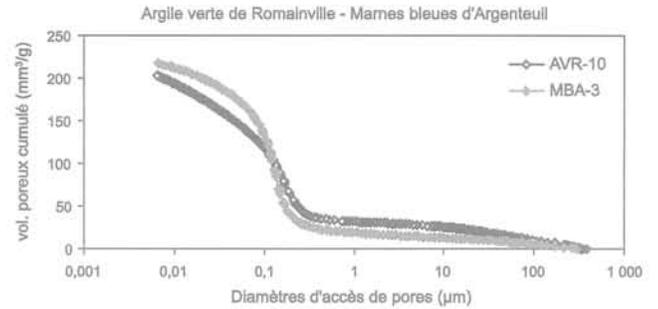


Fig. 10 Courbes cumulées et dérivées de distribution des diamètres de pores de l'Argile verte de Romainville et des Marnes bleues d'Argenteuil.
Cumulative and derived curves of pore size distribution of argile verte de Romainville and marnes bleues d'Argenteuil.

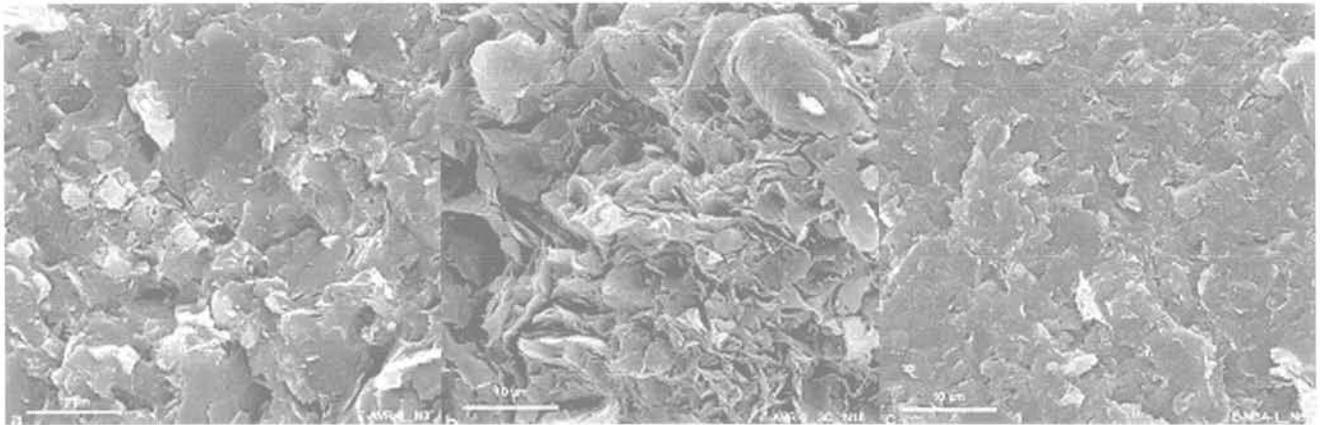


Fig. 11 Images au MEB. a) Argile verte de Romainville : plan parallèle au litage, b) Argile verte de Romainville : plan perpendiculaire au litage, c) Marne bleue d'Argenteuil : plan parallèle au litage.
SEM micrograph. a) Argile verte de Romainville : view parallel to the bedding, b) Argile verte de Romainville : view perpendicular to the bedding, c) Marne bleue d'Argenteuil : view parallel to the bedding.

Les distributions obtenues sur les deux formations sont unimodales centrées entre 100 et 200 nm. Elles présentent une queue de distribution vers les petits diamètres, dénotant une porosité interparticulaire et intraparticulaire non accessible par la porosimétrie au mercure. Ces courbes sont caractéristiques d'une structure matricielle argileuse (Audiguier et Delage, 1987) dans laquelle l'architecture en agrégats n'apparaît pas. L'observation des deux formations au MEB montre que la microstructure est compacte et qu'elle présente un arrangement préférentiel des particules argileuses parallèlement au litage.

La comparaison des courbes de distributions de l'Argile verte de Romainville intacte ($w = 25\%$) et sous forme de colluvions argileuses ($w = 32\%$) (Fig. 12) met en évidence l'existence d'une famille vers les très faibles diamètres (porosités inter et intraparticulaire), dans le cas des colluvions. Cette famille dénote une déstructuration du matériau qui favorise l'apparition de particules argileuses dispersées ou sous forme d'amas de quelques particules.

Afin de mettre en évidence les changements de microstructure au cours du séchage ou de l'humidification, trois échantillons d'Argile verte de Romainville ont été étudiés à différents états hydriques :

- séché à l'étuve ;
- naturel (teneur en eau 25 %), lyophilisé : la lyophilisation est une méthode de déshydratation qui consiste en une congélation rapide des échantillons dans de l'azote liquide amené à son point de congélation ($-210\text{ }^{\circ}\text{C}$) par application du vide, suivi d'une phase de sublimation sous vide en plaçant les échantillons dans un lyophilisateur (Delage et Pellerin, 1984) ;
- après gonflement libre (teneur en eau 39 %), lyophilisé.

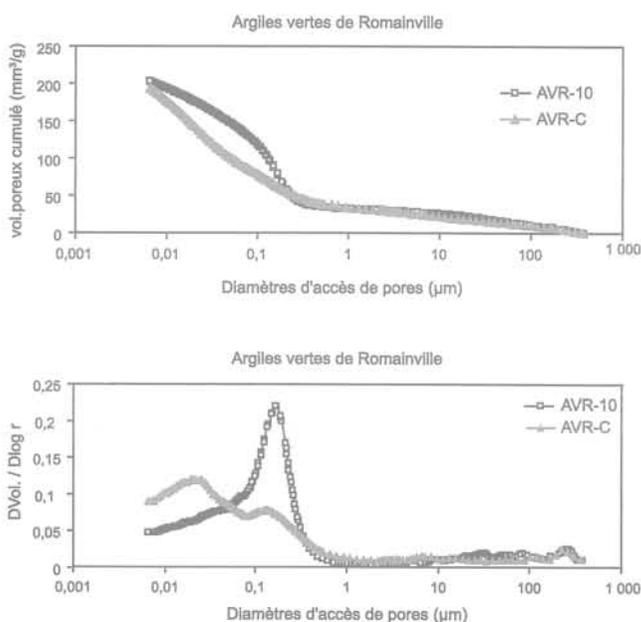


Fig. 12 Courbes cumulées et dérivées de distribution des diamètres de pores de l'Argile verte de Romainville à l'état naturel (AVR-10) et à l'état de colluvion (AVR-C).

Cumulative and derived curves of pore size distribution of Argile verte de Romainville in natural state (AVR-10) and in colluvium state (AVR-C).

Sur les figures 13a et b sont représentées respectivement les courbes porosimétriques cumulées et dérivées des trois états hydriques et sur les figures 14a, b, c les images correspondantes obtenues au MEB.

Le volume poreux, rapporté au poids sec, de l'échantillon séché à l'étuve est de $130\text{ mm}^3\text{g}^{-1}$ pour un diamètre moyen de 40 nm. La microstructure correspondante est très compacte et le réseau poreux pratiquement inexistant à l'échelle de l'observation au MEB. L'ensemble des amas de particules s'est rétracté à l'échelle microscopique, ce phénomène se traduisant par l'apparition de fissures de rétraction à l'échelle macroscopique.

L'échantillon naturel lyophilisé présente un volume poreux rapporté au poids sec de l'ordre de $200\text{ mm}^3\text{g}^{-1}$ pour un diamètre moyen d'accès de pores de 150 nm. L'observation au MEB met en évidence l'ouverture de microfissures de gonflement (porosité bidimensionnelle) qui initient dans la matrice argileuse la formation d'agrégats primaires ou qui révèlent une structure en agrégats déjà existante mais en partie oblitérée dans l'échantillon séché sous l'effet de la rétraction. Parallèlement à cela, les cristallites ou amas de particules commencent à se détacher les uns des autres.

L'échantillon gonflé librement a un volume poreux rapporté au poids sec de $337\text{ mm}^3\text{g}^{-1}$ pour une distribution des diamètres d'accès de pores présentant deux classes bien individualisées ; une centrée sur 650 nm, l'autre vers 55 nm. L'analyse au MEB met en évidence des microfissures de grande extension, d'épaisseur micrométrique, recoupées par d'autres plus petites

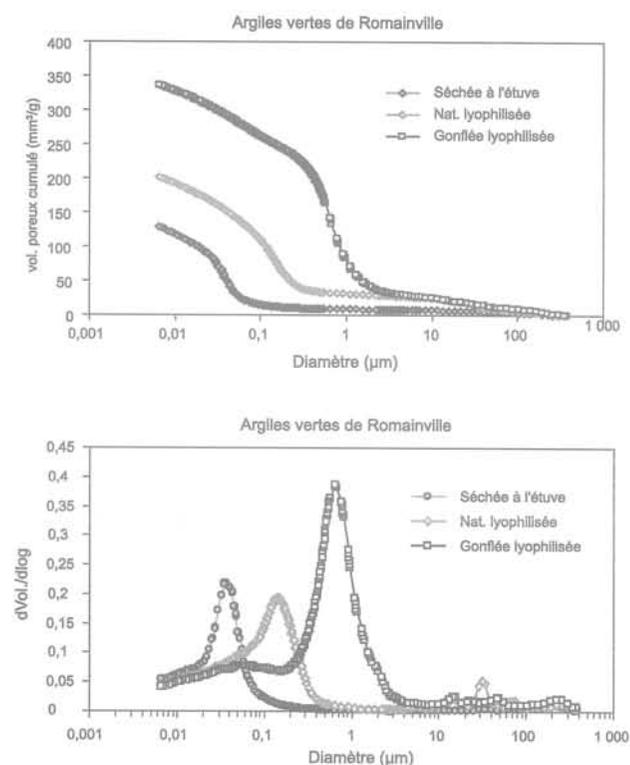


Fig. 13 Courbes cumulées et dérivées de distribution des pores de l'Argile verte de Romainville pour trois états d'hydratation.

Cumulative and derived curves of pore size distribution of Argile verte de Romainville for three hydration states.

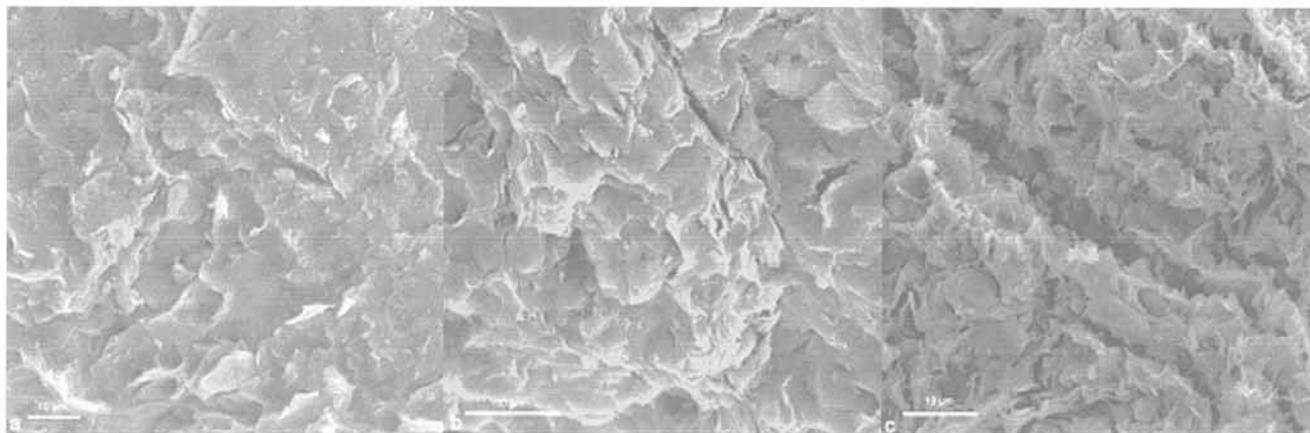


Fig. 14 Images au MEB de l'Argile verte de Romainville : a) état sec ; b) état naturel lyophilisé ; c) après gonflement libre et lyophilisation.
SEM micrograph of Argile verte de Romainville: a) dry state; b) lyophilized natural state; c) after free swelling and lyophilization.

qui subdivisent les agrégats. Les cristallites se détachent les uns des autres et les grains de carbonates ou de quartz enrobés et disséminés dans la matrice argileuse sont mis à nus.

A partir de cette analyse les conclusions suivantes peuvent être établies :

- au cours de l'hydratation la porosité augmente en taille et en volume par ouverture progressive et simultanée des porosités inter et intra-agrégat primaires, confondues à l'état déshydraté, générant ainsi des agrégats secondaires ;
- le processus de subdivision des agrégats se poursuit jusqu'à atteindre des amas de quelques particules, initiant ainsi une famille de pores intra-agrégat ou inter-particulaires distincte ;
- la queue de distribution vers les faibles diamètres commune aux 3 états d'hydratation dénote l'existence d'une porosité intraparticulaire non accessible par la porosimétrie au mercure.

4

Caractéristiques géotechniques

Cette caractérisation repose, d'une part, sur les mesures des paramètres d'état (teneur en eau, poids volumiques humide et sec, porosité ou indice des vides) et des paramètres de nature (granularité, minéralogie) et, d'autre part, sur d'autres grandeurs qui rendent compte de l'activité du sol. En effet, la fraction argileuse < 2µm possède en présence d'eau des propriétés de surface (cohésion, plasticité, retrait, gonflement) regroupées sous le terme « activité ». Ces propriétés résultent à la fois de la finesse des particules (argile au sens granulométrique) qui leur confère une grande surface spécifique externe, mais aussi de leur structure en feuillets (argiles au sens minéralogique) qui leur permet de développer de grandes surfaces spécifiques externe et interne et qui présente un déficit de charge responsable des propriétés d'adsorption de cations et de molécules d'eau.

Trois principaux essais rendent compte de ces propriétés : les limites d'Atterberg, l'essai d'adsorption au bleu de méthylène, la mesure de capacité d'échange cationique.

Les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau mesurées de façon conventionnelle qui séparent différents états du sol. La limite de liquidité w_L sépare l'état liquide de l'état plastique et est mesurée par l'essai à la coupelle de Casagrande ou par la méthode du cône de pénétration (NF : P 94-051, P 94-052-1). La limite de plasticité w_p sépare l'état plastique de l'état solide et est obtenue par la méthode du rouleau (NF : P 94-051). Enfin, la limite de retrait w_r sépare l'état solide avec retrait de l'état solide sans retrait sur échantillon remanié ou intact. Elle est obtenue par la construction graphique volume-teneur en eau schématisée sur la figure 15 et fait l'objet comme les essais précédents de deux normes (XP P94-060-1 et XP P94-060-2).

A partir de ces trois grandeurs d'autres paramètres sont définis :

- l'indice de plasticité : $I_p = w_L - w_p$;
- l'indice de consistance : $I_c = (w_L - w_{nat}) / I_p$;
- l'indice de retrait : $I_r = w_L - w_r$;
- l'activité de Skempton : $A = I_p / < 2\mu\text{m}$.

Un sol aura une aptitude au gonflement d'autant plus importante que w_r , I_p , I_r , A seront grands et w_p et w_r petits. Le tableau II présente des valeurs de quelques paramètres concernant les familles d'argiles les plus courantes. Les smectites sodiques ont la plus grande aptitude au gonflement

L'essai d'adsorption de bleu de méthylène (NF P 94-068) mesure la quantité de bleu nécessaire pour recouvrir d'une couche monomoléculaire par chimisorption, les surfaces internes et externes des particules présentant un déficit de charge (minéraux argileux et colloïdes essentiellement). Cette quantité de bleu adsorbée permet de mesurer la surface spécifique développée par les minéraux (Iran, 1977).

La capacité d'échange de cations est due aux effets de bords des feuillets et aux déficits de charge à l'intérieur de la structure provenant de substitutions d'ions de valence n par des ions de valence $n-1$. Cette mesure peut être réalisée par des essais normalisés (NF X 31-130) ou évaluée à partir d'un essai plus courant en géotechnique, l'essai au bleu de méthylène (Cuisset, 1980 ; Laribi *et al.*, 2007).

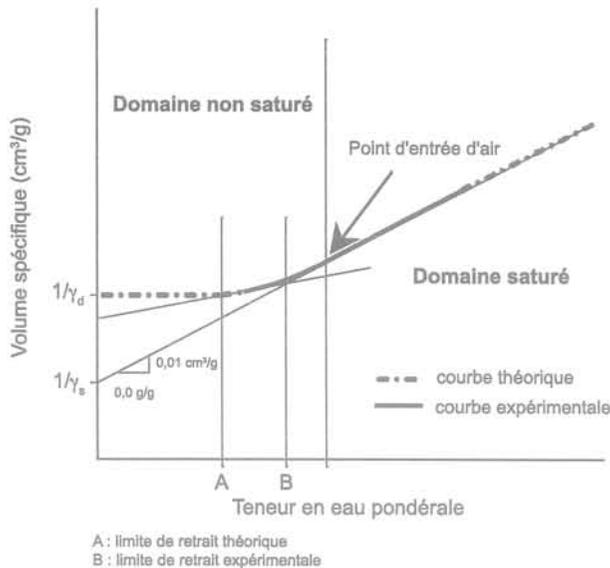


Fig. 15 Représentation schématique de la courbe de retrait.
Schematic representation of a shrinkage curve.

Des classifications permettant d'estimer le potentiel de gonflement d'un sol ont été élaborées en prenant appui sur ces différents paramètres. Elles ont fait l'objet de plusieurs synthèses notamment par Muntohar (2006) et Rao (2006). Les premières classifications concernant les sols gonflants ont été établies aux États-Unis dans les années 50. Elles tenaient compte du pourcentage en particules colloïdales (d'après Holtz et Gibbs, 1956, dans Rao, 2006, tableau III). De nombreuses autres ont suivi, basées sur un ou plusieurs paramètres (quelques exemples sont donnés dans les tableaux IVa à IVg), mais les résultats sont parfois discutables car le potentiel de gonflement d'un sol peut être qualifié de faible ou fort selon le paramètre considéré. Ainsi la classification de Holtz (dans Djedid, 2001) conduit à placer l'Argile verte de Romainville dans les sols argileux à fort potentiel de gonflement par référence aux valeurs de limite de liquidité et d'indice de plasticité et à faible potentiel de gonflement par référence à la limite de retrait.

TABEAU II Valeurs des limites d'Atterberg d'argiles monominérales, (d'après Lambe et Whitman, 1969).
Values of Atterberg limits of mono-mineral clayey soils, (after Lambe and Whitman, 1969).

Minéral	Cation échangeable	Limite de liquidité (%)	Limite de plasticité (%)	Indice de plasticité (%)	Limite de retrait (%)
Montmorillonite	Na ⁺	710	54	656	10
Mc	Ca ⁺⁺	510	81	429	11
Illite		120	60	60	18
Kaolinite		53	32	21	27

TABEAU III Classification géotechnique des sols gonflants (d'après Holtz et Gibbs, 1956).
Geotechnical classification of expansive soils (after Holtz and Gibbs, 1956).

Colloïdes (%)	Indice de Plasticité I _p (%)	Limite de retrait (%)	Potentiel de gonflement	Gonflement estimé (variation de volume %)
< 15	< 18	< 10	faible	< 10
13-23	15-28	10-20	moyen	10-20
20-31	25-41	20-30	élevé	20-30
> 28	> 35	> 30	très élevé	> 30

TABEAU IVa, IVb Potentiel de gonflement établi à partir de la limite de liquidité (d'après a) Dakshanamurthy et Raman, 1973 ; b) Chen 1975).
Liquid limit as an indicator of swelling potential (after a) Dakshanamurthy and Raman, 1973; b) Chen 1975).

w _L (%)	Potentiel de gonflement
> 60	très élevé
40 à 60	élevé
30 à 40	moyen
< 30	faible

w _L (%)	Classification
0 à 20	non gonflant
20 à 35	gonflement faible
35 à 50	gonflement moyen
50 à 70	gonflement élevé
70 à 90	gonflement très élevé
> 90	gonflement critique

TABLEAU IVc

Sensibilité d'une argile au retrait-gonflement déterminée à partir de l'indice de plasticité (d'après Prian *et al.*, 2000)

Plasticity index as an indicator of clay sensitivity to shrinkage-swelling (after Prian *et al.*, 2000).

I_p (%)	Sensibilité
< 12	Faible
12 à 25	Moyenne
25 à 40	Forte
≥ 40	Très forte

TABLEAU IVd

Potentiel de gonflement établi à partir de l'indice de retrait (d'après Ranganathan et Satyanarayana, 1965).

Shrinkage index as an indicator of swelling potential (after Ranganathan and Satyanarayana, 1965).

I_r (%)	Potentiel de gonflement
0 à 20	Faible
20 à 30	Moyen
30 à 60	Fort
> 60	Très fort

TABLEAU IVe

Sensibilité d'une argile au retrait-gonflement déterminée à partir de la valeur de bleu (d'après Chassagneux *et al.*, 1996).

Methylene blue value as an indicator of clay sensitivity to shrinkage-swelling (after Chassagneux *et al.*, 1996).

VBS	Sensibilité
< 2,5	Faible
2,5 à 6	Moyenne
6 à 8	Forte
> 8	Très forte

TABLEAU IVf

Potentiel de gonflement (d'après Holtz *et al.*, 1973).

Swelling potential (after Holtz *et al.*, 1973).

w_r (%)	w_L (%)	I_p (%)	Potentiel de gonflement
7 à 12	50 à 70	25 à 35	fort
10 à 15	35 à 50	15 à 25	moyen
> 15	20 à 35	< 18	faible

TABLEAU IVg

Potentiel de gonflement (d'après BRE, 1980).

Swelling potential (after BRE, 1980).

I_p (%)	% < 2 μ m	Potentiel de gonflement
> 35	> 95	très élevé
22 à 35	60 à 95	élevé
18 à 22	30 à 60	moyen
< 18	< 30	faible

Il existe aussi des chartes de potentiel de gonflement : un exemple est celle établie par Daksanamurthy *et al.* (1973) qui s'appuie sur le diagramme de Casagrande (Fig. 16).

On peut noter que ces classifications ne font pas souvent référence à l'état initial du sol.

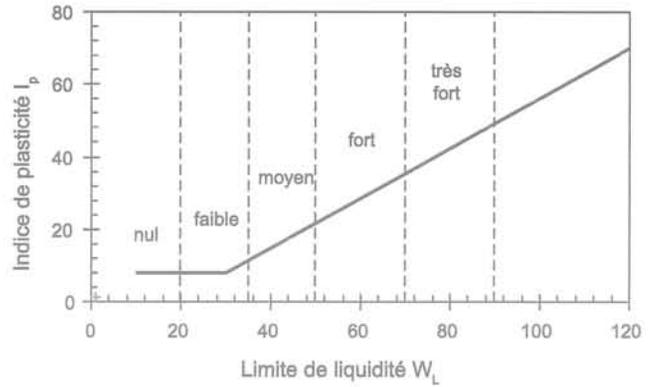


Fig. 16

Charte du potentiel de gonflement des sols (d'après Daksanamurthy *et al.*, 1973).

Chart of swelling potential of soil (after Daksanamurthy *et al.*, 1973).

5

Caractéristiques hydriques

Les courbes de rétention d'eau sont établies au laboratoire en soumettant le sol à des contraintes hydriques ou succions variables. La succion appliquée à un sol est la différence de pression entre l'air et l'eau ($s = u_a - u_w$). Elle correspond à une énergie potentielle, somme de plusieurs termes : potentiels gravitaire, matriciel et osmotique. Elle s'exprime en unité de pression ou en pF (principalement chez les agronomes), le pF étant le logarithme décimal de la hauteur d'eau exprimée en centimètres, correspondant à la pression interstitielle dans le sol.

Les courbes de rétention traduisent la relation entre la succion et la teneur en eau ou l'indice des vides. Ces courbes présentent un phénomène d'hystérésis pour les faibles succions correspondant à des teneurs en eau supérieures à la limite de retrait. Il n'existe donc pas de relation biunivoque entre la succion et la teneur en eau du sol, l'état hydrique étant susceptible de varier entre deux courbes enveloppes d'imbibition et de drainage.

L'obtention de ces courbes de rétention nécessite différentes méthodes qui dépendent de la gamme de succion appliquée (Delage et Cui, 2000) :

- les méthodes par plaque tensiométrique (0-100 kPa) et par translation d'axes (jusqu'à 1,5 MPa) ;
- la méthode des pressions osmotiques (jusqu'à 12 MPa) ;
- la méthode des solutions salines saturées qui permet d'atteindre des succions de l'ordre de 330 MPa. Elle offre l'avantage de couvrir une large gamme de succion, cependant elle présente l'inconvénient d'avoir des temps d'équilibre très grands dus aux transferts d'eau en phase vapeur.

Les courbes de rétention d'eau peuvent être représentées de façon globale (Biarez *et al.*, 1987) sous la forme de cinq diagrammes, un exemple obtenu sur l'Argile verte de Romainville par la méthode des pressions osmotiques et la méthode des solutions salines saturées couplée à la mesure du volume par pesée hydrostatique dans le mercure, est donné en figure 17. Sur le graphe a est représenté l'indice des vides en fonction de la teneur en eau permettant de déterminer la limite de retrait ($w = 14\%$, $e_o = 0,4$) correspondant à une succion de 20 MPa (graphe b). Le matériau est

Caractéristiques hydro-mécaniques

Cet aspect est abordé pour l'Argile verte de Romainville à travers des essais cycliques de gonflement libre à l'oedomètre dans lesquels la variation de hauteur de

saturé jusqu'au point d'entrée d'air correspondant à une teneur en eau de 17 % (graphe c) pour une succion de 4 MPa (graphe d). Le processus de séchage-humidification est réversible pour des succions supérieures à la limite de retrait (graphe e).

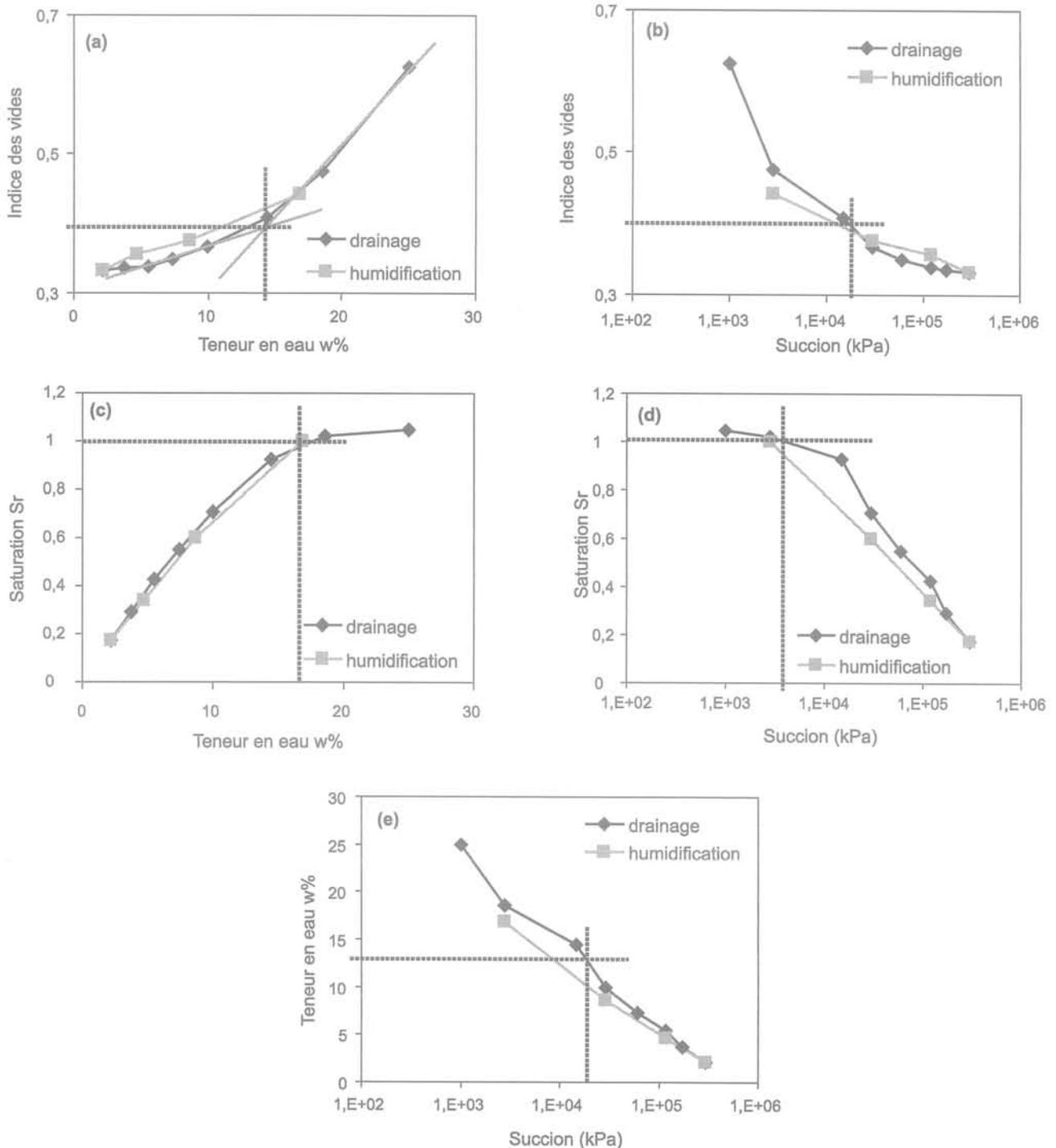


Fig. 17a-17e

Représentation globale des courbes de rétention de l'Argile verte de Romainville.
Synthetic representation of retention curves of Argile verte de Romainville.

l'échantillon est mesurée au cours de cycles successifs séchage-humidification. En parallèle, une étude structurale par porosimétrie au mercure est réalisée.

Le chemin hydrique suivi au cours des différents cycles est le suivant : l'échantillon mis en place dans le moule à l'état naturel (teneur en eau et indice des vides naturels) est soumis à une phase d'humidification jusqu'à ce que le gonflement soit quasi stabilisé, puis il est séché dans une étuve à 50 °C jusqu'à stabilisation des déformations. L'opération humidification-séchage est ensuite reproduite plusieurs fois et les courbes de gonflement sont analysées.

Sur la figure 18 sont représentées les courbes de gonflement obtenues sur un même échantillon au cours de cycles successifs. La courbe de 1^{er} gonflement se détache des suivantes. Son allure et son amplitude sont influencées par l'état initial du matériau. La 2^e courbe présente une cinétique et une amplitude plus importantes qui peuvent être attribuées à la fissuration observée par ailleurs, au cours du 1^{er} séchage. En effet l'ouverture de fissures de retrait au cours du séchage entraîne la création de chemins préférentiels empruntés par l'eau lors du processus de réhumidification suivant. Ce phénomène s'estompe ensuite pour les cycles suivants comme en témoigne la superposition des courbes de gonflement libre. La déformation se stabilise à partir du 3^e cycle (Fig. 19). Néanmoins l'échantillon ne retrouve pas son état initial à la fin de chaque séchage, le phénomène n'étant pas entièrement réversible (Fig. 20).

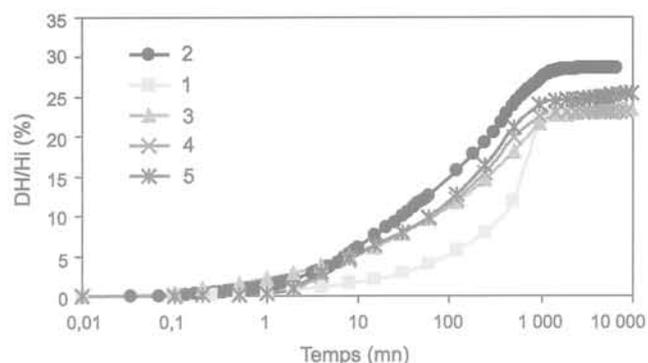


Fig. 18 Courbes de 5 cycles de gonflement libre à l'oedomètre (Argile verte de Romainville).
Free swelling oedometer curves of 5 cycles (Argile verte de Romainville).

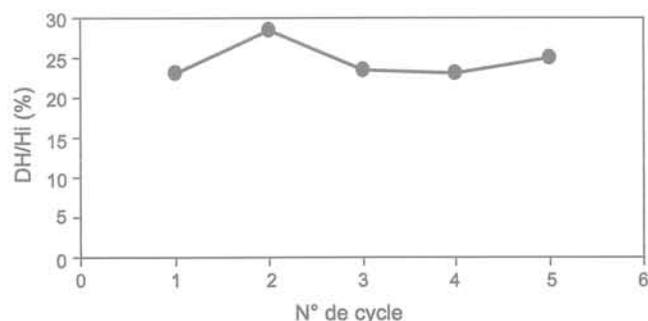


Fig. 19 Taux de gonflement au cours des 5 cycles (Argile verte de Romainville).
Swelling rate during the five cycles (Argile verte de Romainville).

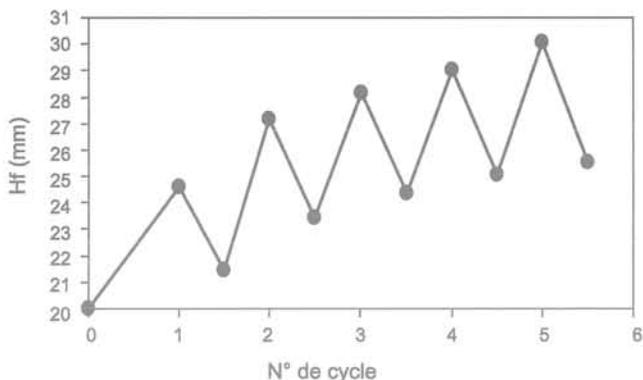


Fig. 20 Évolution de l'épaisseur de l'échantillon au cours des 5 cycles (Argile verte de Romainville).
Thickness evolution of sample during the five cycles (Argile verte de Romainville).

L'évolution structurale qui résulte de ces différentes sollicitations hydriques est mise en évidence par l'étude porosimétrique. Sur les figures 21a et 21b sont représentées les courbes cumulées et dérivées de la distribution des diamètres d'accès de pores d'échantillons ayant subi 1, 3 et 5 cycles. On observe une augmentation du volume poreux cumulé entre le 1^{er} et le 3^{ème} cycle et une stabilisation entre le 3^e et le 5^e cycle. Ce résultat corrobore celui obtenu par les essais de gonflement libre où le taux de gonflement est constant à partir du 3^e cycle. Cependant, une modification de la microstructure est observée au cours des différents cycles, se traduisant par :

- une augmentation progressive du diamètre moyen de la famille de pores interagrégat ;
- une distribution de plus en plus étalée du cycle 1 au cycle 5 ;
- une augmentation de la porosité intraparticulaire du cycle 3 au cycle 5. En effet la comparaison du volume poreux mesuré et de la teneur en eau correspondant aux trois cycles mentionnée sur le graphe des courbes cumulées, dénote pour le cycle 5 une part plus importante de la porosité non accessible par l'essai porosimétrique (< 7 nm). Elle correspond à un volume poreux par unité de poids de l'ordre de 50 mm³g⁻¹ pour les cycles 1 et 3 et de 90 mm³g⁻¹ pour le cycle 5.

Ces essais hydro-mécaniques mettent en évidence que le matériau soumis à des cycles séchage-humidification ne présente pas d'évolution sensible du taux de gonflement au-delà des 2 ou 3 premiers cycles mais qu'une transformation progressive et irréversible de la microstructure est observable en porosimétrie. Cette évolution microstructurale se traduit à la fois par une augmentation des diamètres d'accès de pores de la famille interagrégat, une distribution plus étalée, et une augmentation de la porosité intraparticulaire.

7 Conclusion

Le travail qui fait l'objet de cet article, prend appui pour les applications, principalement sur les Argiles vertes de Romainville et secondairement sur les Marnes bleues d'Argenteuil. Il permet, d'une part, de tirer des remarques générales concernant les facteurs de prédisposition au retrait-gonflement des sols argileux,

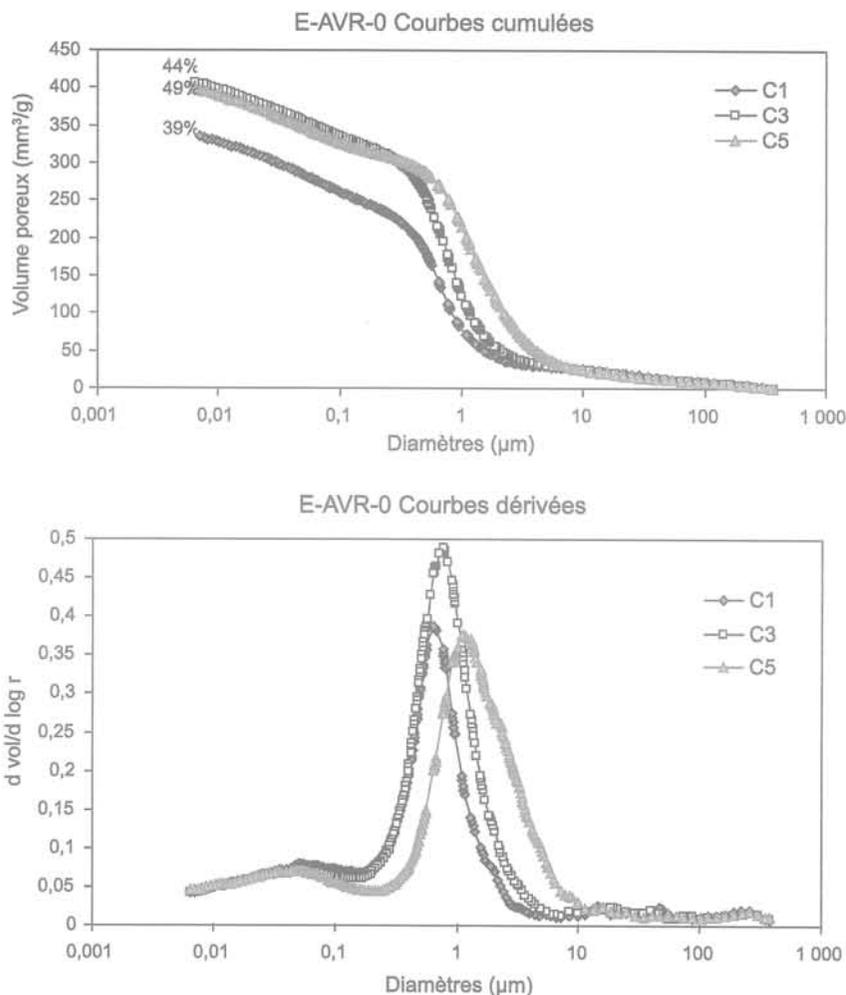


Fig. 21a et 21b Courbes cumulée et dérivée de distribution des pores de l'Argile verte de Romainville, pour les cycles 1, 2, 3.
Cumulative and derived curves of pore size distribution of Argile verte de Romainville for cycles 1, 2, 3.

et, d'autre part, d'étudier de manière plus spécifique les modifications structurales de ce matériau lorsqu'il est soumis à des sollicitations hydriques. Les conclusions énoncées dans ce paragraphe sont structurées suivant ces deux axes.

Les facteurs de prédisposition au retrait-gonflement sont nombreux et interdépendants. Il est impossible de les classer par ordre d'importance, chacun jouant un rôle déterminant à des échelles différentes. La liste qui suit, non exhaustive, correspond aux principaux critères permettant d'identifier les matériaux présentant des prédispositions aux variations de volume au cours de cycles séchage-humidification.

1°) La nature minéralogique du sol :

- la présence de minéraux argileux et plus particulièrement de smectites et d'interstratifiés illite-smectite caractérisés par un déficit de charge et de très grandes surfaces spécifiques internes et externes responsables du phénomène d'adsorption de molécules d'eau ;

- la présence de carbonates qui jouent un rôle modérateur (le taux de gonflement libre à l'état naturel de AVR est de 15 à 25 % pour 15 à 20 % de carbonates ; celui de MBA est inférieur à 4% pour 30 à 60 % de carbonates). Ils contribuent à former un squelette rigide

freinant le processus de retrait-gonflement. Cependant ce squelette est très fragile et les liaisons sont facilement détruites par remaniement du matériau (le taux de gonflement libre de MBA après remaniement est de 26 %), qui réagit alors en fonction des minéraux argileux présents dans la structure ;

- la présence d'autres minéraux accessoires, sous forme d'amas ou lentilles, tels que la pyrite qui a été observée dans l'une des formations étudiées (Marnes bleues d'Argenteuil). Sous l'action de l'eau, la pyrite (FeS_2) s'oxyde pour donner des sulfates qui en présence de calcium forment de l'anhydrite ($CaSO_4$) et par hydratation du gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). Ce processus bien connu des géotechniciens est à l'origine de désordres par gonflement ;

2°) L'état initial du matériau. Il est mesuré par les paramètres d'état que sont la teneur en eau, la densité, l'indice des vides et la succion. A minéralogie et granularité égales, plus la teneur en eau initiale est faible, ou l'état de succion grand, plus le matériau est susceptible de s'hydrater, entraînant ainsi un gonflement dont l'amplitude dépend de la nature des minéraux présents et de l'arrangement structural.

3°) L'arrangement structural directement lié à la granularité et à la nature minéralogique du matériau. Plus la structure est compacte avec une distribution d'accès de pores unimodale correspondant à une matrice argileuse très resserrée, plus la capacité à se diviser en agrégats primaires et secondaires au cours de l'hydratation est grande et plus les variations de volume observées sont importantes. Au contraire, une structure formée par une matrice granulaire ou par des agrégats où les minéraux non argileux sont dominants est moins sujette à des variations de volume.

4°) Un paramètre important, évoqué en introduction est l'état de consolidation directement lié à l'histoire géologique du sol (processus de diagenèse et évolution ultérieure). Plus un matériau est surconsolidé, plus il est susceptible de développer des pressions de gonflement importantes.

La plupart de ces facteurs de prédisposition sont identifiables et mesurables par des analyses minéralogiques, par des essais géotechniques simples et par l'étude de la microstructure.

Les nombreuses classifications géotechniques existantes permettent de placer les sols dans des catégories de sols au potentiel de gonflement nul à très fort. Cependant elles sont parfois discutables car basées sur seulement un, deux ou trois paramètres alors que le processus de retrait-gonflement est la conséquence de nombreux facteurs interdépendants (granularité, minéralogie, état initial, microstructure...).

L'étude microstructurale de l'Argile verte de Romainville met en évidence :

- une augmentation de la porosité en taille et en volume au cours de l'hydratation du matériau naturel par ouverture progressive de la porosité inter et intra-agrégat primaire ;

- une destructuration du matériau lorsqu'il se présente sous forme de colluvion se traduisant par la destruction des agrégats et favorisant l'apparition d'amas de quelques particules ou de particules dispersées ;

- une transformation progressive et irréversible de la microstructure au cours des cycles successifs séchage-humidification, qui se traduit par une augmentation du diamètre d'accès de pores de la famille interagrégat et une distribution plus étalée sans variation sensible du volume poreux dont la conséquence directe, à l'échelle macroscopique, est l'absence d'évolution du taux de gonflement d'un cycle à l'autre au-delà du 3^e cycle.

Cette dernière remarque est vérifiée pour 6 cycles mais reste à confirmer pour un plus grand nombre. La structure du matériau semble évoluer lentement vers une destructuration qui à terme pourrait ressembler à celle des colluvions argileuses.

REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet de recherche : « Aléa et risque sécheresse » soutenu par la Fondation MAIF, du projet ARGIC : « Analyse du retrait-gonflement et de ses incidences sur les constructions » soutenu par l'ANR et de la fiche recherche « Sécheresse géotechnique et bâti » du Réseau de recherche sur le développement durable, soutenu par la région Ile-de-France.

Bibliographie

- AFNOR NF P 94-051 - Sols : reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg. Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau, 1993.
- AFNOR NF P 94-052-1 - Sols : reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg. Limite de liquidité - Méthode du cône de pénétration, 1995.
- AFNOR XP P 94-060-1 - Sols : reconnaissance et essais. Essai de dessiccation. Partie 1 : Passant 400µm, 1995.
- AFNOR XP P 94-060-2 - Sols : reconnaissance et essais. Essai de dessiccation. Partie : Sol non remanié, 1995.
- AFNOR NF P 94-068 - Sols : Reconnaissance et essais. Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux, 1998.
- AFNOR NF X 31-130 Qualité des sols. Méthodes chimiques. Détermination de la capacité d'échange cationique (CEC) et des cations extractibles, 1999.
- Al-Mukhtar M., Belanteur N., Tessier D., Vanapalli S.K. - The fabric of a clay soil under controlled mechanical and hydraulic stress states. *Applied Clay Sciences*, vol. 11, 1996, p.99-115.
- Alonso E.E., Gens A., Josa A. - A constitutive model for partially saturated soils. *Geotechnique*, vol. 40 (3), 1990, p. 405-430.
- Audiguier M., Delage P. 1987. Étude microscopique et porosimétrie de sols fins naturels dans une perspective géotechnique. *Actes de la VII^e Réunion internationale de micromorphologie des sols*, Paris, ss la dir. de N. Fedoroff, L.M. Bresson et M.A. Courty, juillet 1985, p. 493-500, AFES.
- Biarez J., Fleureau J.-M., Zerhouni M. I., Soepandji B. S. - Variations de volume des sols argileux lors des cycles drainage-humidification. *Revue française de géotechnique* 41, 1987, p.63-71.
- Chassagneux D., Stieljes L., Mouroux P., Ménilliet F., Ducreux G.H. - Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols (sécheresse-pluie) à l'échelle départementale. Approche méthodologique dans les Alpes-de-Haute-Provence. Rapport BRGM n° R39218, 1996.
- Chen F.H. - *Foundations on expansive soils*. Amsterdam, Elsevier. *Developments in Geotechnical Engineering*, vol. 12, 1975.
- Collins K., McGown A. - The form and function of microfabric features in a variety of natural soils. *Geotechnique*, 24-2, 1974, p. 223-254.
- Cuisset O. - Propriétés électrocinétiques des particules argileuses, application de la méthode électrophonétique aux problèmes d'environnement et d'identification des sols. Rapport LCPC n° 96, 1980, p. 48-49.
- Dakshanamurthy V., Raman V. - A simple method of identifying an expansive soil. *Soils and foundations. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol. 13, n° 1, 1973, p. 97-104.
- Delage P. - Microstructure Features in the Behaviour of Engineered Barriers for Nuclear Waste Disposal. *5th International Conference on Unsaturated Soils*, Weimar, Germany, (à paraître en 2007).
- Delage P., Audiguier M., Cui Y. J., Howat M. - Microstructure of a compacted silty clay. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 33, 1996, p. 150-158.
- Delage P., Cui Y. J. - *L'eau dans les sols non saturés*. Techniques de l'Ingénieur, traité Construction, C 301, 2000, 20 p.
- Delage P., Pellerin F.M. - Influence de la lyophilisation sur la structure d'une argile sensible du Québec. *Clay Minerals* 19, 1984, p. 151-160.
- Djedid A., Bekkouche A., Aïssa Mamoune S.M. - Identification et prévision du gonflement de quelques sols de la région de Tlemcen (Algérie). *Bulletin des LPC*, n° 233, 2001, p. 67-75.
- Durand C., Forsans T., Ruffet C., Onaisi A., Audibert A. - Influence of clay on borehole stability : a literature survey. Part one: Occurrence of drilling problems, physico-chemical description of clays and of their interaction with fluids. *Rev. IFFP*, vol. 50, 1995, n° 2.
- Gens A., Alonso E.E. - A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 29, 1992, p. 1013-1032.
- Holtz W.G., Gibbs H.J. 1956. Engineering Properties of Expansive Clays. *Transactions, ASCE*, vol. 121, 1956, p.641-677.
- Lambe T.W., Whitman R.V. - *Soil Mechanics, Series in Soil Engineering*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1969.

- Laribi S., Cojean R., Audiguier M., Grambin-Lapeyre C., Geremew Z. - Influence de paramètres du protocole de l'essai d'adsorption au bleu de méthylène sur la valeur au bleu en fonction de la composition minéralogique. *Revue française de géotechnique* n^{os} 120-121, numéro spécial sécheresse géotechnique, 2007.
- Matyas E.L., Radhakrishna H.S. - Volume change characteristics of partially saturated soils. *Geotechnique*, 18, n^o 4, 1968, p.432-448.
- Mitchell J.K. - *Fundamentals of Soils Behaviour*. Series in Soil Engineering, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1976.
- Mitchell J.K., Soga K. - *Fundamentals of Soils Behaviour*. John Wiley, New York, 2005.
- Muntohar A. S. - Prediction and classification of expansive clay soils. Recent advances in characterization and treatment. Amer Ali Al-Rawas & Mattheus F.A. (eds) *Proceedings and Monographs in Engineering, Water and Earth Sciences*, Goosen, Taylor & Francis Group, Balkema, 2006.
- Pomerol C., Feugueur L. - *Bassin de Paris. Ile-de-France, pays de Bray*. Guides géologiques régionaux, Masson & Cie, 1974.
- Pons Ch., Rousseaux F., Tchoubar D. - Utilisation du rayonnement synchrotron en diffusion aux petits angles pour l'étude du gonflement des smectites. *Clay Minerals* 16, 1981, p. 23-42.
- Prian J.-P., Donsimoni M., Vincent M. avec la collaboration de Denis L., Gallas J.-C., Marty F. Motteau M. - Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département de l'Essonne. Rapport BRGM n^o RP-50376-FR, 2000.
- Prost R. - Relations eau-argile : structure et gonflement des matériaux argileux. *Matériaux argileux : structure, propriétés et applications*, sous la direction de A. Decarreau, Société française de minéralogie et de cristallographie, GFA, 1990.
- Qi Yun - *Comportement hydromécanique des argiles : couplage des propriétés micro-macroscopiques de la laponite et de l'hectorite*. Thèse de doctorat, université d'Orléans, 1996.
- Ranganathan et Satyanarayana - A rational method of predicting swelling potential for compacted expansive clays. *Proceedings of the 6th International Conference on Soils Mechanics and Foundation Engineering*, Montreal, 1965, p. 92-96.
- Rao S. M. - Identification and classification of expansive soils. In expansive soils. Recent advances in characterization and treatment. Amer Ali Al-Rawas & Mattheus F.A. (eds) *Proceedings and Monographs in Engineering, Water and Earth Sciences*, Goosen, Taylor & Francis Group, Balkema, 2006.
- Robinet J.-C., Rahbaoui A., Plas F., Lebon P. 1996. A constitutive thermomechanical model for saturated clays. *Engineering Geology*, 41, 1996, p. 145-149.
- Saiyouri N., Hicher P. Y., Tessier D. - Microstructural approach and transfer water modelling in highly compacted unsaturated swelling clays. *Mechanics of cohesive-frictional materials*, 5, 2000, p. 41-60.
- Saiyouri N., Tessier D., Hicher P. Y. - Experimental study of swelling in unsaturated compacted clays. *Clays Minerals*, 39, 2004, p. 469-479.
- Tessier D. - *Étude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux : hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation*. Thèse de doctorat ès sciences, université Paris VII, 1984.
- Touret O., Pons C. H., Tessier D., Tardy Y. - Étude de la répartition de l'eau dans des argiles saturées Mg²⁺ aux fortes teneurs en eau. *Clay Minerals* 25, 1990, p. 217-233.
- Tran N.L. - Un nouvel essai d'identification des sols : l'essai au bleu de méthylène. *Bulletin de liaison des LPC*, n^o 88, 1977, p. 136-137.
- Turki - *Hydratation des minéraux argileux gonflants*. Thèse université Louis-Pasteur, Strasbourg, 1987.
- Van Damme H. - L'eau et sa représentation. *Mécanique des sols non saturés*, sous la direction de O. Coussy et J.-M. Fleureau, Hermès Science publications, 2002, p.23-68.
- Yong R.N. - Soil suction and soil-water potentials in swelling clays in engineered clay barriers. *Engineering Geology*, 54, 1999, p. 3-13.

Essai d'adsorption de bleu de méthylène : influence de paramètres du protocole expérimental sur la valeur au bleu en fonction de la minéralogie des argiles

S. LARIBI

R. COJEAN

M. AUDIGUIER

C. GRAMBIN-LAPEYRE

Z. GEREMEW

Centre de Géosciences
École nationale supérieure
des mines de Paris
Université Marne-la-Vallée,
Bât IFI

5 bd Descartes

Champs-sur-Marne

77454 Marne-la-Vallée

cedex 2

saoussen.laribi@ensmp.fr

roger.cojean@ensmp.fr

martine.audiguier@ensmp.fr

caroline.grambin-lapeyre@

ensmp.fr

zemenu.Geremew@ensmp.fr

Résumé

L'influence du protocole expérimental relatif à la méthode d'adsorption de bleu de méthylène sur les valeurs de bleu mesurées a été étudiée sur deux formations argileuses de la région parisienne. Des comparaisons sont faites avec trois différents types d'argiles.

Les résultats de cette étude révèlent l'importance du protocole expérimental ainsi que la composition minéralogique du matériau :

- la valeur au bleu des matériaux argileux augmente avec le temps de dispersion et se stabilise à partir de 24 h environ ;

- le séchage par lyophilisation permet un meilleur accès aux surfaces développées par les minéraux argileux, par comparaison au séchage à l'étuve ;

- les matériaux bruts ou purifiés suivant un protocole bien précis présentent qualitativement le même comportement : une augmentation de la valeur au bleu avec le temps de dispersion. Cependant, d'un point de vue quantitatif, les valeurs au bleu sont plus importantes pour les argiles purifiées que pour les argiles brutes, pour un même temps de dispersion ;

- la mixité des feuillets des minéraux argileux interstratifiés influe sensiblement sur les résultats : en effet la présence de l'illite dans une argile interstratifiée illite/smectite retarde l'accessibilité aux feuillets gonflants de smectite pour un temps de dispersion inférieur à 24 h.

Mots-clés : bleu de méthylène, adsorption, Argile verte de Romainville, Marne bleue d'Argenteuil, purification, lyophilisation, temps de dispersion, smectite, illite, interstratifié.

Methylene blue adsorption method: influence of protocol parameters on the blue value as a function of clay mineralogy

Abstract

The influence of the experimental protocol parameters of the methylene blue method on the determination of the blue value was studied on two argillaceous formations from the Parisian Region. Comparisons are made with three distinct types of clays.

The results of this study reveal the importance of the protocol and the mineralogical composition of the material:

- the methylene blue value of the argillaceous materials increases with the dispersion time and is stabilized in after about 24 h;

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 30 avril 2008.

– drying by freeze-drying allows a better access to surfaces of clay minerals, by comparison with drying with the drying oven;

– the raw materials and the materials purified according to a precise protocol exhibit qualitatively the same behaviour, i. e., an increase in the methylene blue value with the dispersion time. However, for the same dispersion time methylene blue values are quantitatively higher for the purified clays than for the raw clays;

– the heterogeneity of the layers inside the mixed-layered clay minerals influences the results: the presence of illite component in a mixed-layered illite/smectite clay mineral delays the accessibility to the swelling layers of smectite for a time lower than 24 h.

Key words: methylene blue, adsorption, Argile verte de Romainville, Marne bleue d'Argenteuil, purification, freeze-drying, dispersion time, smectite, illite, interstratified clay.

1

Introduction

Les argiles sont très utilisées dans différents domaines de l'activité humaine (génie civil, industrie pharmaceutique, céramiques, etc.). Elles doivent leur intérêt à leurs propriétés non seulement structurales mais aussi texturales et de surface, telles que la capacité d'adsorption, la capacité d'échange cationique et la surface spécifique. Ce sont ces dernières qui font l'objet de cette étude.

Les propriétés d'adsorption des argiles déterminent l'utilisation de ces matériaux dans un domaine donné (Tran et Million, 1984). Il était donc intéressant d'observer si la modification d'un ou de plusieurs paramètres expérimentaux relatifs à la méthode d'adsorption de bleu de méthylène utilisée couramment pour la détermination de la surface spécifique et de la capacité d'échange cationique des sols argileux engendrait de grandes disparités dans les valeurs au bleu mesurées.

Dans une première partie, une présentation des matériaux et du protocole expérimental suivie d'une caractérisation minéralogique et géotechnique de deux formations argileuses de la Région parisienne est réalisée. Une deuxième partie est consacrée à une étude comparative de l'influence de paramètres expérimentaux, relatifs à la méthode d'adsorption de bleu de méthylène, sur la détermination des propriétés texturales des deux argiles étudiées et de trois différents types d'argiles purifiées suivant des protocoles précis.

2

Matériaux

2.1

Origine des matériaux

Les cinq échantillons analysés sont désignés S, I, I/S, AVR et MBA.

Les argiles S et I proviennent de *Source Clays Repository* et sont commercialisées respectivement sous le nom SWy-1 et IMt-1.

L'argile I/S provient du gisement de Jebel Om El Khecheb dans le bassin de Gafsa au sud-est de la Tunisie.

Les matériaux AVR et MBA ont été prélevés dans deux formations argileuses de la région parisienne : il s'agit respectivement des Argiles vertes de Romainville datées du Stampien inférieur et des Marnes bleues d'Argenteuil datées du Ludien supérieur.

Des études antérieures concernant les argiles du *Source Clays Repository* (Laribi *et al.*, 2006) ont permis d'identifier les argiles S, I, et I/S comme étant respectivement une smectite, une illite et un minéral argileux interstratifié illite/smectite.

Les tableaux I et II résument les principaux résultats obtenus sur ces trois matériaux.

Ces matériaux ont été étudiés à l'état naturel et sous leurs formes purifiées afin d'éliminer les « impuretés » représentées par des minéraux autres que les minéraux argileux, et de ne récupérer que la fraction argileuse < 2 μm .

TABLEAU I Composition chimique (% d'oxydes) et surface spécifique externe de S et de I d'après *Source Clays Repository*.

	S	I
SiO ₂	62,90	49,30
Al ₂ O ₃	19,30	24,25
FeO	0,12	0,55
Fe ₂ O ₃	3,85	6,44
MgO	2,80	2,53
MnO	0,01	0,03
TiO ₂	0,16	0,55
Na ₂ O	1,54	0
CaO	1,80	0,43
K ₂ O	0,56	7,83
P ₂ O ₅	0,06	0,08
CO ₂	1,33	
Perte au feu	5,10	8,02
Total	99,5	100,01
Surface externe : S _{BET} (m ² /g)	31,82	40,10

TABEAU II Composition chimique (% d'oxydes) et propriétés physico-chimique de I/S et I/Sp (I/S purifiée) d'après Laribi et al. (2006).

	I/S _p	I/S
SiO ₂	57	56
Al ₂ O ₃	16	11
Fe ₂ O ₃	5,0	4,4
MgO	2,6	3,3
TiO ₂	0,51	0,59
Na ₂ O	3,2	2,7
CaO	3,6	5,7
K ₂ O	1,1	1,3
Perte au feu	11	15
Total	100	99
Capacité d'échange cationique (meq/100g)	70	31
Surface spécifique totale (m ² /g)	591	406
% de minéraux	88 % Smectite 12 % Illite	60 % smectite 10 % illite 10 % zéolite 5 % quartz 15 % calcite
Limites d'Atterberg		w _p = 61 % w _L = 154 % I _p = 93 %

2.2

Préparation des matériaux

Les argiles ont été finement broyées dans un broyeur mécanique à mortier en agate, la poudre a été tamisée à 100 µm et la fraction inférieure récupérée. La méthode de purification consiste en un échange sodique suivi d'une centrifugation, ce qui permet d'éliminer les « impuretés » et de substituer les cations échangeables par l'ion sodium (Van Olphen, 1977 ; Laribi et al 2006).

Pour procéder à cette purification, 1 g d'argile est mélangé à 100 ml d'une solution de NaCl normale (1N). Après agitation du mélange durant 12 heures, la suspension est centrifugée pendant 15 minutes à la vitesse de 5 000 tours par minute. Le liquide surnageant est alors remplacé par une autre solution de NaCl (1N), le dépôt étant décollé de la paroi du flacon à l'aide d'une spatule et remis en suspension. Le cycle d'agitation-centrifugation est répété 7 fois. Un lavage à l'eau distillée suivi d'une centrifugation à 5 000 tours par minute pendant 30 minutes permet alors d'éliminer l'excès d'ions chlorures. Ce lavage est répété aussi longtemps que la suspension sédimente par centrifugation. A la fin, la formation d'un gel est obtenue. L'excès d'ions chlorures est éliminé par dialyse. Pour cela, la suspension est mise dans des membranes de dialyse immergées dans de l'eau bidistillée, celle-ci étant changée plusieurs fois par jour. Le test par le nitrate d'argent permet de vérifier l'élimination des ions chlorures dont la présence éventuelle est marquée par la formation d'un précipité blanc de chlorure d'argent. La suspension est ensuite récupérée et séchée par lyophilisation, ou dans une étuve à 105 °C. L'argile purifiée et séchée est alors broyée puis tamisée à 63 µm.

Dans la suite, les argiles purifiées séchées par lyophilisation seront repérées par l'indice «p» associé au nom du matériau.

3

Techniques expérimentales et appareillage

3.1

Techniques de caractérisation géotechnique et essai d'adsorption de bleu de méthylène

Les limites d'Atterberg ont été déterminées selon la norme AFNOR NF P 94-050, SOLS, à l'aide de l'appareil de Casagrande pour la limite de liquidité. Les analyses granulométriques ont été effectuées sur un Micromeritics® Sédigraph 5100 V3.08. La teneur en carbonates a été déterminée par la méthode volumétrique à l'aide d'un calcimètre Dietrich-Frühling.

La teneur en matière organique a été déterminée selon la norme AFNOR NF P 94-055. Les surfaces spécifiques totales ont été mesurées par adsorption d'éthylène-glycol monoéthyl éther (EGME) selon la méthode décrite par Carter *et al.* (1965 et 1980), et Heilman *et al.* (1965). Les échantillons sont d'abord séchés à l'étuve et pesés. Ils sont ensuite placés dans un dessiccateur relié au vide contenant du CaCl₂ imprégné d'EGME (avec un recouvrement moléculaire de 3,22 m²/mg d'EGME). Après évacuation sous vide, les échantillons sont laissés sous atmosphère d'EGME puis pesés à intervalles de 3 ou 4 heures jusqu'à obtenir une masse constante afin de connaître la quantité d'EGME adsorbée (Tessier *et al.*, 1991). La surface spécifique totale exprimée en m²/g est donnée par :

$$S_t = 3,22 \times m$$

où m est la masse d'EGME (en mg) adsorbée par un gramme d'échantillon.

Les essais au bleu sont effectués selon la norme AFNOR NF P 94-068. Cet essai consiste à mesurer, pour 100 g de matériau, la quantité de bleu de méthylène nécessaire pour recouvrir la surface externe et interne des particules présentant un déficit de charge.

Une suspension de sol est préparée et mise en agitation pendant 15 min. Puis, tout en maintenant l'agitation, un volume de bleu est ajouté à la suspension. Une goutte de la suspension est immédiatement prélevée et déposée sur un papier filtre normalisé. La tache obtenue est un dépôt de sol coloré en bleu. Cette opération est répétée un certain nombre de fois jusqu'à ce que le bleu soit en excès dans la suspension. La tache s'entoure alors d'une auréole bleu clair, persistante (Tran, 1977). On obtient ainsi la quantité de bleu maximale adsorbée par le sol.

La valeur de bleu représente la quantité de bleu (en g) adsorbée pour 100 g de sol sec lorsque le test de la tache est positif.

$$VB = 100 \times \frac{V_i \times C_b}{M_s}$$

$$VB : \text{valeur de bleu} \left(\frac{\text{g}_{\text{bleu}}}{100\text{g}_{\text{sol}}} \right)$$

C_b : concentration de la solution du bleu de méthylène (g/ml), habituellement : 0,01 g/ml

M_s : masse d'argile (g)

V_i : volume de bleu introduit (ml)

Connaissant la masse molaire du bleu de méthylène, et en admettant que le bleu est entièrement adsorbé

sous forme monovalente (Clément, 1988), la capacité d'échange cationique de l'argile est déterminée par la relation suivante :

$$CEC \text{ (meq/100 g)} = VB \text{ (g/100 g)}/374$$

Pour déterminer la surface spécifique totale, on considère que les molécules de bleu sont disposées d'une façon telle que la surface couverte est de 130 \AA^2 par molécule (les molécules de bleu de méthylène sont disposées parallèlement aux couches d'argile et forment une couche monomoléculaire. La surface spécifique totale est donnée par la relation suivante :

$$6,023 \cdot 10^{23} \times 130 \cdot 10^{20}$$

$$S_s \left(\frac{\text{m}^2}{\text{g}} \right) = VB \times \frac{6,2310^{23} \times 13010^{20}}{374 \times 100} = 20,9 \times VB \left(\frac{\text{g}}{100\text{g}} \right)$$

Dans ce travail, nous avons cherché à caractériser le rôle joué par certains paramètres relatifs au mode opératoire de l'essai au bleu sur la détermination de la valeur au bleu. Nous avons tout spécialement réalisé un ensemble d'essais, avec une phase préliminaire d'agitation et de dispersion de la suspension initiale d'une durée variable de 0 à 100 h, ce que ne prévoit pas le mode opératoire classique. Nous avons également préparé les échantillons, soit séchés à l'étuve suivant la norme, soit lyophilisés.

3.2

Techniques de caractérisation minéralogique

Les deux matériaux AVR et MBA ont été caractérisés minéralogiquement par diffraction des rayons X (DRX), analyse thermique différentielle et thermogravimétrie (ATD-ATG) et spectroscopie infrarouge (IR).

Les échantillons analysés par DRX ont été préparés de deux manières différentes :

- échantillon en poudre désorientée : l'échantillon séché est placé directement dans un porte-échantillon ; le diffractogramme de poudre obtenu fait apparaître les réflexions (hkl) ;
- échantillon orienté: l'échantillon est obtenu par dépôt direct de suspension diluée d'argile sur une lame de verre dépolie suivi d'un séchage à l'air libre. Le diffractogramme obtenu comporte uniquement les réflexions (001).

L'analyse thermo-gravimétrique (ATG) est basée sur la mesure de la perte de masse d'un matériau en fonction de la température, permettant ainsi l'étude des transformations internes, comme les transferts de masses associées à des réactions chimiques de déshydratation et déshydroxylation et une libération ou une absorption d'énergie. La mesure se fait avec une balance de très haute précision.

L'analyse thermique différentielle (ATD) consiste à suivre l'évolution de la différence de température (due aux transformations allotropiques, aux changements d'état ou aux réactions de déshydroxylation et de déshydratation) entre l'échantillon étudié et un échantillon de référence thermiquement inactif dans le domaine de température exploré. Les mesures ont été effectuées sur un appareil ATD-ATG, mesures couplées, de marque TGA 92 de SETARAM. Le matériau à étudier est placé dans une coupelle en platine, les quantités utilisées varient de 0,5 à 30 mg. Le taux de chauffe est de $5^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. Le gaz vecteur est l'argon.

La spectroscopie infrarouge est une technique locale qui permet d'identifier les espèces minérales en

présence (Oinuma et Hayashi, 1968). Cette technique permet de confirmer et de compléter les données de la diffraction des rayons X en apportant des renseignements sur les vibrations des atomes dans une structure moléculaire. Elle est très sensible à la présence des hydroxyles dans la structure, ce qui permet d'utiliser les OH comme sonde infrarouge pour déterminer par exemple le caractère di ou trioctaédrique des argiles. Les échantillons ont été préparés sous forme de pastilles contenant 1 % en masse d'argile dans environ 300 mg de bromure de potassium (KBr) et les spectres ont été enregistrés entre 600 et 4000 cm^{-1} à l'aide d'un spectromètre FTIR PERKIN ELMER 1000.

4

Résultats et discussion

4.1

Caractérisation géotechnique et minéralogique

4.1.1

Caractérisation géotechnique

Le tableau III montre les résultats de la caractérisation géotechnique de MBA et de AVR.

Les résultats révèlent la présence d'une quantité importante de carbonates au sein des deux matériaux et plus particulièrement de MBA. En revanche, le taux de matière organique est faible dans les deux sols.

Les valeurs des surfaces spécifiques totales des deux sols indiquent qu'ils sont probablement composés d'un mélange de plusieurs minéraux argileux. Cette conclusion sera confirmée grâce à la DRX.

L'abaque de Casagrande (Lambe et Whitman, 1973) permet de placer les deux matériaux dans le domaine des sols limoneux. Les résultats de l'analyse granulométrique associés à ceux des limites d'Atterberg (fraction argileuse $< 2 \mu\text{m}$ et indice de plasticité) permettent de dire que les deux matériaux d'étude ont un potentiel de gonflement très élevé (Chen, 1988).

TABLEAU III Caractérisation géotechnique de AVR et MBA.

	AVR	MBA
Teneur en carbonate (%)	12,6	64,4
Teneur en matière organique (%)	0,12	0,46
Surface spécifique totale (m^2/g)	170	101
Limite de liquidité w_l (%)	75	86
Limite de plasticité w_p (%)	40	44
Indice de plasticité I_p (%)	35	42
Fraction $< 2 \mu\text{m}$	84	89

4.1.2

Caractérisation minéralogique

Les diffractogrammes DRX obtenus respectivement sur les argiles AVR et MBA (purifiées, traitées à l'éthylène glycol et chauffées à 550°C) sont présentés en figures 1 et 2.

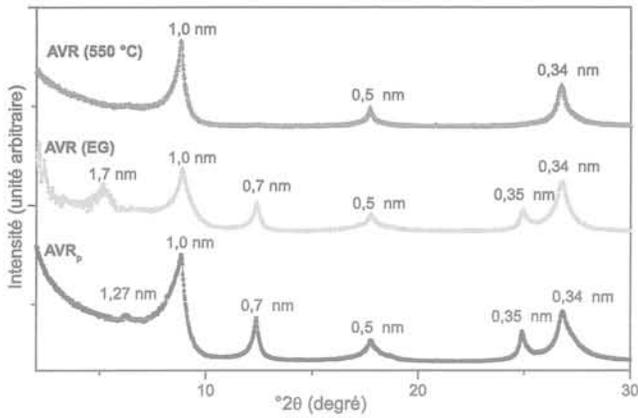


Fig. 1 Diffractogramme des rayons X de l'argile AVR_p.

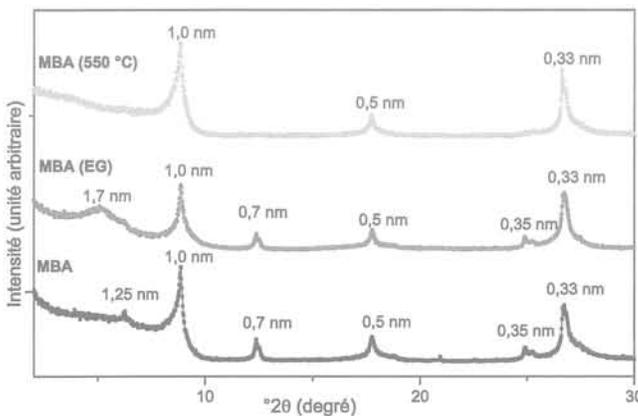


Fig. 2 Diffractogramme des rayons X de l'argile MBA_p.

Les résultats obtenus révèlent la présence de smectite, d'illite et de kaolinite dans les deux matériaux d'étude. En effet, les deux diffractogrammes montrent une réflexion (001) à 1,27 nm pour AVR_p et 1,25 nm pour MBA_p caractérisant des smectites dont l'espace interfoliaire sodique ne retient qu'une couche d'eau. Cette réflexion passe à 1,7 nm quand les argiles sont traitées à l'éthylène glycol, confirmant ainsi l'existence des feuillets expansibles de type smectite qui, après chauffage à 550 °C, sont déshydratés avec une épaisseur passant à 1,0 nm. (Glaser *et al.*, 1968 ; Drits et Tchoubar, 1990 ; Reynolds, 1980).

La présence d'illite est prouvée par des raies à 1,0 nm, 0,5 nm et 0,34 nm qui correspondent aux réflexions (001), (002) et (003) d'une phase illitique non affectée par le traitement à l'éthylène glycol et le chauffage à 550°C. (Brindley et Brown, 1980).

La kaolinite est mise en évidence par la présence de réflexions (001) et (002) à 0,7 nm et 0,35 nm non modifiées par le traitement à l'éthylène glycol. En revanche, elles disparaissent après un chauffage à 550 °C qui provoque la déshydroxylation de la kaolinite.

Les résultats d'une étude complémentaire réalisée en spectroscopie infrarouge, présentés en figure 3, confirment les conclusions précédentes, et ceci par la présence de :

- une bande de vibration de valence des OH liés à l'aluminium vers 3620 cm⁻¹ suggérant ainsi la présence d'une argile 2/1. Il s'agit de la smectite et de l'illite pour ces deux matériaux AVR et MBA ;

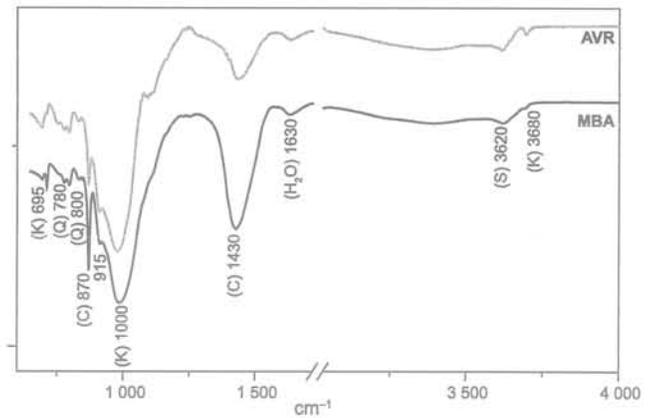


Fig. 3 Spectres infra-rouge (IR) des argiles AVR et de MBA.

- des bandes de vibration de valence de Si-O et OH du réseau argileux vers 1000 cm⁻¹ et 3680 cm⁻¹ confirmant la présence d'une kaolinite dans ces matériaux (Caillère *et al.*, 1982, Dixon et Weed, 1977).

La bande vers 1630 cm⁻¹ est attribuable à la bande de vibration de déformation du groupement OH de l'eau d'hydratation de l'argile. La bande à 915 cm⁻¹ correspond à la bande de vibration de déformation de Al-OH confirmant ainsi le caractère dioctaédrique de l'argile.

Les bandes de vibration à 800 cm⁻¹ et 780 cm⁻¹ montrent la présence de quartz dans les deux sols. La présence des carbonates est confirmée par les bandes de vibration de valence et de déformation vers 1430 cm⁻¹ et 870 cm⁻¹. L'importante intensité de la bande vers 1430 cm⁻¹ sur le spectre de MBA reflète la grande quantité de calcite dans ce matériau, ce qui est en accord avec les précédents résultats.

Les thermogrammes des argiles AVR, MBA présentés sur les figures 4 et 5 montrent :

- des pics endothermiques à 90 °C pour les deux échantillons, accompagnés d'une perte de masse correspondant au départ d'eau hygroscopique (déshydratation) (Dixon et Weed, 1977) ;

- des pics endothermiques entre 500 °C et 550 °C pour les deux argiles, accompagnés d'une perte massique typique de la déshydroxylation des feuillets de kaolinite et /ou d'une smectite de type beidellite (Greene, 1957) ;

- un pic endothermique à 760 °C et 820 °C respectivement pour AVR et MBA correspondant à une décarbonatation, et reflétant la grande quantité de carbonates au niveau de l'échantillon MBA, ce qui est en accord avec les résultats obtenus par spectroscopie infrarouge ;

- un pic exothermique aux alentours de 900°C, typique d'une destruction et d'une recristallisation du réseau silicaté et relatif à une smectite de type beidellite. (Weir et Greene, 1962).

En conclusion, la caractérisation géotechnique et minéralogique montre que les deux matériaux AVR et MBA sont des mélanges de smectite, illite et kaolinite, contenant du quartz et des carbonates en « impuretés ». On note une forte teneur en carbonates dans l'argile MBA.

Le tableau IV résume la composition minéralogique des cinq échantillons d'étude.

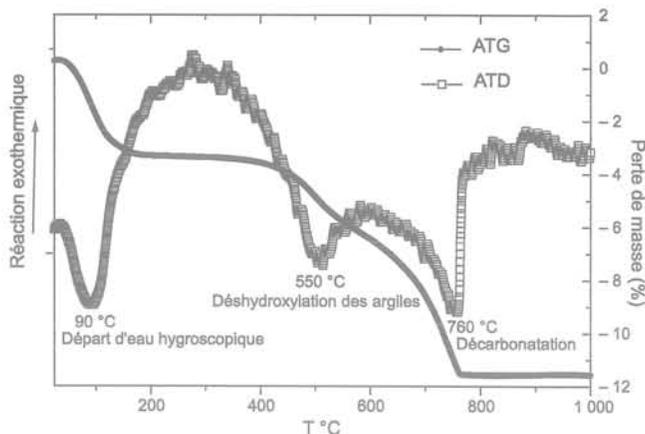


Fig. 4 Thermogramme de l'argile AVR.

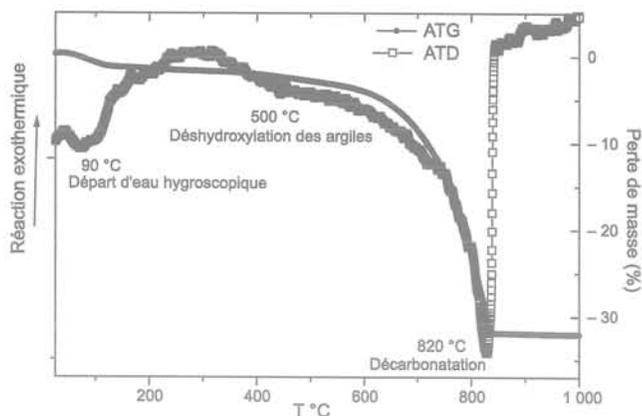


Fig. 5 Thermogramme de l'argile MBA.

TABLEAU IV Minéraux présents dans les matériaux étudiés.

S		I		I/S		AVR		MBA	
S	S _p	I	I _p	I/S	I/S _p	AVR	AVR _p	MBA	MBA _p
SM	SM	IL	IL	SM	SM	SM	SM	SM	SM
Q		Q		IL	IL	IL	IL	IL	IL
C		C		Z		K	K	K	K
				Q		Q		Q	
				C		C		C	

SM : smectite, IL : illite, K : kaolinite, Q : quartz, C : carbonates, Z : zéolite

4.2

Influence du temps de dispersion dans l'essai au bleu sur la mesure de la valeur au bleu, en fonction de la minéralogie

Les figures 6 et 7 présentent la variation de la valeur au bleu en fonction du temps de dispersion initiale pour une illite (I), une smectite (S) et un interstratifié illite/smectite (I/S) ainsi que pour les matériaux AVR et MBA, à l'état brut et purifié.

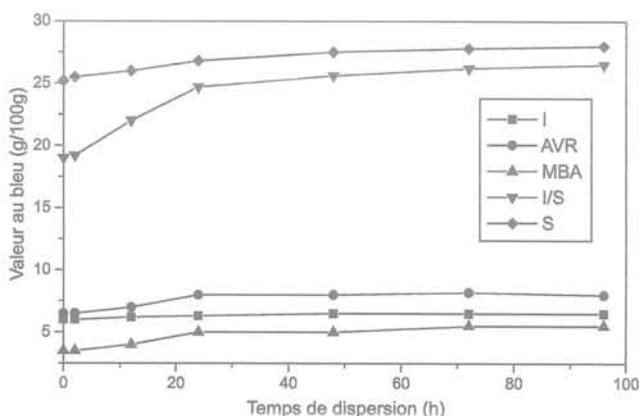


Fig. 6 Variation de la valeur au bleu en fonction du temps de dispersion des argiles pures.

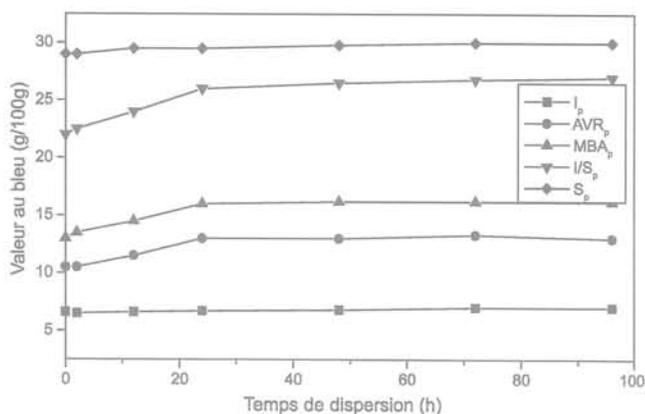


Fig. 7 Variation de la valeur au bleu en fonction du temps de dispersion des argiles brutes.

Les résultats montrent que :

– qualitativement, les cinq matériaux, à l'état brut et purifié, présentent le même comportement : augmentation de la valeur au bleu avec le temps de dispersion jusqu'à une stabilisation aux alentours de 24 h. Cependant, d'un point de vue quantitatif, les valeurs au bleu des argiles purifiées sont nettement plus fortes que celles des argiles brutes pour les mêmes temps de dispersion. Ceci peut être expliqué par la présence d'« impuretés » (minéraux présents autres que des minéraux argileux), de très faible surface spécifique, dans la fraction argileuse < 2 μm traitée ;

– l’illite purifiée présente la valeur au bleu (VB), et donc la capacité d’échange cationique ainsi que la surface spécifique, les plus faibles des cinq matériaux. Ceci peut être expliqué par la structure minéralogique de l’illite où les cations potassium interfoliaires sont solidement intégrés à la structure et rendent les espaces interfoliaires quasiment inaccessibles aux molécules de bleu de méthylène (Charlet et Schlegel, 1999) ;

– le sol argileux MBA présente dans son état naturel brut les valeurs les plus faibles de VB par rapport aux quatre autres matériaux. Cependant, lorsqu’il est purifié, ces valeurs dépassent celles de l’illite ainsi que celles de AVR. Ceci est expliqué par l’importante quantité de calcite au sein de ce matériau brut (de l’ordre de 64 %) qui, après purification, n’est plus présente dans la fraction argileuse pure, ce qui a pour conséquence d’augmenter les propriétés de surface du matériau analysé ;

– contrairement aux argiles de type smectite et de type illite, les valeurs de VB de l’argile interstratifiée illite/smectite et des deux matériaux AVR et MBA (mélanges d’illite, smectite et de kaolinite), à l’état naturel et purifié, varient beaucoup entre leur état initial et après 24h de dispersion. Cette variation pourrait être expliquée pour l’argile interstratifiée par la mixité des feuillets et pour les argiles AVR et MBA par le mélange de différents minéraux argileux. Cette mixité pourrait diminuer la vitesse de pénétration du solvant au sein des particules argileuses.

L’illite et la kaolinite se comportent comme des obstacles à l’accès à la totalité des feuillets gonflants. Ce retard à l’accessibilité des feuillets gonflants est estimé à 24 h. Au-delà, la présence de l’illite et de la kaolinite n’a plus d’influence visible sur la valeur de bleu.

Compte tenu de ces résultats, un temps de dispersion de 24 h est pris en compte pour le reste des études expérimentales.

4.3

Influence du mode de séchage sur la valeur au bleu

La figure 8 montre l’influence du mode de séchage sur la variation de la valeur au bleu de cinq matériaux purifiés : AVR, MBA, I, I/S et S.

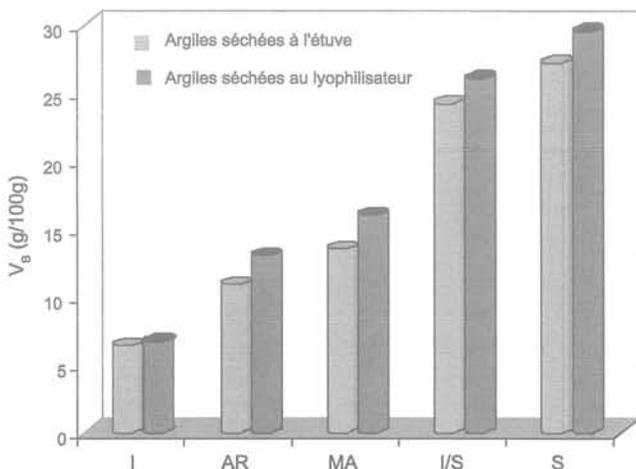


Fig. 8 Influence du mode de séchage sur la valeur au bleu des argiles purifiées.

Les résultats de cette étude montrent que les valeurs au bleu des argiles séchées par lyophilisation sont systématiquement supérieures à celles des argiles pures séchées à l’étuve. Cependant, l’influence de la lyophilisation n’est pas la même pour toutes les argiles. En effet, dans le cas de l’illite, l’augmentation de la valeur au bleu est inférieure à celle de la smectite.

Ceci peut être expliqué par le fait que la lyophilisation exfolie les feuillets et donc permet un meilleur accès aux surfaces développées par les minéraux argileux entraînant l’augmentation de la valeur au bleu. Dans le cas de l’illite toutefois, les liaisons entre les feuillets successifs sont si fortes que la lyophilisation ne parvient à exfolier que très peu des feuillets, contrairement aux smectites.

4.4

Influence du pourcentage massique de l’argile lyophilisée sur la valeur au bleu

La figure 9 présente les résultats obtenus pour la variation de la valeur au bleu des cinq matériaux d’étude en fonction du pourcentage massique d’argile purifiée lyophilisée dans l’eau calculé par la formule suivante :

$$\% \text{massique} = \frac{m_{\text{argile}}}{m_{\text{argile}} + m_{\text{eau}}}$$

On a utilisé des suspensions de 1, 2 et 3 g d’argile dans 100 g de masse totale (argile + eau).

Les résultats montrent que la valeur au bleu ramenée à 1 g par 100 g d’argile diminue en fonction du pourcentage massique. Cette diminution suit approximativement une loi linéaire.

Les valeurs au bleu correspondant à un pourcentage massique de 1 % d’argile purifiée séchée à l’étuve, ont été reportées sur la figure 9. Les résultats montrent que la valeur au bleu de l’argile séchée à l’étuve pour une concentration massique de 1 %, correspond à la valeur au bleu pour les argiles lyophilisées, pour les concentrations massiques suivantes : 1,54 % (MBA_p), 1,44 % (AVR_p), 1,33 % (I_p), 1,82 % (I/S_p) et 1,77 % (S_p).

On peut considérer qu’une augmentation du pourcentage massique entraîne un réarrangement des feuillets exfoliés qui diminue l’accessibilité aux surfaces développées par les feuillets d’argile.

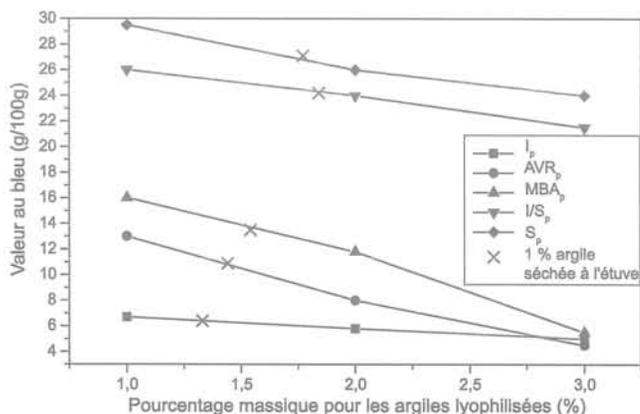


Fig. 9 Influence du pourcentage massique sur la valeur au bleu des argiles purifiées.

Conclusion

L'étude de l'influence des paramètres expérimentaux sur la détermination de la capacité d'échange cationique et de la surface spécifique à partir de l'essai au bleu de deux formations argileuses de la région parisienne comparées à celles d'une smectite, d'une illite et d'un interstratifié smectite/illite a permis de conclure que :

- la valeur au bleu des matériaux argileux augmente avec le temps de dispersion et se stabilise aux alentours de 24 h (Fig. 7) ;
- le séchage par lyophilisation permet un meilleur accès aux surfaces développées par les minéraux argileux, en comparaison avec le séchage en étuve (Fig. 8) ;
- la concentration massique de la suspension intervient également : plus celle-ci est forte, plus l'accès aux surfaces des minéraux argileux est difficile et plus la valeur au bleu diminue (Fig. 9) ;
- les matériaux bruts ou purifiés suivant un protocole bien précis, présentent qualitativement le même comportement : une augmentation de la valeur au bleu avec le temps de dispersion. Bien évidemment, d'un point de vue quantitatif, ces valeurs sont nettement plus importantes pour les argiles purifiées que pour les argiles brutes, pour un temps de dispersion donné ;

- la mixité des feuillets des minéraux argileux interstratifiés ou des mélanges d'argiles, influent sensiblement sur les résultats. En effet, la présence d'illite et /ou de kaolinite retarde l'accessibilité aux feuillets gonflants de smectite pour un temps de dispersion inférieur à 24 h.

Ces travaux montrent, dans l'essai d'adsorption de bleu de méthylène, d'une part que les paramètres expérimentaux, mode de préparation des échantillons, concentration massique et temps de dispersion de la suspension, sont importants. D'autre part que l'influence de ces paramètres est fonction du type de minéraux argileux présents dans le sol.

En conséquence, le mode opératoire habituel de l'essai au bleu permet seulement une mesure, par défaut de la surface spécifique. Dans un sol naturel, la surface spécifique réelle, accessible aux solutions interstitielles, peut donc être significativement supérieure à celle calculée à partir de l'essai au bleu.

REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet de recherche : « Aléa et risque sécheresse » soutenu par la Fondation MAIF, du projet ARGIC : « Analyse du retrait-gonflement et de ses incidences sur les constructions » soutenu par l'ANR et de la fiche recherche « Sécheresse géotechnique et bâti » du Réseau de recherche sur le développement durable, soutenu par la région Ile-de-France.

Bibliographie

- AFNOR. - Sols : Reconnaissance et essais. Détermination des limites d'Atterberg. Limite de liquidité à la coupelle. Limite de plasticité au rouleau. Association française de normalisation, 1993.
- Brindley G.W., Brown G. - X-ray diffraction procedures for clay mineral identification. In: Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification. *Mineralogical Society*, London, 1980, p. 305-359.
- Caillère S., Henin S., Rautureau M. - *Minéralogie des argiles*, Tomes I et II. Masson, Paris, 1982.
- Carter D.L., Heilman M.D., Gonzalez C.L. - Ethylene glycol monoethylether for determining surface area of silicate minerals. *Soil Science*, vol. 100, n° 5, 1965, p. 356-360.
- Carter D.L., Mortland M.M., Kemper W.D. - Specific surface. *Methods of soil analysis*, A. Klute (ed.), Part I. Physical and mineralogical methods: 2nd. ASA publication 9, Madison, Wisconsin, 1986, p. 413-423.
- Charlet L., Schlegel M. - La capacité d'échange des sols. Structure et charges à l'interface eau-particule. *CR. Acad. Agric. Fr.*, vol. 85, n° 2, 1999, p.7-24
- Chen F.H. - *Foundations on expansive soils. Developments in Geotechnical Engineering*, vol. 54, Elsevier publishing Co., Amsterdam, 1988, 464 p.
- Clément C. - *Étude de coulis hydrauliques pour la rétention de cations polluants : Pb, Cd, Hg, Sr, Cs*. Thèse de doctorat de l'École supérieure des mines Paris, 1988, 40 p.
- Dixon J.B., Weed S.B. - Minerals in soil environments. Soil Science Society of America USA, 1976. NJ, US Patent, vol. 3, n° 3976, 1977, p. 598.
- Drits V.A., Tchoubar C. - *X ray diffraction by disordered lamellar structures: theory and application to microdivided silicates and carbons*. Springer Verlag, New-York, Berlin, Heidelberg, 1990, 372 p.
- Glaser R., Mering J. - Domaine d'hydratation homogène des smectites. *Compte rendu de l'Académie des sciences*. Paris. 267 Série D, 1968, p. 463-466.
- Green-Keely R. - The montmorillonite minerals. *The differential thermal investigation of clays* R.C. Mackenzie (ed.), Mineralogical Society, London, 1957.
- Grim R.E. - *Applied clay mineralogy*. McGraw-Hill Book Company, INC, Londo, 1962n.
- Hang P.T., Brindley G.W. - Methylene blue adsorption by clays minerals. *Clays and Clay Minerals*, vol. 18, 1970, p. 203-212.
- Heilman M.D., Carter D.C., Gomzales C.L. - Ethylene glycol monoethylether (EGME) technique for determining soil-surface area of silicate minerals. *Soil Science*, n° 100, 1965, p. 409-413.
- Lambe T.W., Whitman R.V. - Description of an assemblage of particules (p. 29-39); Normal stress between soil particles (p. 52-60). *Soil Mechanics*, Wiley & Sons, New York, 1973.
- Laribi S., Fleureau J.-M., Grossiord J.-L., Ariguib N. - Effect of pH on the rheological behavior of pure and interstratified smectite clays. *Clays and Clay Minerals*, n° 54, 2006, p. 29-37.
- Mitchell J.K. - *Fundamentals of soil behaviour*. Wiley & Sons, New York, 1993 (2nd ed.).
- Mouroux P., Margon P., Pinte J.-C. - La construction économique sur sols gonflants. *Manuels et Méthodes*, 14, Éd. Du BRGM, 1989.
- Oinuma K., Hayashi H. - Infrared spectra of clay minerals. *J. Tokyo Univ., Gen. Educ. (Nat. Sci.)* n° 9, 1968, p. 57-89.
- Reynolds R.C. - Interstratified clay minerals. *Crystal structure of clay minerals and their X-ray identification*, G.W. Brindley and G. Brown (eds), Mineralogical Society, London 1980, p. 249-303.
- Source Clays Repository: <http://cms.lanl.gov>
- Tessier D. - Behaviour and microstructure of clay minerals. *Soil colloids and their Associations in Aggregates*, M.F De Boodt, M.H.B. Hayes and A. Herbillon (eds), Plenum Press, New York, 1991, p. 387-415.
- Tran N.L. - Un nouvel essai d'identification des sols : l'essai au bleu de méthylène, *Bulletin de liaison des LPC*, n° 88, 1977, p. 136-137.
- Tran N.L., Millon-Devigne P. - L'essai de bleu de méthylène turbidimétrique. *Bulletin de l'Association internationale de géologie de l'ingénieur*, n° 29, 1984, p. 453-456.
- Van Olphen H. - *Introduction to clay colloid chemistry*. Wiley and Sons, New York, 1977, 2nd ed.
- Weir A.H., Greene-Kelly R. - Beidellite. *American Mineralogist*, n° 47, 1962, p. 137-146.

Recherche des paramètres d'identification géotechnique optimaux pour une classification des sols sensibles au retrait-gonflement

M. CHRÉTIEN

Université Bordeaux 1
Géosciences Hydrosociences
Matériaux Construction
(GHYMAC, ex-CDGA)
Avenue des Facultés
33405 Talence cedex

Bureau d'étude
géotechnique AIS
Grand Sud,
28 avenue Grange Noire
33708 Mérignac
m.chretien@ghymac.u-bor-
deaux1.fr

**R. FABRE
A. DENIS
A. MARACHE**

Université Bordeaux 1
Géosciences Hydrosociences
Matériaux Construction
(GHYMAC, ex-CDGA)
Avenue des Facultés
33405 Talence cedex

Résumé

L'article présente les premières mesures géotechniques réalisées sur des argiles gonflantes de deux formations géologiques plio-quaternaires d'aléa connu et provenant de quatre sites d'un même quartier de la commune de Pessac dans l'agglomération bordelaise (Gironde). Les quatre sites de prélèvement correspondent à des parcelles avec des sinistres sur constructions du type maison individuelle liés à des mouvements de sols différentiels.

Dans la première partie de ce travail, la formation géologique argileuse de Brach est détaillée du point de vue lithologique, et étudiée essentiellement au niveau d'un secteur limité de la commune de Pessac, là où les sinistres se concentrent depuis 1989. La carte de l'aléa retrait/gonflement, établie par le BRGM à l'échelle du département, indique que la formation de Brach présente un aléa faible à moyen. Dans cette formation, les sols argileux ont été caractérisés par leurs paramètres géotechniques de laboratoire les plus classiques (plasticité, valeur de bleu, etc.), ce qui a permis d'établir un classement des potentiels de gonflement et de retrait de chacun des sites. Dans la deuxième partie, l'étude porte sur l'analyse des différents paramètres géotechniques établis et d'autres plus spécifiques (CEC, MO, C₂). Ce travail permet d'appréhender plus finement les paramètres optimaux dirigeant la susceptibilité des sols vis-à-vis du retrait/gonflement pour une même formation et ceci à grande échelle, celle d'un quartier.

Mots-clés : argiles, retrait/gonflement, sinistres, aléa, caractérisation géotechnique, statistique, analyse en composantes principales (ACP).

Determination of major parameters for a geotechnical classification of soils to swelling-shrinkage

Abstract

The article presents the first geotechnical measurements carried out on swelling clays of a few plio-quaternary geological formations of known risk and coming from four sites of the same district of the Pessac's commune in Bordeaux agglomeration (Gironde, France). The four sites of samples correspond to area with disasters on buildings as individual constructions relied to differential movement of expansive soils. In the first part of this study, the clayey geological formation of Brach is detailed from the lithological point of view, and essentially studied on a limited area of Pessac, where the disasters concentrate since 1989. The map of shrinkage-swelling clay hazard, established by the BRGM at the scale of a department, indicates that the Brach formation presents a low to medium risk. In this formation, the clayey soils were characterized from classic laboratory geotechnical parameters (plasticity, blue methylene absorption, etc.), what has allowed

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 30 avril 2008.

establishing a classification of the potentials of swelling and shrinkage of each site. In the second part, the study focuses on the analysis of previous geotechnical parameters on studied sites and others more specific (CEC, MO, C_p). This study apprehends more accurately optimum parameters directing the susceptibility of soils facing to swelling-shrinkage for a same geological formation and at a large scale, that of a district.

Key words: Clay, swelling, shrinkage, identification, hazard, geotechnical characterization, statistic, ACP.

1

Introduction

En France, les sinistres occasionnés aux habitations par des mouvements différentiels liés à la présence de sols argileux ont représenté depuis 1989 une part importante et croissante des indemnités versées au titre de catastrophes naturelles. Ces phénomènes, mis en évidence par des désordres affectant le bâti lors des sécheresses exceptionnelles des étés 1976 et 1989, puis plus récemment au cours des étés 2003 et 2005, ont montré un manque de connaissance du phénomène de retrait/gonflement de certaines formations géologiques argileuses régionales et l'absence d'une méthodologie de reconnaissance prédictive du phénomène.

Le phénomène de retrait et de gonflement se manifeste lorsqu'un sol voit sa consistance se modifier en fonction de sa teneur en eau et subir d'importantes variations de volume. Ces variations peuvent s'exprimer soit par un gonflement lors d'une humidification des pores qui vont se saturer progressivement en permettant l'entrée plus ou moins facile de l'eau entre les feuillets argileux, soit par un retrait (diminution de volume). Ces phénomènes sont spécifiques de certaines familles d'argiles et, en particulier, des smectites qui sont des minéraux argileux dits « gonflants ». Sous climat tempéré, les argiles situées à faible profondeur sont le plus souvent proches de la saturation et déconsolidées, induisant un faible potentiel de gonflement. Mais suite aux périodes de sécheresse, ces sols ont des consistances qui les rapprochent de leur limite de retrait avec une teneur en eau à partir de laquelle toute nouvelle perte d'eau provoquera l'apparition de fissures par dessiccation à la surface du sol. Dans ce contexte, les sinistres surviennent dans la majorité des cas à la suite de périodes de sécheresse intenses et/ou prolongées.

Cette problématique recoupe les préoccupations d'un programme de recherche national financé par l'Agence nationale de la recherche, dit « ARGIC » pour Analyse du phénomène de Retrait Gonflement et Incidences aux Constructions, thème de recherche auquel nous participons pour la partie géotechnique et méthodologique en région Aquitaine et plus particulièrement en Gironde (commune de Pessac). Ce programme de recherche regroupe de nombreux partenaires français¹. Nous présentons ici les premiers résultats de ces travaux qui s'orientent vers la détermination des paramètres géotechniques de formations régionales à risque par rapport à la « sécheresse » dans des secteurs très urbanisés de la région bordelaise. Il a été choisi de

¹ Partenaires du projet ARGIC : Armine-CGI ; École centrale de Paris-LSSMAT ; ENPC-CERMES ; ESIP-HydrASA ; INERIS ; INPL-LAEGO ; INRA ; Insavalor-URGC ; LCPC et Météo-France ; université Bordeaux 1-GHYMAC, ex. CDGA.

travailler sur la commune de Pessac (Gironde, 33), sur un secteur limité d'aléa connu et à partir des cartes éditées par le BRGM, là où se concentrent la majorité des sinistres sur des formations quaternaires classées à aléa moyen à faible mais peu identifiées du point de vue géotechnique.

Le travail consiste à analyser le phénomène de retrait/gonflement de deux formations argileuses locales à l'origine de sinistres sur une petite échelle à l'aide des paramètres d'identification géotechniques en laboratoire classiques tels que l'indice de plasticité, la valeur de bleu et la teneur en argiles, pour les principaux, mais aussi d'autres paramètres moins utilisés (CEC, MO), tout en tenant compte de l'influence du bâti existant. Nous proposons une première identification des paramètres géotechniques les plus pertinents pour l'élaboration à terme d'une méthodologie de reconnaissance prédictive du phénomène de retrait/gonflement.

2

Contexte de l'étude

2.1

Localisation de l'étude

L'étude est réalisée sur la commune de Pessac (Gironde, 33), située au sud de l'agglomération bordelaise (Fig. 1), où plus de 200 sinistres ont été déclarés durant les 20 dernières années. La commune a fait l'objet de six arrêtés de « catastrophe naturelle » liés aux mouvements de terrain par tassements différentiels, suite aux différentes périodes de sécheresse survenues entre 1989 et 2003. Ces sinistres mettent en cause plusieurs formations géologiques du Quaternaire sur l'ensemble de la commune (terrasses alluviales, colluvions et complexe fluviatile landais).

L'étude porte sur deux formations géologiques argileuses responsables de nombreux sinistres : il s'agit de la formation de Brach et de la formation de Belin (Platel, 2004). Ces deux formations recouvrent toute la partie ouest de la commune de Pessac (Fig. 2) et représentent environ 40 % de la superficie totale de la commune. L'occurrence des sinistres localisés sur ces deux formations représente 42 % de ceux recensés sur l'ensemble de la commune. Pour la formation de Brach, les sinistres observés se concentrent particulièrement au niveau d'un quartier à l'ouest de la commune fortement urbanisé, dit quartier de « Cap de Bos » (Fig. 1). Ce quartier se situe au droit de la formation de Brach et à la limite avec la celle de Belin. Il constitue notre zone d'étude.

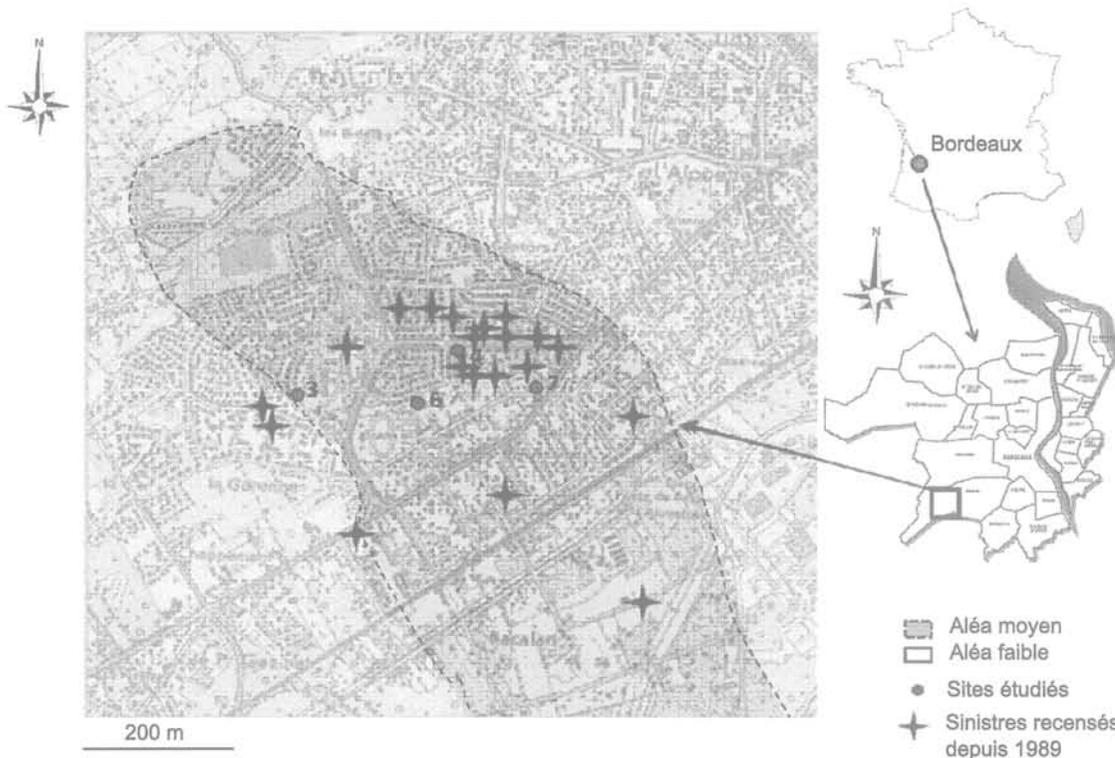


FIG. 1 Carte de l'aléa retrait/gonflement des argiles sur le quartier de Cap de Bos à Pessac (33) avec localisation des sites étudiés et des sinistres recensés depuis 1989 sur le quartier.
Map of shrinkage – swelling clay hazard on Cap de Bos area in Pessac (33) with location of studied area and damaged buildings established since 1989 on this area.

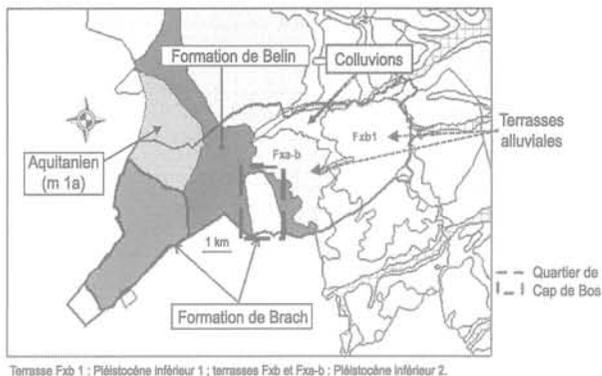


FIG. 2 Contexte géologique de Pessac avec position des terrasses alluviales et de la zone à l'étude.
Geological map of Pessac with position of alluvial terraces and studied area.

2.2

Contexte géologique du site

D'après la carte géologique de Pessac à l'échelle 1/50 000, la commune de Pessac se situe à la limite entre la grande région naturelle des Landes girondines à l'ouest et les terrasses alluviales de la Garonne à l'est. Les Landes girondines montrent à l'affleurement le sable des Landes (Pléistocène supérieur) qui s'étale sans rupture morphologique importante sur les formations de Brach et de Belin. Le substratum tertiaire n'affleure que sporadiquement à la faveur du creusement et de l'érosion de la couverture plio-quadernaire par les affluents de la rive gauche de la Garonne tel que le Peugue. Deux domaines se distinguent alors, avec à l'est les alluvions

graveleuses à argilo-graveleuses de la Garonne (Fig. 2) notées terrasses alluviales Fxa-b et Fx1b sur la carte géologique de Pessac (Thierry *et al.*, 2006), et à l'ouest les dépôts plio-quadernaires argilo-sableux du complexe landais (Fig. 3). Des colluvions issues des hautes terrasses s'intercalent entre les terrasses alluviales. Les deux formations géologiques étudiées sont celles qui affleurent sous une couverture sableuse d'épaisseur variable à l'ouest de la commune. Les formations de Belin et de Brach correspondent à des étapes de comblement de la plaine deltaïque des Landes. Dans le détail, la formation de Brach s'est déposée du Médoc jusqu'au sud de Bordeaux. Elle se caractérise par des sols à faciès argileux gris bleu à gris noir, à marbrures ocre lorsqu'elle est peu altérée (Fig. 4). Cette formation est un témoin des anciennes nappes alluviales du Pléistocène inférieur, avec une puissance variant entre 2 et 10 m, voire atteignant 12 m à Saucats (Platel et Astruc, 2000). Ces dépôts sont souvent sous forme de lentilles de sables argileux et d'argiles silteuses plastiques, dont la teneur en argile peut atteindre entre 70 et 90 % ; les minéraux sont essentiellement composés de kaolinite (30 à 80 %) et d'interstratifiés I/S (10 à 20 %) (Platel, 2004). Des débris ligniteux peuvent y être observés. Cette formation, d'âge Pléistocène, représente la partie sommitale de la formation de Belin, et correspond aux « sables et graviers de base » du Médoc (Dubreuilh, 1976 ; Dubreuilh *et al.*, 1995). La formation de Belin est principalement constituée de graviers très arrondis blanchâtres et de sables grossiers emballés dans une matrice argileuse kaolinique plus ou moins abondante (5 à 20 %) (Dubreuilh *et al.*, 1995). Le passage entre ces deux formations n'est pas toujours bien identifiable, à cause de changements de faciès liés aux fortes altérations locales des horizons argileux et à la présence de passées sableuses réparties de façon aléatoire dans la zone d'étude.

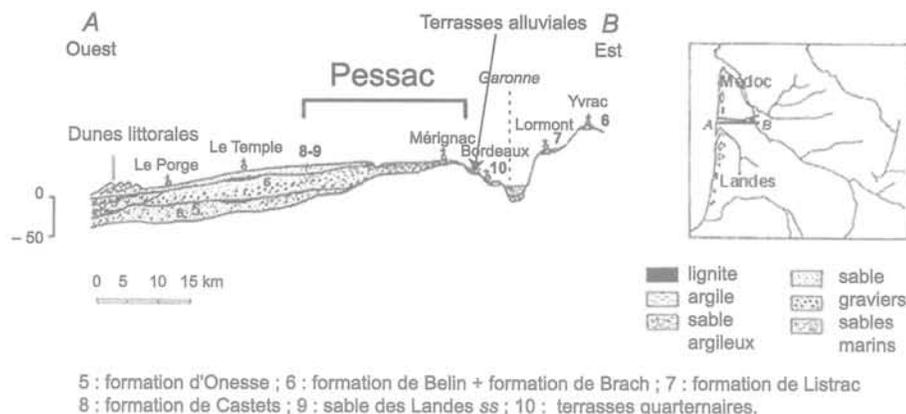


FIG. 3 Coupe des formations continentales landaises au travers du Médoc.
Cross-section of continental formations within the Landes domain through the Médoc area.

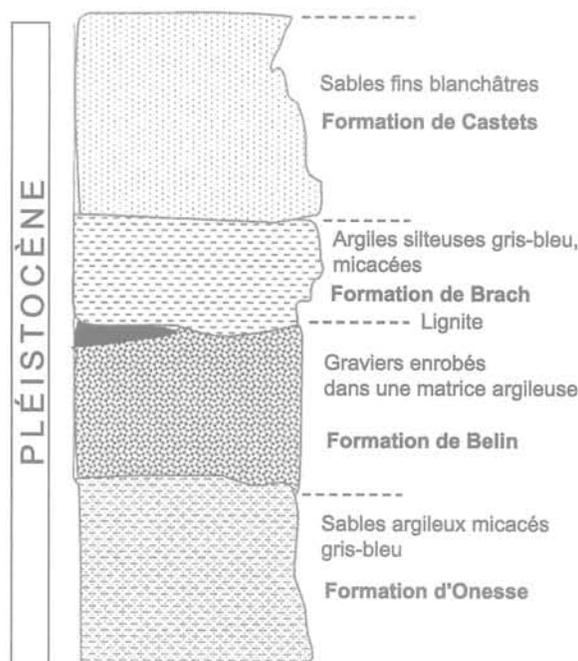


FIG. 4 Coupe lithostratigraphique synthétique des formations continentales landaises du Pléistocène.
Lithostratigraphic log of Pleistocene continental formations within the Landes domain.

2.3

Carte de l'aléa retrait/gonflement sur le secteur étudié

La partie de la carte de l'aléa retrait/gonflement des sols argileux de la Gironde éditée par le BRGM (Platel *et al*, 2004), relative au secteur d'étude du quartier de Cap de Bos (Fig. 1), montre que le quartier repose sur des formations reconnues d'aléa moyen à faible.

La carte d'aléa établie par le BRGM consiste, en s'appuyant sur les cartes géologiques à l'échelle 1/50 000, à délimiter les zones d'affleurement des formations argileuses. Une fois ces formations identifiées, elles sont hiérarchisées en fonction de critères lithologiques, minéralogiques (nature des minéraux argileux) et géotechniques, en se basant sur des résultats d'essais d'identification de l'argilosité tels que la valeur de

bleu (VBS) et l'indice de plasticité (I_p). Les critères géotechniques utilisés pour la réalisation de cartes départementales à petite échelle (1/25 000) sont peu nombreux. Aussi l'estimation de l'aléa se base sur quelques données d'essais géotechniques courants, énumérés précédemment, fournies par quelques bureaux d'études de sol lors d'expertises de sécheresse (Vincent, 2003). Cette hiérarchisation des formations argileuses permet d'établir une carte de susceptibilité vis-à-vis du retrait/gonflement. La carte départementale d'aléa résulte alors de la combinaison de la carte de susceptibilité et celle de densité des sinistres recensés par formation, ramenée à la surface d'affleurement effectivement urbanisée de chaque formation (Vincent, 2003). L'affichage de cette carte à une plus petite échelle se fait sans étude complémentaire, elle reste donc une donnée indicative.

Les sinistres dans leur contexte géotechnique

3.1

Types de sinistres rencontrés

Les phénomènes de retrait/gonflement se manifestent par l'apparition de désordres principalement sur les habitations individuelles. Ces habitations sont pour la plupart des maisons en simple rez-de-chaussée construites dans les années 1980. Elles reposent sur des fondations superficielles par semelles filantes ou radier général, ancrées entre 0,50 m et 0,80 m de profondeur, sans sous-sol ni vide sanitaire, avec un dallage sur terre-plein non solidarisé aux fondations. Des défauts structurels inhérents à la construction tendent à aggraver la prédisposition aux désordres des bâtis : chaînages bas et haut absents, absence de joints de rupture entre les différents corps de bâtiments, etc. Certaines de ces habitations sont des maisons mitoyennes comme décrites précédemment, solidaires entre elles par le garage, et présentant le même type de désordres. L'habitation du site n°3 présente une particularité par rapport aux autres sites : une reprise en sous-cœuvr par micropieux réalisée en 1990, ancrée dans un niveau sablo-argileux à graveleux vers 4,00 m de profondeur ; cette reprise n'a pas permis de stabiliser les désordres de troisième génération en 2006. Les principaux désordres observés (Fig. 5) sont typiques de tassements différentiels de fondations (Mouroux *et al.*, 1988), avec :

a) fissure verticale de traction par flexion en partie haute de l'habitation. Ce type de fissure est dû à un gonflement différentiel avec une intensité maximum au centre du bâtiment. Ces fissures ont tendance à s'ouvrir à la suite d'épisodes pluvieux ;

b) fissures horizontales de traction à hauteur des fenêtres, avec un décollement du soubassement en pignon. Ces fissures résultent d'un tassement différentiel d'un pignon par rapport au reste de la construction ;

c) fissures horizontales, obliques et verticales des cloisons intérieures. Ces fissures sont provoquées par le décollement des cloisons par rapport au plafond et sont dues au tassement central (ou au gonflement) du dallage ;

d) fissures de cisaillement, en diagonale, dues à un tassement différentiel en coin du bâtiment. Le pignon est soumis, dans ce cas, alternativement au gonflement et au tassement suivant les saisons. Cela se traduit par des cycles d'ouverture et de fermeture visibles à périodes régulières et saisonnières par les habitants.

3.2

Essais d'identification

Des essais d'identification ont été effectués sur des échantillons prélevés à différentes profondeurs sous et à proximité des bâtis endommagés situés sur les formations de Brach et de Belin. Les résultats des essais en laboratoire sont rassemblés dans le tableau 1 et ont

été acquis sur les quatre parcelles du quartier de Cap de Bos repérées sur la figure 1.

Sur les parcelles sinistrées, différentes mesures ont été réalisées afin d'identifier le potentiel gonflant et rétractant des sols argileux, ce sont :

- les limites d'Atterberg : limite de liquidité (w_L) et indice de plasticité (I_p) ;
- la granulométrie : passants à 80 μm et 2 μm (C_2) ;
- la teneur en eau (w_{nat}) ;
- la valeur de bleu (VBS) ;
- la capacité d'échange cationique (CEC) ;
- le pH de l'eau ;
- la teneur en matière organique (MO) ;
- la teneur en carbonates (CaCO_3) ;
- l'activité : $A_C = I_p/C_2$ (Skempton, 1953) et $A_{CB} = (100 \cdot \text{VBS})/C_2$ (Lautrin, 1989) ;
- la surface spécifique des argiles contenues dans le sol (SS).

L'essai au bleu de méthylène (VBS) est un essai simple et rapide qui permet de quantifier la capacité d'absorption en eau des particules argileuses d'un sol, et de le relier indirectement à la surface spécifique développée par les minéraux argileux (SS). Une relation directe [1] apparaît entre la surface spécifique et la valeur de bleu, mise en évidence par Gaillabaud et Cinot (1982) et citée par Bultel (2001) :

$$SS \text{ (m}^2\text{/g)} = 20,93 \times \text{VBS} \text{ (0/D}_{\text{max}}) \quad (1)$$

avec D_{max} : diamètre maximal des grains contenus dans la fraction globale du sol.

D'autres essais en laboratoire sur des échantillons non remaniés sont en cours de réalisation (essais de gonflement, essais œdométriques, retrait linéaire) pour compléter les données, ainsi qu'une analyse minéralogique (diffraction RX) pour l'identification des différentes familles d'argile des formations de Brach et de Belin. Les premiers résultats qualitatifs indiquent que les argiles silteuses grises-ocres du site n° 3 sont essentiellement riches en illite/muscovite puis en kaolinite et très peu en smectites. Les argiles ocres moins silteuses du site n° 4 sont au contraire riches en smectites et interstratifiés I/S puis kaolinite.

4

Résultats de l'étude

Dans le cadre des sinistres sur habitations, on cherche dans un premier temps à connaître la structure du bâtiment puis à déterminer le comportement des sols d'assises des fondations pour en déduire si c'est bien la nature du sol qui est responsable des désordres observés. Nous nous intéressons principalement aux caractéristiques géotechniques des sols dans les trois premiers mètres, soit dans la zone active du sol agissant sur les fondations. Les formations ont été étudiées à partir de sondages à la tarière descendus jusqu'à 5,20 m de profondeur et réalisés le long d'un transept d'environ 800 m de longueur à travers les formations et passant par les quatre parcelles étudiées. Dans ce travail, 22 échantillons ont été prélevés sur les quatre parcelles sinistrées avec quatre profils type représentatifs des formations de Brach et de Belin. Les coupes lithologiques montrent des argiles dominantes sur une épaisseur d'environ 2,50 m à 4,20 m, alternant

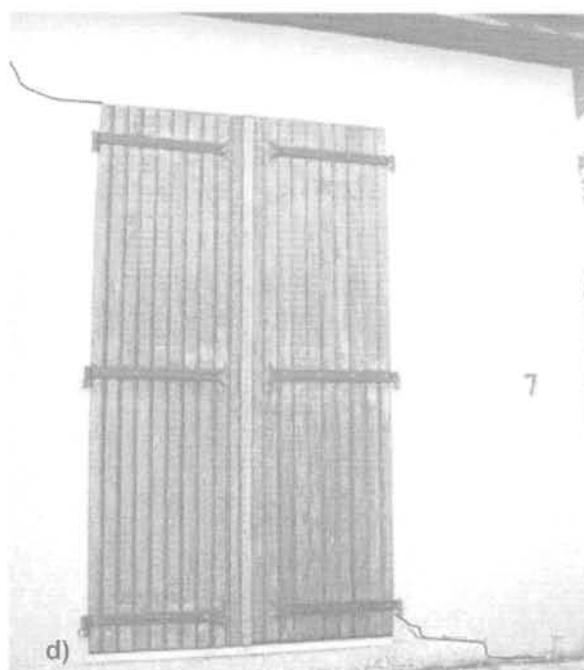
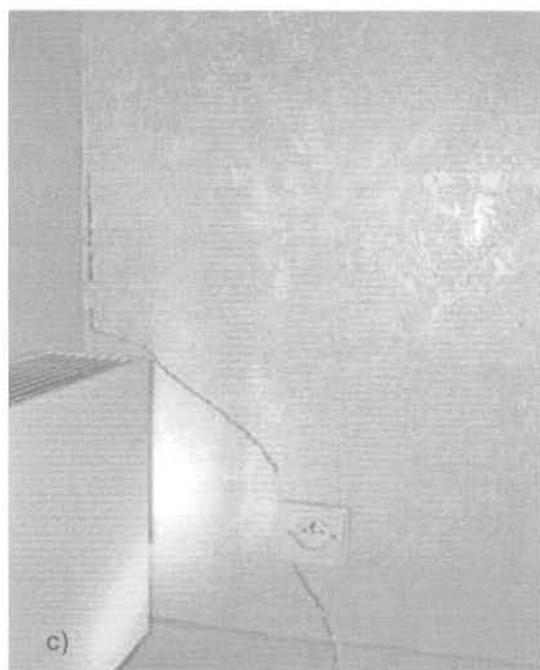
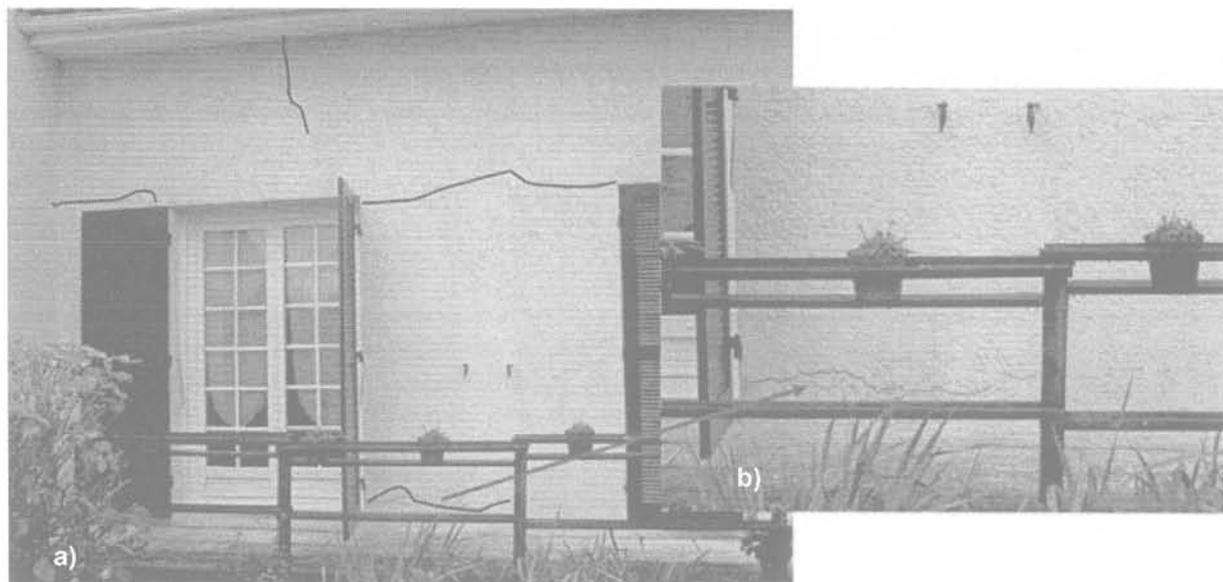


FIG. 5 Exemples de désordres dans les constructions localisées sur le quartier de Cap de Bos à Pessac :
 a) Fissure verticale haute ; b) Fissures horizontales au niveau du soubassement et des fenêtres ; c) Fissures en diagonale et verticale ouvertes au niveau des cloisons intérieures ; d) Fissures en diagonales.
 Examples of disorders in buildings localized on Cap de Bos area in Pessac.

avec des sables argileux (Fig. 6). Les profils hydriques réalisés sur les quatre sites de l'étude entre juillet et novembre 2006 (Fig. 7) indiquent que les sols sont fortement déshydratés sur les deux premiers mètres de profondeur.

Les essais géotechniques montrent une granulométrie à dominante argileuse avec une proportion d'argile (passant à 2 μm C_2) variant de 19,8 % à 48,4 % (Tableau I et Fig. 8). Les couches les plus argileuses se situent entre 1,00 et 3,00 m de profondeur. Notons que les sondages sont destructifs et qu'un remaniement des terrains lors du prélèvement influence les résultats, notamment sur la proportion en sable. Les sols étudiés s'étendent des argiles moyennement plastiques jusqu'à des argiles très plastiques. Sur les profils d'indice de plasticité (I_p) (Fig. 9), on constate que la plasticité

augmente significativement à partir d'1,00 m de profondeur et reste élevée jusqu'à 3,10 m de profondeur dans la majorité des cas. Les valeurs élevées de l'essai au bleu de méthylène (VBS) des échantillons confirment leur plasticité élevée. En terme de surfaces spécifiques (SS) reliées par calcul aux valeurs de bleu, ce sont les sols argileux des sites n° 4 et 7 qui possèdent les surfaces spécifiques les plus élevées et supérieures à 130 m^2/g . Ces horizons semblent être riches en minéraux gonflants du type smectites et interstratifiés illite-smectite (Platel, 2004). Pour les sites n° 3 et 6, les valeurs de SS indiqueraient des horizons argileux à dominante de kaolinite et d'illite. Les premières analyses minéralogiques qualitatives tendent à confirmer ces résultats indirects.

TABLEAU I Caractéristiques d'identification des sols étudiés sur le quartier de Cap de Bos à Pessac.
Geotechnical properties of soils studied on Cap de Bos area, Pessac.

Site	Ech.	Profondeur (m)	Faciès	W _{nat} (%)	Ip	VBS (fraction 0/50 mm)	Granulométrie		AC	ACB	SS m ² /g	CEC cmole.kg ⁻¹	pH eau	Ca g/kg	MO g/kg	Classe GTR*	Formation géologique
							< 0,08 mm (%)	< 2 µm (%)									
Parcelle n°3	1	0,45	As	18,1	22	1,4	40,5	29,8	0,7	4,7	29,3	14	8,03	0	22,3	A1	Formation de Belin, en limite Formation de Brach
	2	0,60	A	26,8	24	3,3	44,6	30,0	0,8	11,0	69,1	-	-	-	-	A2	
	3	1,00	A	19,8	39	3,5	48,3	42,7	0,9	8,2	73,3	12,2	5,95	0	9,7	A2/A3	
	4	2,00	A	23,7	40	4,1	52,0	45,7	0,9	9,0	85,8	12,8	6,75	0	14,9	A2/A3	
	5	2,50	A	24	37	5,0	50,3	48,9	0,8	10,2	104,7	11,3	5,45	0	9,5	A2/A3	
Parcelle n°4	2	1,50	SA	-	-	2,3	-	< 7	-	-	48,1	-	-	-	-	A1	Formation de Brach
	3	1,80	As	21	39	3,5	89,1	23,2	1,7	15,1	73,3	8,9	4,6	1,0	2,1	A2/A3	
	4	2,40	A	24	67	8,0	76,6	42,3	1,6	18,9	167,4	17,3	4,6	2,1	3,5	A4	
	6	3,10	A	26	45	8,4	78,0	36,9	1,2	22,8	175,8	16,0	7,1	4,1	0,9	A4	
Parcelle n°6	8	3,80	A	39	42	7,5	70,0	39,9	1,1	18,8	157,0	15,0	8,1	15,8	1,1	A3/A4	Formation de Brach en limite Formation de Belin
	3	1,00	S	-	-	0,7	-	< 7	-	-	14,7	-	-	-	-	B5/B2	
	4	1,30	As	12	16	1,7	-	< 20	-	-	35,6	-	-	-	-	A1/A2	
	5	1,50	A	13	40	2,7	56,4	37,2	1,1	7,3	56,5	11,9	5,63	1,75	3,2	A2/A3	
	6	2,00	A	18	39	3,7	50,8	41,3	0,9	9,0	77,4	10,1	5,23	0,93	1,8	A2/A3	
	7	2,50	As	16	22	1,6	-	< 20	-	-	33,5	-	-	-	-	A1/A2	
Parcelle n°7	8	3,00	SA	-	-	1,3	-	< 20	-	-	27,2	-	-	-	-	B5	Formation de Brach
	9	3,30	A	17	20	1,8	74,0	19,2	1,0	9,4	37,7	4,5	6,42	1,1	0,9	A1/A2	
	1	1,30	As	16	38	3,8	-	20,0	1,9	19,0	79,5	-	-	-	-	A2/A3	
	2	1,50	As	19	39	6,5	63,7	33,2	1,2	19,6	136,0	9,8	6,6	3,5	2,9	A3	
	3	2,00	A	24	59	9,0	58,9	48,4	1,2	18,6	188,4	21,6	7,3	5,0	3,6	A4	
Parcelle n°7	4	3,00	A	24	45	7,5	59,4	42,3	1,1	17,7	157,0	19,6	8,1	83,0	2,4	A3/A4	Formation de Brach
	6	3,95	As	27	50	8,1	73,4	24,1	2,1	33,6	169,5	13,1	7,9	151,0	10,3	A4	

* Classe GTR déterminée selon le fascicule II du SETRA-LCPC *Réalisation des remblais et couches de forme*, 1992.

Faciès : As, argile sableuse/silteuse ; A, argile ; SA, sable argileux/silt argileux ; S, sable ; SG, sable graveleux ; Sc, argile carbonatée du substratum ;

avec : W_{nat}, teneur en eau naturelle (%) ; Ip, indice de plasticité ; VBS, valeur de bleu (g/100 g de sol sur la fraction 0/50 mm) ; < 0,08 mm, passant à 80 µm (%) ; < 2 µm, teneur en particules argileuses inférieures à 2 µm C₂ (%) ; Ac, activité de Skempton ; ACB, activité de Lautrin ; SS, surface spécifique (m²/g) ; CEC, capacité d'échange cationique (cmole.kg⁻¹) ; Ca, teneur en carbonates (g/kg) ; MO, teneur en matières organiques (g/kg).

Coupe géologique		n° 3	
Cote (m) :	0,00 m		Ech.
Terre végétale	0,15 m	Tv	
Argile sableuse ocre-gris	0,45 m	As	1
Argile noire	0,80 m		2
Argile bariolée ocre-gris	1,20 m		3
Argile bleutée à marbrures ocre, avec copeaux de bois	2,00 m	A	4
Argile bleue riche en MO	2,80 m		
Sable limono-graveleux gris, humide	3,50 m	SG	
<i>Observations :</i> Arrêt volontaire du sondage à 3,50 m Niveau d'eau en cours et fin de sondage à 3,50 m			

Coupe géologique		n° 4	
Cote (m) :	0,00 m		Ech.
Terre végétale sableuse	0,80 m	Tv	
Sable argileux gris avec galets	1,40 m	SA	2
Argile grise à marbrures ocre sableuses, à quelques graviers	2,30 m	As	3
Argile grise	2,80 m	A	4
Sable jaunâtre humide, à nodules carbonatés	3,00 m	S	6
Argile marron, très compacte	3,75 m		
Argile bleue, très compacte	3,90 m	A	8
Argile silteuse grise à blanchâtre	5,20 m		
<i>Observations :</i> Arrêt volontaire du sondage à 5,20 m Niveau d'eau en cours et fin de sondage à 3,10 m			

Coupe géologique		n° 6	
Cote (m) :	0,00 m		Ech.
Terre végétale sableuse	0,50 m	Tv	
Sables marron clairs	1,00 m	S	3
Argile sableuse grise à marbrures marron	1,30 m	As	4
Argile gris-marron, très compacte	2,20 m	A	5
Argile grise peu sableuse et peu compacte	3,00 m	As	6
Sable argileux gris, sec	3,20 m	SA	7
Argile grise très compacte	3,30 m	A	8
<i>Observations :</i> Arrêt volontaire du sondage à 3,30 m Pas de présence d'eau en cours et en fin de sondage			

Coupe géologique		n° 7	
Cote (m) :	0,00 m		Ech.
Terre végétale sableuse	0,90 m	Tv	
Argile sableuse marron	1,60 m	As	1
Argile bleue à marbrures marron, compacte	2,50 m	A	2
Sables ocre grossiers carbonatés	2,80 m	S	3
Argile bleue à marbrures marron, compacte	3,00 m	A	4
Sables ocre grossiers carbonatés	3,40 m	S	
Argile sableuse grise compacte, avec nodules carbonatés	4,20 m	As	6
Argile carbonatée, avec débris coquilliers	4,70 m	Sc	
<i>Observations :</i> Arrêt volontaire du sondage à 4,70 m Niveau d'eau en cours et fin de sondage à 4,40 m			

FIG. 6 Coupes lithologiques des sols argileux de la Formation de Brach, quartier de Cap de Bos à Pessac.
Lithological logs of clayey soils from Brach Formation, Cap de Bos area in Pessac.

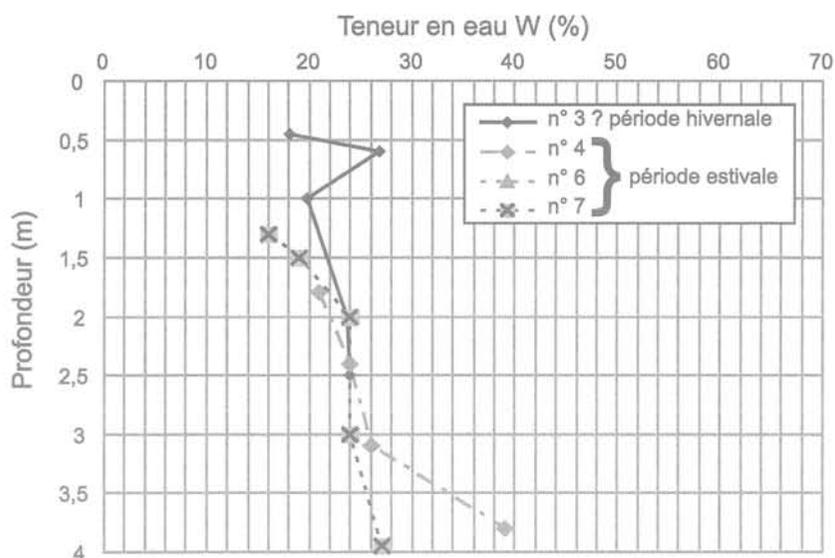


FIG. 7 Profils hydriques des sites étudiés sur la Formation de Brach, quartier de Cap de Bos.
Profiles of moisture content of studied soils from Brach Formation, Cap de Bos area.

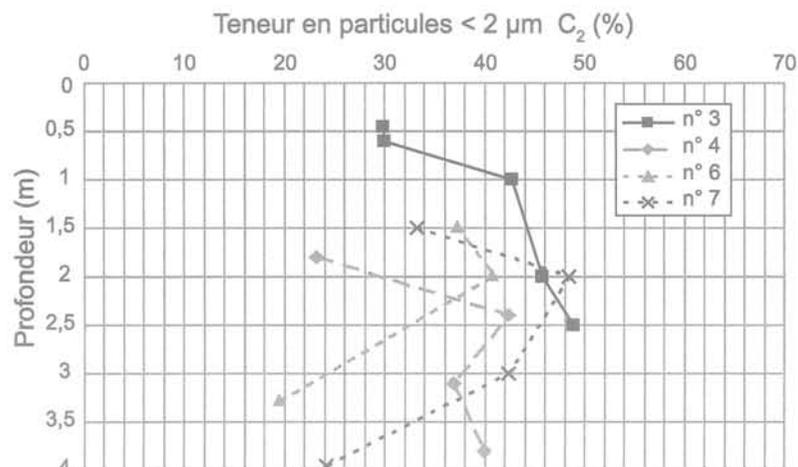


FIG. 8 Profils de la teneur en argile des sites étudiés sur la Formation de Brach, quartier de Cap de Bos.
Profiles of clay content of studied soils from Brach Formation, Cap de Bos area.

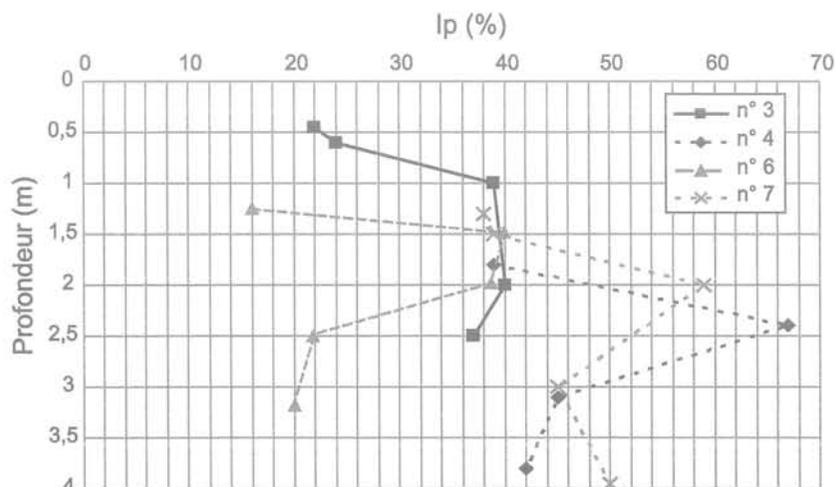


FIG. 9 Profil de l'indice de plasticité des sols argileux étudiés sur la formation de Brach, quartier de Cap de Bos.
Profile of plasticity index of clay studied soils from Brach formation, Cap de Bos area.

Caractérisation du potentiel de gonflement et de retrait.

La littérature contient un nombre considérable de méthodes empiriques pour évaluer le potentiel de gonflement et de retrait des sols argileux à partir de la mesure des paramètres de plasticité et de granulométrie complète. Nous avons reporté les points expérimentaux obtenus sur les sols argileux des deux formations étudiées en les comparant à ces quelques classifications (Fig. 10 et 11) :

– classification de Seed *et al* (1962) : les auteurs estiment le taux de gonflement (en %) d'un sol à partir de la proportion en particules argileuses (C_2) et de « l'activité » de Skempton A_c (1953), définie par $A_c = I_p/C_2$;

– classification de Dakshanamurphy et Raman (1973) et Chen (1988) : il est possible d'apprécier le potentiel de gonflement soit à partir de la limite de liquidité w_L , soit à partir de l'indice de plasticité I_p ;

– classification de Williams et Donaldson (1980) et du Building Research Establishment (1980) : suivant cette classification la teneur en particules argileuses de diamètre inférieur à $2 \mu\text{m}$ (C_2) en fonction de l'indice de plasticité permet d'estimer le potentiel de gonflement et le potentiel de retrait ;

– diagramme de plasticité avec la position du domaine des argiles gonflantes défini par Philipponnat (1978).

En positionnant les paramètres géotechniques d'identification des sols du quartier de Cap de Bos, on constate un bon accord d'ensemble entre ces classifications, à l'exception de celle de Dakshanamurphy et Raman (1973) qui conduit à des potentiels de gonfle-

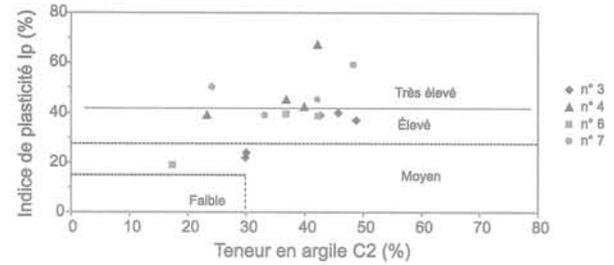
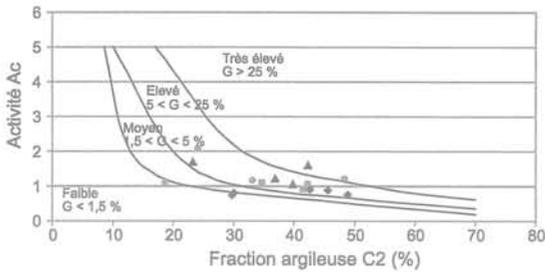
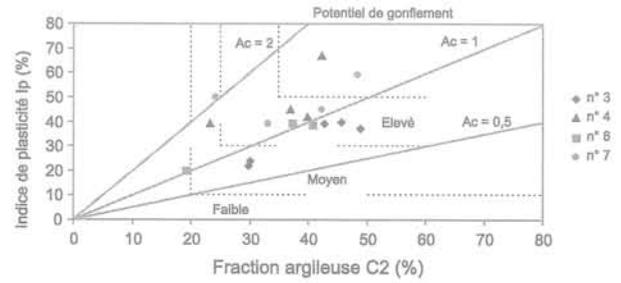
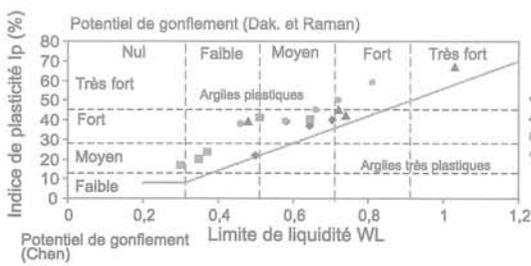


FIG. 10

Classification du potentiel de retrait et de gonflement des sols de la formation de Brach en fonction des paramètres géotechniques d'identification.

a) Classification du potentiel de gonflement de Dakshanamurphy et Raman (1973), et Chen (1988) ; b) Abaque de Williams et Donaldson (1980) ; c) Classification du potentiel de gonflement (Seed *et al.*, 1962) ; d) Classification du potentiel de retrait du Building Research Establishment (1980).

Classification of swelling or shrinkage potentials of soils from Brach formation as a function of geotechnical identification parameters

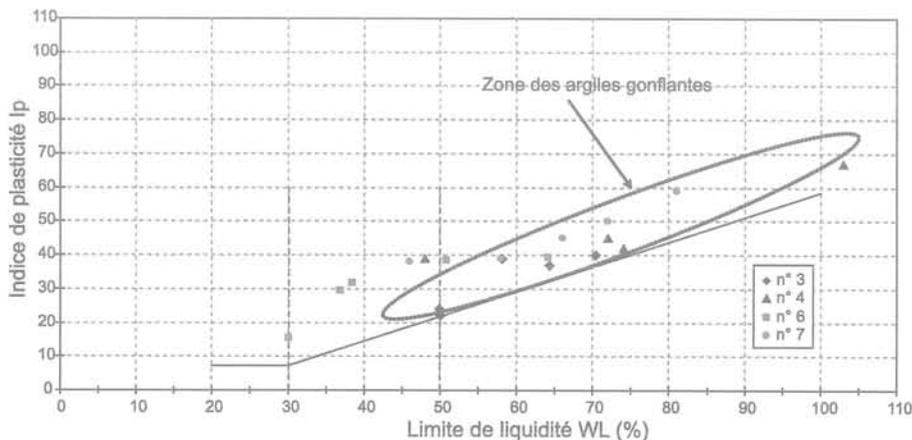


FIG. 11

Diagramme de plasticité de Casagrande avec report des échantillons étudiés sur la formation de Brach, quartier de Cap de Bos.

Plasticity diagram of Casagrande, with localization of studied samples from Brach formation, Cap de Bos area.

ment plus faibles que les autres. La majorité des échantillons des deux formations étudiées ici se situent dans le domaine des argiles gonflantes défini par Philipponnat (1978) (Fig. 11). Cependant, les mesures réalisées par Philipponnat n'ont été validées que pour les sols argileux parisiens et ne peuvent s'appliquer ici car les points expérimentaux replacés sur le diagramme de Casagrande indiquent que ce domaine descend vers des I_p de 30 % environ (Fig. 11). Ainsi, le classement des potentiels de gonflement et de retrait des sites étudiés, par ordre croissant, est le suivant (Tableau II) :

- parcelle n° 6 en limite de formation de Brach et de formation de Belin, dont le sol est le moins sensible au potentiel de retrait et gonflement ;
- parcelle n° 3 en limite de formation de Brach et de formation de Belin ;
- parcelle n° 4 située sur la formation de Brach ;
- parcelle n° 7 située sur la formation de Brach, dont le sol est le plus sensible au potentiel de retrait et gonflement.

Ce classement met en évidence un rapprochement en termes de comportement géotechnique entre les différents sites. En effet, on note que les sites n° 3 et 6 en limite de formations ont des caractéristiques assez similaires, avec des indices de plasticité ($I_p < 30\%$) et des valeurs de bleu (VBS < 4) relativement faibles. Ces caractéristiques géotechniques sont similaires à celles fournies au BRGM pour l'établissement de la carte d'aléa, avec des valeurs de bleu (VBS) moyennes de 2,6 g/100 g de sol et un indice de plasticité (I_p) moyen de 30 % (Platel, 2004). À l'inverse, les parcelles n° 4 et 7 présentent des potentiels de gonflement et de retrait plus élevés avec des valeurs de bleu (VBS) supérieures à 6 g/100 g de sol et des indices de plasticité (I_p) supérieurs à 40 %. L'environnement des parcelles est un facteur prépondérant. Il peut changer les conditions initiales du sol et expliquer partiellement des différences de comportements de sols, notamment avec l'influence de paramètres tels qu'une remontée de nappe, la présence de dépôts ligniteux compressibles sous le bâti ou l'existence de chenaux sableux drainants au niveau des fondations.

D'autres critères permettent de caractériser la différence de comportement au sein d'une même formation, comme la capacité d'échange cationique (CEC) et la teneur en matières organiques (MO) (Tableau I). En effet, les propriétés de rétention en eau des sols argileux ont été mises en relation avec la CEC ainsi qu'avec les teneurs en matières organiques et en carbonates (Bigorre et Tessier, 2000). La CEC mesure la charge électrique globale du sol et dépend en premier lieu de la nature des constituants du sol et notamment de l'existence de charges électriques permanentes, indépendantes du pH (Bigorre et Tessier, 2000).

Les CEC varient de 4 à 22 cmole.kg⁻¹, et les horizons à valeurs de bleu élevées possèdent les plus fortes valeurs de CEC pour des teneurs en matières organiques relativement faibles (1 g/kg $< MO < 3,5$ g/kg). L'analyse de la figure 12 fait apparaître un comportement sensiblement différent du site n°3 par rapport aux autres sites : des valeurs de CEC constantes sur les deux premiers mètres, absence de carbonates, mais forte concentration en matières organiques (10 g/kg $< MO < 22$ g/kg). Les valeurs de bleu pour ce site sont assez moyennes (1,4 $< VBS < 5,0$) pour des argiles à l'origine de graves sinistres liés au retrait et gonflement des couches argileuses sous jacentes. On sait que le bleu de méthylène permet de mesurer la surface hydrophile des argiles, mais que la surface réellement accessible à l'eau peut être inférieure à la surface d'origine pour des conditions physico-chimiques particulières avec, par exemple, la présence de matières organiques (Tourenq et Tran Ngoc Lan, 1989). Par ailleurs, de nombreux auteurs dans la littérature (Uniform Building Code, 1997) ont tenté de relier les valeurs de CEC et de VBS d'un sol à la nature minéralogique des minéraux argileux, mais également aux charges électriques développées par les matières organiques. Ainsi, les valeurs de la CEC des argiles et des matières organiques seraient additives, ce qui expliquerait des valeurs élevées et assez constantes sur les horizons du site n° 3 (Yuan *et al.*, 1967 ; Parfitt *et al.*, 1995 ; Curtin et Rostad, 1997 cités par Bultel, 2001). L'autre facteur susceptible d'influencer ce comportement est la granulométrie. L'analyse granulométrique (Tableau I) indique que les sols du site n° 3 sont à la fois les plus argileux et les plus sableux ($> 40\%$ de sable fin) des sites étudiés.

4.2

Étude des paramètres d'identification géotechniques

Une étude statistique est menée à partir des résultats obtenus (Tableau I) sur les sols argileux de la formation de Brach, afin de voir si d'éventuelles corrélations existent entre les paramètres géotechniques d'une même formation et à l'échelle d'un quartier. L'objectif de l'étude consiste à voir si les critères d'identification géotechnique des sols fins (indice de plasticité et valeur de bleu) utilisés par la classification GTR, permettent d'apprécier réellement le caractère gonflant et rétractant des sols compte tenu de l'hétérogénéité des sols.

TABLEAU II Comparaison des potentiels de gonflement et de retrait obtenus par des méthodes indirectes.
Comparison between swelling and shrinkage potentials obtained by indirect methods.

Site	Potentiel de gonflement				Potentiel de retrait
	Classification de Dakshanamurphy et Raman (1973)	Classification de Chen (1988)	Classification de Williams et Donaldson (1980)	Classification de Seed et al. (1962)	Classification du BRE (1980)
Parcelle n° 3	Faible à moyen	Moyen à fort	Moyen à élevé	Moyen à élevé	Moyen à élevé
Parcelle n° 4	Faible à très fort	Fort à très fort	Moyen à très élevé	Élevé à très élevé	Très élevé
Parcelle n° 6	Faible à moyen	Moyen à fort	Faible à élevé	Fort à élevé	Moyen à élevé
Parcelle n° 7	Faible à fort	Fort à très fort	Moyen à très élevé	Élevé à très élevé	Très élevé

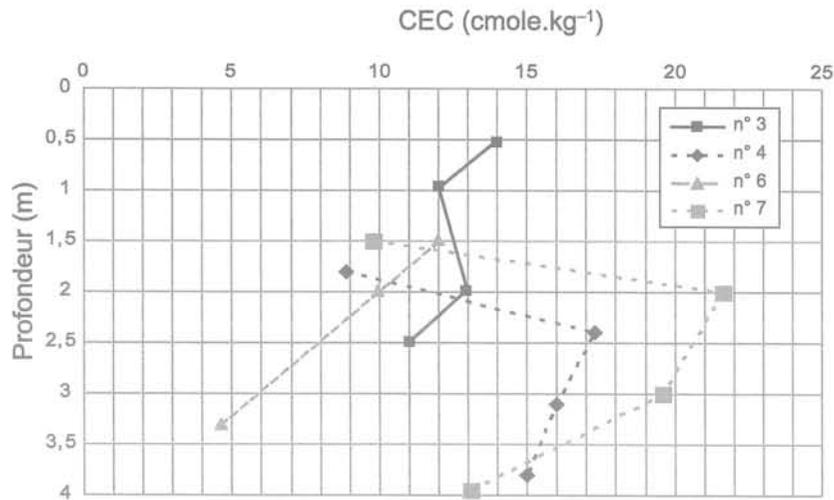


FIG. 12 Profil de la CEC des sols argileux étudiés sur la Formation de Brach, quartier de Cap de Bos. Profile of CEC of clay studied soils from Brach Formation, Cap de Bos area.

4.2.1

Étude statistique

Elle est faite sur les données des sols étudiés le long du transect au travers des formations de Brach et de Belin (parcelles n° 3, 4, 6, 7 ; figure 1), avec le détail des paramètres de position (minimum, maximum, moyenne) et de dispersion (variance, étendue, coefficient de variation), (Tableau III). Afin de réaliser une étude statistique fiable, les échantillons dont les données sont incomplètes ont été éliminés, laissant une population de 15 individus sur les 22 échantillons de l'étude (Tableau III). On détermine au préalable les variables qui correspondent aux propriétés du sol influençant le plus leur comportement plastique, avec : la teneur en eau naturelle (w_{nat}), l'indice de plasticité (I_p), la valeur de bleu (VBS), les passants à 80 μm et 2 μm (C_2), la CEC, la teneur en matières organiques (MO) et la teneur en carbonates (Ca).

Pour compléter l'analyse statistique des données, une analyse en composantes principales (ACP) est réalisée dans le but de caractériser les quatre sites étudiés et de mettre en évidence d'éventuelles corrélations entre paramètres.

4.2.2

Analyse statistique

Les résultats du tableau III montrent que les sols de la formation de Brach sont des sols assez argileux (passant à 2 μm > 35 %, d'après la classification GTR), avec des proportions en sable et silt non négligeable et une plasticité moyenne (I_p moyen de 40 %).

L'analyse du tableau III indique que la teneur en carbonates est le paramètre le plus variable parmi les 8 paramètres étudiés. Pour la formation de Brach on note un coefficient de variation très élevé en carbonates (228 %), qui s'explique par la présence de deux échantillons du site n° 7 vers 3 et 4 m de profondeur qui se rapproche de celui du substratum carbonaté sous-jacent. Dans la suite de l'étude, ces échantillons sont éliminés puisqu'ils correspondent plus aux marnes du substratum miocène et non aux formations étudiées ici. On remarque également un coefficient de variation élevé pour la matière organique (101 %) qui suggère l'influence de ce paramètre sur l'analyse.

TABLEAU III Résultats de l'analyse statistique effectuée sur les paramètres géotechniques de la formation de Brach. Results from the statistic analysis realized on geotechnical parameters of Brach formation.

		W_{nat} (%)	I_p (%)	VBS (g/100g sol)	% < 80 μm	% < 2 μm	CEC (cmole.kg ⁻¹)	Ca (%)	MO
Paramètres de position	Observations N	15	15	15	15	15	15	15	15
	Min	13,00	20,00	1,50	35,20	19,20	4,50	0,00	0,90
	Max	39,00	67,00	9,00	89,10	48,90	21,60	151,00	22,30
	Moyenne	22,51	41,53	5,15	61,49	37,01	13,21	17,95	5,94
Paramètres de dispersion	Variance	33,14	129,72	6,96	224,65	80,19	17,46	1678,08	36,04
	Écart type	5,76	11,39	2,64	14,99	8,95	4,18	40,96	6,00
	Étendue	26,00	47,00	7,50	53,90	29,70	17,10	151,00	21,40
Coef. Variation		26 %	27 %	51 %	24 %	24 %	32 %	228 %	101 %
Nombre d'individus		15							
Nombre de variables		8							

Avec : W_{nat} teneur en eau naturelle (%); I_p , indice de plasticité; VBS, valeur de bleu (g/100 g de sol sur la fraction 0/50 mm); < 0,08 mm, passant à 80 μm (%); < 2 μm , teneur en particules argileuses inférieures à 2 μm C_2 (%); CEC, capacité d'échange cationique (cmole.kg⁻¹); Ca, teneur en carbonates (g/kg); MO, teneur en matières organiques (g/kg).

Régressions linéaires entre paramètres géotechniques de la classification GTR

Dans la littérature, il est fréquent de commencer une étude statistique en cherchant à établir une relation entre les deux paramètres d'identification géotechnique les plus couramment employés qui sont : l'indice de plasticité (I_p) et la valeur de bleu (VBS). Dans la formation argileuse de Brach, on obtient une régression relativement peu satisfaisante sur l'ensemble des échantillons entre l'indice de plasticité (I_p) et la valeur de bleu (VBS) (Fig. 13). Deux regroupements de sols apparaissent suivant la valeur de bleu. Ce regroupement de sols par comportement géotechnique est confirmé lorsqu'on les identifie suivant la classification GTR, déterminée selon le Fascicule II du SETRA-LCPC *Réalisation des remblais et couches de forme* (1992). La distinction suivant la valeur de bleu (VBS) est considérée ici car ce paramètre est celui le plus fréquemment utilisé, voire le seul, par les bureaux d'étude pour identifier les sols suivant la classification GTR.

On distingue principalement deux sols à comportement différent :

– ceux à caractère gonflant avec des VBS > 6 et $I_p > 38$ % pour des profondeurs comprises entre 1,50 et 4,00 m, avec des teneurs en particules argileuses comprises entre 30 et 50 %. Ces sols se classent parmi les sols fins de type A3 et A4 selon la classification GTR. Les sols argileux des sites n°4 et 7 correspondent à ce type de comportement ;

– ceux à caractère moyennement gonflant avec des VBS comprises entre 2,5 et 5,0, ayant des plasticités moyennes de l'ordre de 30 à 40 % et des teneurs en argiles moyennement à très élevées de 20 à 50 %. Les sables fins représentent plus de 40 % des autres éléments. Ces sols, classés A2 selon la classification GTR, sont considérés comme à aléa modéré vis-à-vis du phénomène retrait/gonflement. Toutefois, les caractéristiques géotechniques et l'épaisseur des couches d'argiles des sites n°3 et 6 (en limite de formations), situées entre 0,50 et 2,50 m de profondeur, ont induit une importante fissuration aux habitations.

Un troisième regroupement de sols est identifiable avec des sols à caractère peu gonflant, avec des VBS < 2, peu plastiques ($15 < I_p < 25$), faiblement argileux et

classés A1 selon la classification GTR. On constate que les sols classés A2 et A4, bien qu'ils diffèrent de part leur plasticité et leur valeur de bleu, ont une argilosité similaire comprise entre 30 % et 42 % (Tableau 1). La teneur en sable et silt conditionne leur classement dans la classification GTR et modifie leurs paramètres géotechniques. On aboutit alors à deux types de comportement de sols argileux au sein de la formation de Brach, ceux où l'argile est mélangée au sable (sites n° 3 et 6), et ceux où la fraction argileuse reste dominante (sites n° 4 et 7). Avec ces observations, il apparaît ainsi que la classification GTR n'est pas adaptée à l'identification des sols sensibles au retrait et gonflement à l'échelle de la parcelle, dans la mesure où elle identifie les sols des sites n° 3 et 6 à faible risque géotechnique (sols de type A1/A2) alors que le sinistre est constaté.

L'apport de relations avec d'autres paramètres géotechniques (CEC, minéralogie, retrait linéaire, coefficient de gonflement) est à rechercher pour améliorer une méthodologie de reconnaissance plus précise des sols sensibles au phénomène de retrait/gonflement.

Corrélations pour l'ensemble des paramètres géotechniques

La matrice des corrélations (Tableau IV) laisse apparaître des corrélations significatives, au risque 5 % sur un échantillon de 14 observations si $\rho > 0,53$, entre les paramètres d'identification suivants : W_{nat}/VBS , I_p/VBS , $I_p/C_{2\mu}$, I_p/CEC , $CEC/C_{2\mu}$, $VBS/C_{2\mu}$, VBS/MO et $80 \mu\text{m}/MO$.

Une analyse en composantes principales (ACP) réalisée sur l'ensemble des échantillons montre que trois axes suffisent pour exprimer 82 % de variance totale. Les résultats de l'ACP sont présentés au travers de deux figures (les individus étudiés sont identifiés sur les graphiques par un premier numéro correspondant au site puis par un second, croissant avec la profondeur (Tableau I)) :

– la projection des variables sur le plan F1-F2 (70,6 % de variance absorbée) du cercle des corrélations (Figure 14), permet de visualiser les corrélations entre les variables. On remarque que les paramètres $2 \mu\text{m}$, CEC, I_p , VBS, MO et $80 \mu\text{m}$ sont éloignés du centre du cercle, ce qui montre qu'ils s'expriment bien selon le

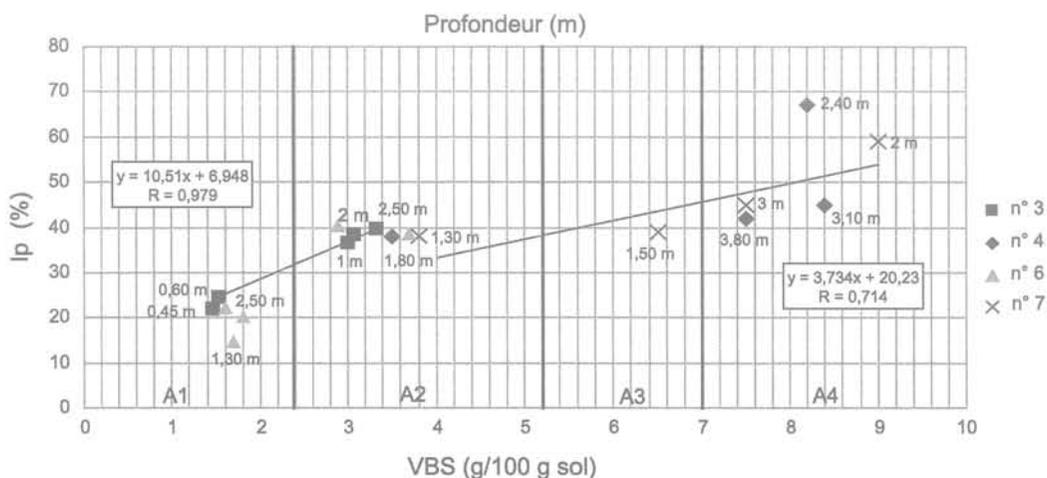


FIG. 13

Corrélation entre I_p et VBS sur les sols argileux étudiés de la Formation de Brach, quartier de Cap de Bos. Correlation between I_p and VBS on clayey studied soils from Brach Formation, Cap de Bos area.

TABLEAU IV Matrice des coefficients de corrélation obtenue sur l'ensemble des échantillons.
Matrix of correlation coefficient obtained on all samples.

	W_{nat}	Ip	VBS	80 μ m	2 μ m	CEC	Ca	MO
W_{nat}	1,00	0,35	0,59	0,28	0,34	0,44	0,24	-0,18
Ip	0,35	1,00	0,78	0,30	0,60	0,71	0,14	-0,36
VBS	0,59	0,78	1,00	0,44	0,39	0,74	0,38	-0,51
80 μ m	0,28	0,30	0,44	1,00	-0,43	-0,08	0,04	-0,72
2 μ m	0,34	0,60	0,39	-0,43	1,00	0,64	0,16	0,13
CEC	0,44	0,71	0,74	-0,08	0,64	1,00	0,46	0,03
Ca	0,24	0,14	0,38	0,04	0,16	0,46	1,00	-0,22
MO	-0,18	-0,36	-0,51	-0,72	0,13	0,03	-0,22	1,00

Nombre d'individus : 15

Avec : W_{nat} , teneur en eau naturelle (%); Ip, indice de plasticité; VBS, valeur de bleu (g/100 g de sol sur la fraction 0/50 mm); < 0,08 mm, passant à 80 μ m (%); < 2 μ m, teneur en particules argileuses inférieures à 2 μ m C_2 (%); CEC, capacité d'échange cationique (cmole.kg-1); Ca, teneur en carbonates (g/kg); MO, teneur en matières organiques (g/kg).

plan F1-F2. Les variables IP, CEC et VBS sont caractérisées par des fortes valeurs selon F1 et 2 μ m par des fortes valeurs à la fois sur F1 et sur F2. Les paramètres MO et 80 μ m s'expriment quant à eux suivant l'axe F2 et sont diamétralement opposés indiquant une forte corrélation négative; de plus, ces deux paramètres sont faiblement corrélés avec les autres paramètres. Le paramètre Ca s'exprime peu ici selon F1 et F2, le reste de l'étude montre qu'il est caractérisé par des fortes valeurs selon F3 (VBS). Plus les individus ont des composantes positives suivant l'axe F2, plus la teneur en matière organique augmente pour ces échantillons tandis que la granulométrie devient moins grossière. Plus un individu a des composantes négatives suivant l'axe F2, plus ce dernier aura tendance à être moins riche en matière organique mais ses paramètres géotechniques Ip, CEC et VBS augmenteront;

- la projection des individus sur le plan des composantes F1-F2 (Fig. 15), permet d'identifier d'éventuels regroupements entre individus. On note un regroupement des individus du site n°3, ce qui s'explique par l'influence prépondérante du paramètre MO sur ces échantillons confirmée par la position du paramètre MO sur le cercle des corrélations (Fig. 14). Un deuxième regroupement d'individus apparaît pour les échantillons des sites n° 4 et 7 qui possèdent les paramètres géotechniques Ip, VBS et CEC les plus élevés.

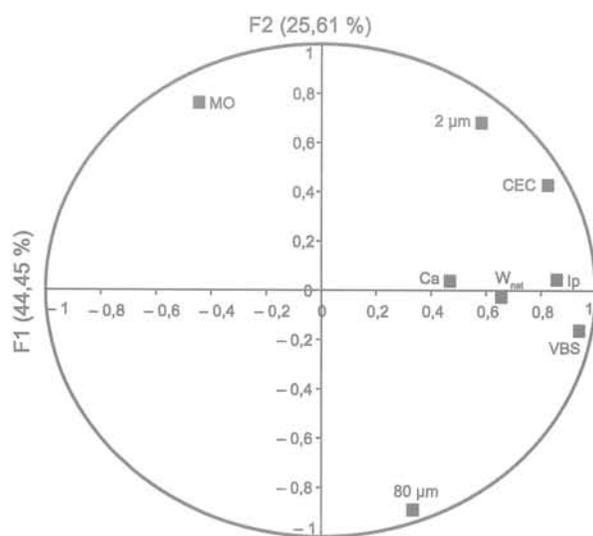


FIG. 14 Cercle des corrélations F1F2 résultant de l'ACP sur l'ensemble des échantillons.
Correlations circle F1F2 obtained after ACP on all samples.

L'analyse en composantes principales permet de confirmer un comportement différent du site n° 3 par rapport aux autres sites. Ce site a un effet perturbateur sur l'analyse globale des variables mais reste une réalité de terrain. Cette différenciation peut provenir

TABLEAU V Matrice des coefficients de corrélation obtenue sans les échantillons du site n°3.
Matrix of correlation coefficient obtained without samples of site n° 3.

	W_{nat}	Ip	VBS	80 μ m	2 μ m	CEC	Ca	MO
W_{nat}	1,00	0,31	0,65	0,26	0,33	0,47	0,23	-0,32
Ip	0,31	1,00	0,75	-0,03	0,77	0,82	0,06	0,66
VBS	0,65	0,75	1,00	0,00	0,71	0,86	0,30	0,24
80 μ m	0,26	-0,03	0,00	1,00	-0,58	-0,22	-0,24	-0,32
2 μ m	0,33	0,77	0,71	-0,58	1,00	0,86	0,28	0,49
CEC	0,47	0,82	0,86	-0,22	0,86	1,00	0,46	0,44
Ca	0,23	0,06	0,30	-0,24	0,28	0,46	1,00	0,00
MO	-0,32	0,66	0,24	-0,32	0,49	0,44	0,00	1,00

Nombre d'individus : 15

Avec : W_{nat} , teneur en eau naturelle (%); Ip, indice de plasticité; VBS, valeur de bleu (g/100 g de sol sur la fraction 0/50 mm); < 0,08mm, passant à 80 μ m (%); < 2 μ m, teneur en particules argileuses inférieures à 2 μ m C_2 (%); CEC, capacité d'échange cationique (cmole.kg-1); Ca, teneur en carbonates (g/kg); MO, teneur en matières organiques (g/kg).

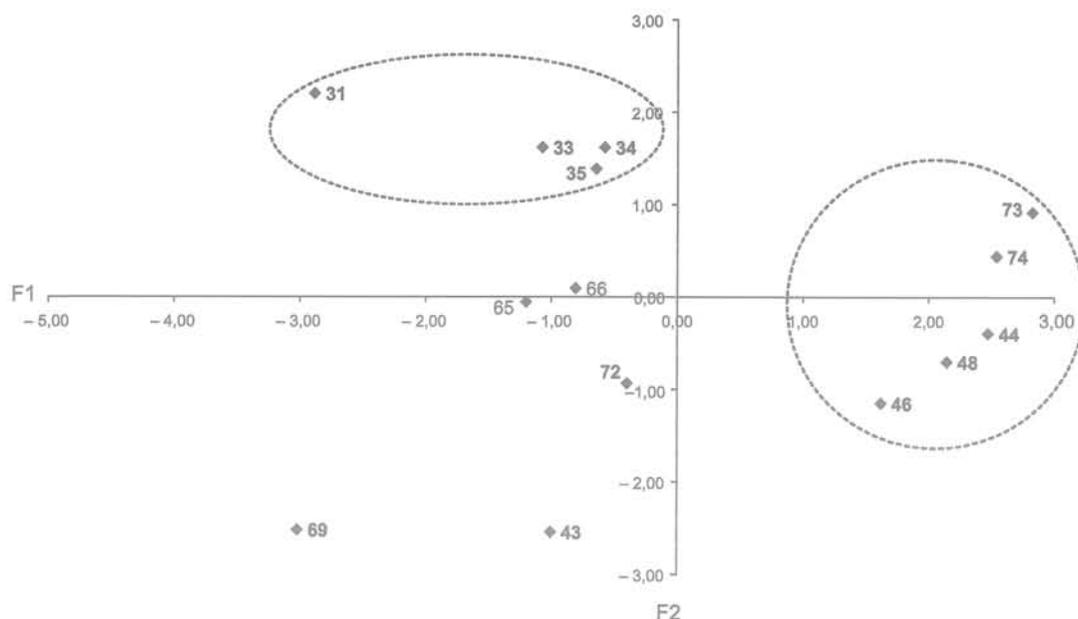


FIG. 15 Plan F1F2 des individus résultant de l'ACP sur l'ensemble des échantillons.
Plan F1F2 of samples obtained after ACP on all samples.

de l'influence de la matière organique (MO). Globalement les sols argileux de la formation de Brach présentent des corrélations significatives entre paramètres géotechniques mais traduisent une forte hétérogénéité spatiale de ces mêmes paramètres au sein d'une même formation géologique, sur une petite surface et en fonction de la profondeur.

5

Conclusion

Dans le but de mieux comprendre et de prévenir des risques liés au phénomène de retrait/gonflement des sols argileux, quatre parcelles sinistrées dans un même quartier et sur une même formation géologique d'une même commune ont été étudiées du point de vue lithologique et géotechnique. Les résultats obtenus montrent que pour une même formation géologique quaternaire au sein d'un quartier d'une commune, les propriétés des sols et de leurs fractions granulométriques peuvent être différentes d'une parcelle à l'autre et une identification du comportement mécanique des sols à partir de la classification GTR trouve vite ses limites.

L'analyse statistique des données montre des corrélations significatives avec des paramètres moins couramment utilisés comme la CEC, reliée indirectement

à la surface spécifique et à la teneur en argiles (C_p), qui apparaissent comme de bons indicateurs complémentaires de la taille des particules et de leur nature minéralogique. Ces paramètres permettent de caractériser et de classer les sols suivant de nouveaux critères par rapport à l'aléa retrait/gonflement. Ces premiers résultats traduisent également l'influence de paramètres tels que l'alternance de passées sableuses au sein des argiles (drain pour l'eau) et surtout de la teneur en matière organique qui semblent jouer le rôle de facteur aggravant sur le pouvoir gonflant et rétractant des argiles.

Cette étude à l'échelle d'un quartier, bien que spécifique aux formations de Brach et de Belin, met en évidence la forte variabilité spatiale et en profondeur des valeurs des paramètres d'identification dans les formations alluvionnaires, et la nécessité de préciser l'aléa retrait/gonflement à l'échelle du site de construction. Dans la pratique, les seuls critères actuels de la classification GTR semblent inadaptés pour identifier clairement les sols sensibles au retrait et au gonflement et une classification des sols s'appuyant sur des paramètres complémentaires tels que la capacité d'échange cationique, la nature minéralogique et la teneur en matières organiques nous semble très prometteuse et apporterait une aide précieuse aux bureaux d'étude. L'autre intérêt de cette étude est d'apporter aux responsables municipaux des connaissances géotechniques sur cette formation qui occupe l'extrémité ouest de la commune, actuellement en cours d'urbanisation.

- Bigorre F., Tessier D. - *Contribution des argiles et des matières organiques à la rétention de l'eau dans les sols. Signification et rôle fondamental de la capacité d'échange en cations*. Thèse Univ. Nancy I, 2000, 178 p.
- Bultel F. - *Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements de tunnels*, Thèse École nationale des ponts et chaussées, 2001, 298 p.
- Chen F.H. - *Foundations on expansive soils. Developments in Geotechnical Engineering* vol. 54, Elsevier Publishing Co, Amsterdam, 1988, p.40-48.
- Dakshanamurthy, Raman V. - *Identification of expansive soils from the Plasticity and the Shrinkage Index Data*, *Indian Eng.*, 1973, p.11-22.
- Dubreuilh J.-P. et al. - *Dynamique d'un comblement continental néogène et quaternaire : l'exemple du bassin d'Aquitaine*, *Géologie de la France* n° 4, 1995, p. 3-26.
- Dubreuilh J.-P. - *Contribution à l'étude sédimentologique du système fluviale Dordogne-Garonne dans la région bordelaise. Les ressources en matériaux alluvionnaires du département de la Gironde*. Thèse Univ. Bordeaux 1 n° 91, 1976, 326 p.
- Favre J.-L. 2004. *Géotechnique, sécurité des ouvrages, risque. Modélisation de l'incertain, fiabilité, analyse des risques*, éd. Ellipses, 2004, p. 88.
- Lautrin D. - *Utilisation pratique des paramètres dérivés de l'essai au bleu de méthylène*, *Bulletin de liaison des ponts et chaussées* n° 160, 1989, p.53-67.
- Mouroux P., Margron P., Pinte J.-C. - *La construction économique sur sols gonflants*, *Manuels et Méthodes* n° 14, éd. BRGM, 1988, 128 p.
- Philipponnat G. - *Désordres dus à la présence de sols gonflants dans la région parisienne*, *Annales de l'ITBTP* n° 159 série Sols et Fondations, 1978, p.1-15.
- Platel J.-P., Astruc J.-G. - *Cartographie des principales formations argileuses et marneuses affleurantes dans la région Aquitaine*, BRGM RP-50181, 2000, 108 p.
- Platel J.-P., Estève A., Tomera L. - *Cartographie de l'aléa retrait/gonflement des argiles du département de la Gironde*, BRGM/RP-53382, 2004, 224 p.
- Seed et al. - *Prediction of swelling potential for compacted clays*, *J. Soil Mech. and Found.Eng.Div.ASCE* n° 88, 1962, p. 107-131.
- Skempton A.W. - *The colloidal activity of clays*, *Proceeding of the Third International Conference of Soils Mechanics and Foundation Engineering*, 1953, p. 57-61.
- Thierry P., Breyse D. avec la collaboration de E. Vanoudheusden, A. Marache, S. Dominique, B. Rodière, B. Bourguine, P. Régaldo-Saint Blancard, Ch. Piette, F. Rivet, R. Fabre - *Le projet RIVIERA. Risques en ville : équipements, réseaux, archéologie* Rapport final. BRGM/RP-55085-FR, 2006, 248 p. ; 144 fig., 30 tableaux, 3 annexes.
- Tourenq C., Tran Ngoc Lan - *Mise en évidence des argiles par l'essai au bleu de méthylène. Application aux sols, roches et granulats*, *Bull. liaison Labo P. et Ch.* n° 159, 1989, p. 79-92.
- Uniform Building Code - Appendix A (A procedure for estimation of the amount of climate controlled differential movement of expansive soils), Section 1817, Chap. 18, Div. III, 1997, p. 60.
- Vincent M. - *Retrait/gonflement des sols argileux : méthode cartographique d'évaluation de l'aléa en vue de l'établissement de PPR*, 3^e Conférence SIR-NAT Forum des journées pour la Prévention des risques naturels, Orléans. *Actes du colloque*, 2003.
- Williams A.B, Donaldson G.W. - *Developments related to building on expansive soils in South Africa: 1973-1980*, *Proc.4th Int. Conf. on Expansive Soils*, Denver, vol. 2, 1980, p. 834-844.

Retrait-gonflement des sols argileux et des marnes

J.-F. SERRATRICE

Laboratoire régional
des ponts et chaussées
d'Aix-en-Provence
CETE Méditerranée
CS70499
13593 Aix-en-Provence
Cedex 3
jean-francois.serratrice@
equipement.gouv.fr

Résumé

Cet article présente divers aspects expérimentaux du gonflement et du retrait des matériaux sensibles aux variations hydriques, d'après des essais de laboratoire. Les premiers exemples montrent les résultats de deux types d'essais oedométriques de gonflement : les essais de gonflement par paliers successifs et les essais de gonflement en parallèle. Les exemples suivants donnent tour à tour une illustration de la cinétique du gonflement, des effets tridimensionnels du gonflement, puis de la dégradation des propriétés mécaniques consécutives au gonflement. Un autre exemple concerne les difficultés expérimentales liées au contrôle des conditions hydriques pendant des essais de longue durée sur des matériaux sensibles aux variations de teneur en eau. Puis des exemples d'essais de retrait avec enregistrement en continu sont commentés. Enfin, une vision plus synthétique de l'amplitude des variations de volume de retrait/gonflement est proposée, basée en première approche sur la relation de cette « dynamique de retrait/gonflement » avec l'indice des vides initial du sol.

Abstract

This paper presents various experimental aspects of swelling and shrinkage of sensitive soils to moisture changes, observed in laboratory tests. The first examples show the results collected by two types of oedometric tests: swelling tests with successive stages and parallel swelling tests. Next examples give successively some illustrations about the kinetic of swelling, the three-dimensional effects of swelling and the damage degradation produced on the mechanical properties of the soil as consequence of swelling. Another example concerns experimental difficulties arising with the control of moisture during long term tests on sensitive soils. Then shrinking tests with continuous measurement are presented. A more synthetic view is suggested on the amplitude of shrinking and swelling volume changes, based on the dependence of this "shrinking swelling dynamic" to void ratio, as first estimate.

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 30 avril 2008.

Introduction

Les essais de laboratoire constituent des outils privilégiés pour mesurer les variations de volume de retrait et de gonflement des sols. De très nombreux travaux expérimentaux ont été consacrés à ces essais, en mettant en œuvre des procédures diverses. Certaines de ces procédures sont normalisées. Les procédures courantes opèrent à une échelle macroscopique sur des éprouvettes de dimensions centimétriques. Mais les processus de gonflement et de retrait mettent en jeu différents facteurs et différents phénomènes physiques qui prennent corps à une échelle microscopique et restent non directement accessibles à l'échelle des éprouvettes d'essais. Cela explique en partie la variété des protocoles d'essais et le caractère empirique de leur interprétation.

Cet article montre différents aspects du gonflement et du retrait pour des terrains de natures diverses comme des argiles ou des marnes testées dans leur état naturel, des sols compactés ou des sols déstructurés. Ces résultats ont été obtenus à l'occasion de programmes d'essais de laboratoire effectués dans le cadre de reconnaissances géotechniques pour des projets. Les résultats d'essais de gonflement seront présentés tout d'abord, obtenus au moyen de deux procédures particulières : les essais de gonflement par paliers successifs et les essais de gonflement en parallèle. Les deux procédures fournissent les paramètres caractérisant le potentiel de gonflement du sol. Mais ces procédures sont pénalisées par des problèmes pratiques, à commencer par la durée des paliers de gonflement ou l'hétérogénéité des matériaux testés dans leur état naturel.

La mise en œuvre de ces deux procédures d'essais permet d'examiner ensuite différents aspects du gonflement à partir d'exemples. Le premier aspect concerne la cinétique du gonflement. Celle-ci peut être très lente, en présence de marnes compactes notamment, ce qui a pour conséquence d'augmenter la durée des essais. Le second aspect s'adresse aux effets tridimensionnels du gonflement. La mise en évidence de ces effets s'effectue au moyen d'oedomètres K_0 ou d'oedomètres à paroi souple. Ces instruments permettent de mesurer la contrainte radiale pendant le gonflement, sous différentes conditions de déformation radiale. Si l'observation de ces effets tridimensionnels est importante pour la détermination des propriétés du sol étudié et leur transposition au comportement des ouvrages, elle ne l'est pas moins pour expliquer en partie les divergences observées entre les procédures d'essais de gonflement au laboratoire. Enfin, un troisième aspect du gonflement concerne la dégradation des propriétés de déformabilité des terrains sous l'effet du gonflement, ce qui suggère qu'une transformation du sol s'opère parfois pendant le processus, à l'échelle de temps des essais de laboratoire.

En guise de transition avec les mesures de retrait, un exemple particulier donne une illustration des difficultés expérimentales liées au contrôle des conditions hydriques pendant des essais de longue durée sur des matériaux sensibles aux variations de teneur en eau. Puis des exemples d'essais de retrait sont donnés sur différents matériaux. Une procédure particulière a été mise en œuvre, qui permet d'enregistrer la courbe de retrait du sol en continu pendant sa dessiccation. La méthode s'applique à des sols dans leur état naturel, des sols compactés ou des sols déstructurés.

Pour tenter de donner une vue synthétique des variations de volume de retrait/gonflement, une récapitulation est proposée enfin, qui est basée sur un ensemble de données obtenues sur divers matériaux dans différents états, la plupart des matériaux étant testés dans leur état naturel. Ce rapprochement des données expérimentales suggère que, en première approche, les pressions de gonflement et, plus généralement, l'amplitude des variations de volume de retrait/gonflement dépendent de l'indice des vides initial du sol. Dans les essais de dessiccation ou d'imbibition, un sol argileux lâche développera préférentiellement des déformations de retrait, contrairement à un sol argileux compact qui sera prédisposé à gonfler.

Exemples d'essais de gonflement

Deux procédures courantes d'essais de gonflement sont présentées ci-après au travers d'exemples obtenus sur des marnes. Ces deux procédures s'inspirent des procédures utilisées en pratique et décrites dans la littérature ou normalisées (ISRM, 1989 ; Sridharan *et al.*, 1986 ; Serratrice et Soyez, 1996 ; Bigot et Zerhouni, 2000). Les essais sont réalisés à l'aide d'appareils oedométriques sur des éprouvettes de diamètre initial $d_0 = 60$ mm et de hauteur initiale $h_0 = 25$ mm. Les propriétés physiques et les compositions minéralogiques des matériaux testés sont données dans les tableaux I et II. Toutes les données ne sont pas disponibles pour tous les matériaux testés. Il apparaît néanmoins que les marnes possèdent une fraction argileuse à dominante smectique dans beaucoup de cas.

Essais de gonflement par paliers successifs

Ce premier exemple montre les résultats d'un essai de gonflement par paliers successifs effectué à l'oedomètre sur une marne très gonflante (marne d'Esna, Égypte ; Guillaume *et al.*, 2001). Sur la figure 1a, la courbe contrainte/déformation est donnée dans le plan $(\lg(\sigma_a), e)$, où σ_a est la contrainte axiale en échelle logarithmique et e l'indice des vides. Un premier cycle de chargement/déchargement/rechargement par paliers est appliqué à la marne dans son état naturel en 24 heures, jusqu'à une contrainte axiale $\sigma_a = 1780$ kPa. Pendant le cycle, l'éprouvette repose sur des plaques poreuses sèches. Elle est mise en imbibition sous ce palier après stabilisation de la déformation, puis elle est déchargée par paliers successifs et elle est maintenue en imbibition jusqu'au palier final pour lequel $\sigma_a = 3$ kPa (poids du piston). La durée de chacun des paliers de déchargement sous imbibition est de plusieurs mois (durée totale de l'essai : 2 ans). La marne est très peu compressible dans son état naturel (voir le cycle préliminaire sur la figure 1a). L'imbibition sous 1 780 kPa provoque un très fort gonflement et l'amplitude du gonflement sous ce premier palier ne trouve pas d'égal sous les paliers de déchargement suivants (non représentés ici). Du coup, l'interprétation classique de l'essai, qui consiste à comparer la courbe de déchargement dans l'état naturel à la courbe de déchargement sous imbibition et à chercher l'intersection des deux tangentes à ces courbes, conduit à une pression de gonflement très supérieure à 5 MPa (maximum de l'échelle des abscisses).

TABEAU I Propriétés physiques des matériaux testés.

Matériau	Bloc	W _{initiale} (%)	γ _{initial} (kN/m ³)	e _{initial}	S _{r initial} (%)	W _{finale} (%)	W _L	I _p
Marne d'Esna		3,5 à 6,5	20,9 à 21,8	0,28 à 0,33	40 à 60	24 à 28,5	71	31
Tunnel de Tartaignuille	1	13 à 17	21,3 à 22,4	0,32 à 0,45	100	23 à 26	41	18
	4	3,5 à 7,2	24,0 à 24,8	0,11 à 0,17	100	4,5 à 9,3		
	5	8 à 12	21,6 à 22,9	0,27 à 0,42	100	18 à 20		
Tunnel d'Arbus		7,5 à 21	20,0 à 24,0	0,18 à 0,64	100			
« Terres noires »		1 à 9	23,0 à 27,0	0,05 à 0,27	100			
Oligocène Marseille		10,7 à 18,5	20,9 à 22,8	0,29 à 0,50	95 à 100	11,2 à 19,5	46	26
Mont Sion		3 à 20	20,7 à 25,2	0,09 à 0,54	100		35 à 49	15 à 22
Chamoise		4 à 5	23,4 à 23,8	0,19 à 0,22	(85)	5 à 7		
Bois du Peu		6 à 9	22,6 à 23,0	0,17 à 0,26	100	7,5 à 11		
Les Milles		10 à 28	18,9 à 22,7	0,28 à 0,80	100	11 à 32	28 à 38	9 à 14
LGV Est		14 à 18	20,7 à 21,6	0,40 à 0,51	100	18 à 20		
LGV RR		23 à 30	18,6 à 19,7	0,65 à 0,85	100	26 à 30	48 à 51	16 à 25
Chavannes		6,5 à 6,7	21,7 à 21,3	0,30 à 0,32	56 à 58	6,5 à 6,9		
Limon de Goderville		13 à 20	17,1 à 20,1	0,58 à 0,86	45 à 91	95 à 100	41	19
Turin		10,7 à 12,2	22,0 à 22,4	0,31 à 0,35	94	12,7 à 13,4		
Béziers		14 à 20	18,5 à 21,5	0,48 à 0,63	75 à 95	17 à 25	30 à 50	10 à 26

TABEAU II Compositions minéralogiques des matériaux testés.

Matériau	Calcite (%)	Quartz (%)	Argiles (%)	argile dominante et proportion dans la fraction argileuse
Marne d'Esna	20	5	75	smectite 90 %
Tunnel de Tartaignuille	25	45	30	smectite 45 %
Tunnel d'Arbus	5 à 70	10 à 75	20 à 60	smectite et interstratifiés smectiques 40 à 85 %
« Terres noires »	10 à 45	15 à 25	32 à 70	interstratifiés illite smectite 70 à 80 %
« Terres noires »	10 à 45	15 à 25	32 à 70	interstratifiés illite smectite 70 à 80 %
Oligocène Marseille	21 à 34	10 à 15	55 à 70	smectite 65 à 90 %
Tunnel du Mont Sion	0 à 45	5 à 47	18 à 80	smectite 35 à 85 %
Tunnel de Chamoise	45	20	35	illite 45 %
LGV RR	27 à 31*	6 à 14	59 à 63	smectite 60 à 75 %

* calcite et dolomie.

D'après la courbure observée sur le graphe (lg(σ_g), e), l'affaiblissement du gonflement pendant les paliers de déchargement sous imbibition ne permet pas de déterminer le potentiel de gonflement tel qu'il est exprimé traditionnellement, avec une déformation proportionnelle au logarithme de la contrainte axiale sur la totalité de la plage d'essai :

$$e - e_g = -K_g \lg(\sigma_a / \sigma_{ag}) \quad (1)$$

où σ_{ag} est la pression de gonflement, e_g l'indice des vides correspondant (e = e_g pour σ_a = σ_{ag}) et K_g le potentiel de gonflement exprimé en indice des vides, c'est à dire la pente des droites définies par l'équation (1) dans le plan (lg(σ_a), e). D'autres essais ont montré que la réponse de la marne d'Esna dépend aussi du nombre de paliers de déchargement et de la progression des contraintes entre les paliers. Bien souvent, les déformations ne sont pas totalement stabilisées sous un palier donné avant le passage au palier de déchargement suivant, en raison de la cinétique très lente du gonflement. Cette interférence entre les paliers nuit à l'interprétation de l'essai. Elle conduit à surestimer la pression de gonflement et sous-estimer le potentiel K_g.

2.2

Essais de gonflement en parallèle

Les essais de gonflement en parallèle sont effectués sur plusieurs éprouvettes simultanément. Après découpage dans un même échantillon, les éprouvettes sont montées dans les cellules oedométriques sur des plaques poreuses sèches. Les cellules sont placées à leur tour sur les bâtis de chargement (Fig. 2). Un premier cycle de chargement-déchargement est appliqué sur chacune des éprouvettes dans leur état naturel jusqu'à une contrainte axiale maximale σ_{amax} et sous des paliers de charge identiques. Puis les éprouvettes sont rechargées à des niveaux de contraintes différents et distribués en progression géométrique. Quand les déformations axiales des éprouvettes sont stabilisées, les éprouvettes sont mises en imbibition avec de l'eau désaérée pendant une durée d'un mois et plus si nécessaire. La déformation axiale ε_a est enregistrée pendant toute la durée de l'essai (ε_a est le rapport de la variation de hauteur Δh à la hauteur initiale de l'éprouvette h₀, ε_a = Δh/h₀, Δh > 0 pour un tassement et Δh < 0 pour un gonflement).

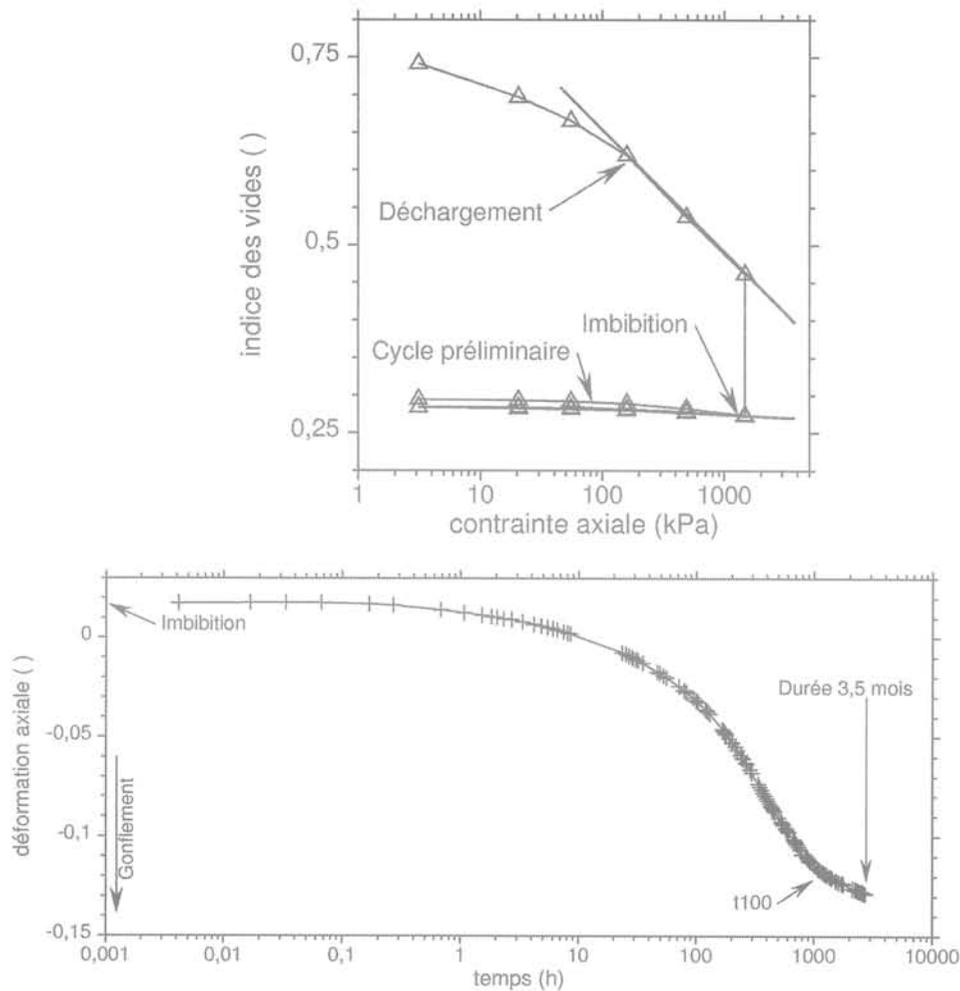


FIG. 1 Essai de gonflement par paliers successifs, marne d'Esna.
 a) Courbe contrainte axiale/indice des vides ; b) Courbe déformation axiale/temps pendant le premier palier d'imbibition (1 780 kPa).
 Swelling test with successive stages, Esna marl.
 a) Void ratio versus axial stress; b) Axial strain versus time during the first soaking stage (1,780 kPa).

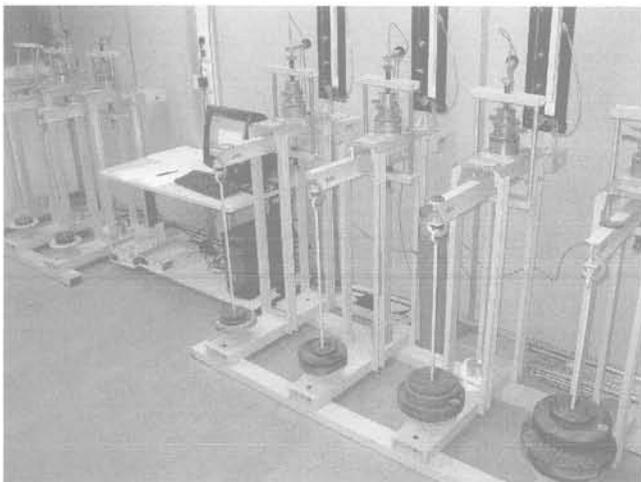


FIG. 2 Essais oedométriques en parallèle pour six éprouvettes. Bâti de chargement. Chaîne de mesure.
 Parallel swelling tests with six specimens. Loading frames. Data acquisition system.

flement sous charge, par analogie avec le gonflement de différents éléments de volume plus ou moins confinés dans un massif naturel ou dans un remblai. Il n'y a pas d'interférences entre les phases de gonflement, contrairement aux essais par paliers successifs. En contre partie, une hétérogénéité du terrain à l'échelle de l'échantillon concerné fait prendre le risque de tester des éprouvettes différentes, ce qui conduit à des difficultés d'interprétation de l'essai. Une méthode d'essai mettant en œuvre plusieurs éprouvettes est définie dans la norme NF P 94-091.

La figure 3a montre les cycles de chargement-déchargement dans l'état naturel appliqués à quatre éprouvettes de marne tirées d'un même bloc (bloc 1) prélevés au front du tunnel de Tartaignille (Drôme). Les courbes sont reportées dans le plan $(\lg(\sigma_a), e)$. Après ce cycle préliminaire dans l'état naturel de la marne, les quatre éprouvettes sont chargées sous les contraintes axiales $\sigma_a = 50, 180, 530$ et $1\,740$ kPa respectivement. Après stabilisation de la déformation axiale, les éprouvettes sont mises en imbibition en maintenant chacun des chargements. Les segments verticaux situés aux abscisses 50, 180, 530 et $1\,740$ kPa représentent les gonflements observés des quatre éprouvettes respectivement, pendant ce premier palier d'imbibition.

110 La procédure des essais en parallèle présente l'avantage de rendre indépendantes les phases de gon-

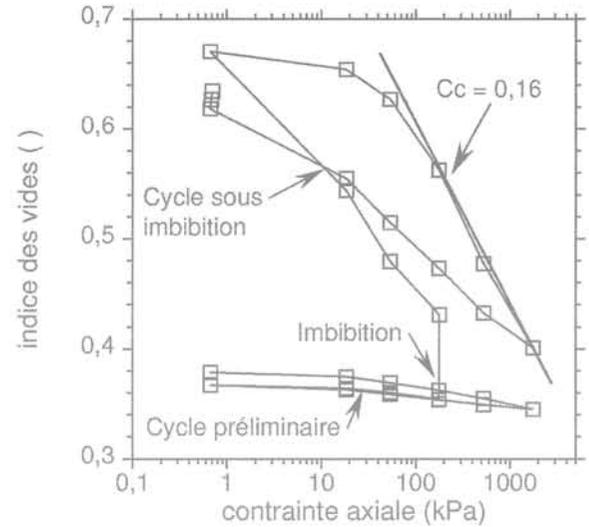
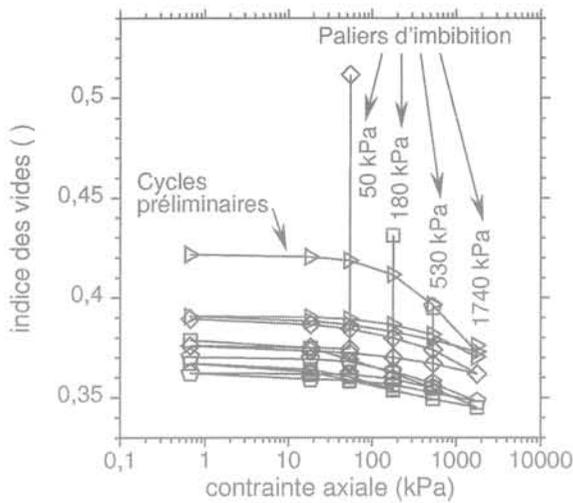


FIG. 3 Essais de gonflement en parallèle, marne de Tartaignulle (bloc 1).

a) Cycles préliminaires et paliers d'imbibition ; b) Cycle supplémentaire sous imbibition (imbibition sous 178 kPa).

Parallel swelling tests, Tartaignulle marl (block 1).

a) Preliminary cycles and soaking stages; b) Additional cycle under soaking (soaking under 178 kPa).

Bien souvent, la détermination du potentiel de gonflement des marnes ou des argiles raides ne s'effectue pas de façon aisée dans le plan $(\lg(\sigma_a), e)$, en raison de la variabilité de l'indice des vides initial qui est fréquemment observée à l'échelle des échantillons dans ces types de terrains plus ou moins indurés. Il est préférable alors d'exprimer le gonflement de chacune des éprouvettes par la variation de la déformation axiale $\Delta \epsilon_a$ pendant le palier d'imbibition en fonction du logarithme de la contrainte axiale sous la forme :

$$\Delta \epsilon_a = K \lg(\sigma_a / \sigma_{ag}) \quad (2)$$

où K est le potentiel de gonflement exprimé en déformation ($K_e = (1 + e_0) K$, e_0 indice des vides initial). La variation de la déformation axiale $\Delta \epsilon_a$ est la différence entre la déformation mesurée à la fin du palier d'imbibition et la déformation mesurée avant la mise en imbibition ($\Delta \epsilon_a < 0$ pour un gonflement).

L'interprétation de l'essai de la figure 3 sera donnée sur la figure 5. Mais, au préalable, d'autres exemples de résultats d'essais de gonflement en parallèle sont donnés sur la figure 4. Il s'agit de cinq essais de gonflement réalisés sur différents échantillons de molasses du tunnel d'Arbus (Hautes-Pyrénées), prélevés à différentes profondeurs dans plusieurs sondages carottés. Chaque essai comprend quatre éprouvettes découpées dans un même échantillon (sur une longueur de 30 cm environ). Les écarts entre les réponses ($0,008 < K < 0,015$ et $650 < \sigma_{ag} < 950$ kPa) reflètent l'hétérogénéité des terrains à l'échelle du site. Comme il est souvent observé, cette hétérogénéité transparait à la fois par la variabilité de l'indice des vides, mais aussi par la variabilité de la composition minéralogique des molasses (et plus généralement des marnes), même si la signature minéralogique de la formation est conservée globalement (voir le tableau II). Il est intéressant de noter que les contraintes maximales σ_{amax} appliquées pendant les essais aboutissent à des gonflements quasi-nuls. Dans ce cas, les pressions de gonflement ont été dépassées par les chargements appliqués, ce qui conduit à une détermination plus sûre de la pression de gonflement σ_{ag} .

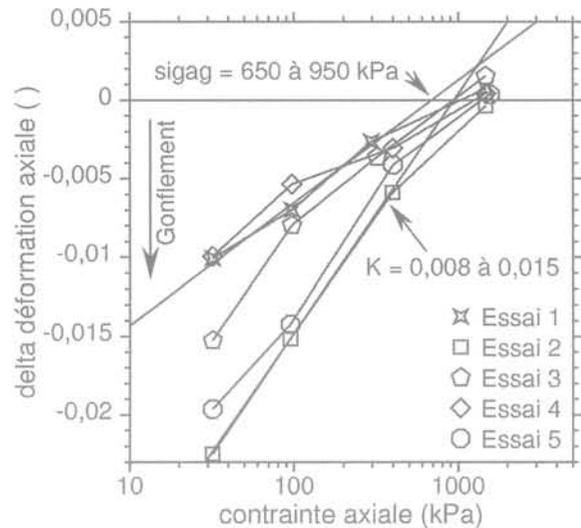


FIG. 4 Essais de gonflement en parallèle, molasses du site d'Arbus.

Parallel swelling tests, Arbus marl.

Quand la pression de gonflement du matériau testé s'avère élevée, il faut réaliser des essais oedométriques à haute pression, de façon à observer réellement l'annulation des déformations au-delà de σ_{ag} . Tel est le cas de l'exemple de la figure 5, obtenu sur la marne du tunnel de Tartaignulle, qui montre une pression de gonflement égale à $\sigma_{ag} = 2,1$ MPa, pour des essais conduits jusqu'à 3,6 MPa à l'aide d'un oedomètre à haute pression. Le graphique montre trois essais en parallèle effectués sur différents blocs prélevés dans le même front du tunnel. Dans cet exemple, une éprouvette supplémentaire est testée à haute pression et dans les mêmes conditions d'essai que l'exemple de la figure 3, ce qui porte à cinq le nombre d'éprouvettes découpées dans chacun des blocs 1 et 5. L'essai présenté sur la figure 3 a été réalisé dans le bloc 1. Les éprouvettes découpées dans le bloc 4 ne gonflent pas, car la marne est plus compacte, plus indurée et plus carbonatée que dans les autres blocs (voir le tableau I).

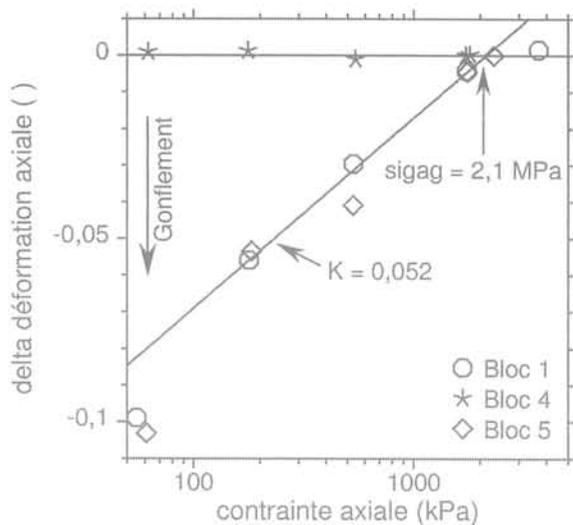


FIG. 5 Essais de gonflement en parallèle, marne de Tartaignuille (blocs 1, 4 et 5).
Parallel swelling tests, Tartaignuille marl (blocks 1, 4 and 5).

Une variante des essais oedométriques en parallèle s'adresse aux sols compactés. Ces essais de sensibilité des sols compactés aux variations de teneur en eau se pratiquent sur six éprouvettes densifiées par compactage semi-statique en un point d'état donné et référencé par rapport aux caractéristiques Proctor (Mieussens, 1993). Les essais oedométriques de sensibilité réalisés en parallèle s'avèrent parfaitement discriminants vis-à-vis de l'état initial du sol compacté et, plus généralement, de la nature du sol, quand on compare entre eux différents sols plus ou moins argileux ou un même sol compacté à différents états (Serratrice, 1995, 2007).

3

Aspects particuliers du gonflement en laboratoire

3.1

Cinétique du gonflement

La figure 1b montre l'évolution de la déformation axiale en fonction du temps pendant le premier palier d'imbibition de la marne d'Esna, sous la contrainte axiale $\sigma_a = 1\ 780$ kPa. Cette courbe est typique des réponses souvent observées en échelle logarithmique du temps, avec une forme de signe opposé à celui des courbes de consolidation des argiles saturées. Une première phase s'apparente à la phase hydrodynamique de la consolidation, suivie par une phase qui, si la vitesse de déformation était positive (compression) serait considérée comme du fluage. Il s'agit en fait de gonflement sous charge constante (vitesse de déformation de signe négatif). La principale différence entre cette réponse et la consolidation des argiles réside dans la durée du processus, puisque le temps équivalent à la fin de consolidation (t_{100}) mesurée ici avoisine 1 000 heures (plus de 40 jours), pour une durée du palier égale à trois mois et demi.

Diverses interprétations ont été proposées dans la littérature pour caractériser cette cinétique du gonfle-

ment, inspirées souvent du comportement observé sur les sols compactés non saturés. Les résultats présentés ici concernent des marnes testées dans leur état naturel, très compactes (indice des vides initial inférieur à 0,5, voire inférieur à 0,3 pour la marne d'Esna), prélevées à grande profondeur et saturées le plus souvent (tableau I). L'analogie de la cinétique du gonflement des marnes avec les courbes de consolidation des argiles saturées, qui est soulignée ici, tient en particulier à la représentation de la déformation de gonflement dans une échelle logarithmique du temps. Mais il ne faut pas perdre de vue que, en matière de consolidation des argiles saturées, cette représentation ne permet pas de séparer les deux mécanismes qui sont en jeu, le drainage de l'eau interstitielle et le fluage, pour produire la déformation différée du sol dans le temps (problème de l'origine du temps de fluage).

La figure 6a montre les réponses à l'imbibition de quatre éprouvettes du site d'Arbus enregistrées pendant l'un des essais de gonflement en parallèle de la figure 4 (contraintes axiales σ_a égales à 30, 95, 400 et 1 565 kPa respectivement ; déformation axiale ϵ_a exprimée en fonction du logarithme du temps). L'éprouvette la plus chargée montre une déformation quasi-nulle à cette échelle du graphique. Pour les trois autres éprouvettes, l'amplitude finale des déformations croît à l'inverse de la charge. Les réponses présentent aussi une allure de courbes de consolidation « inversées » avec des t_{100} compris entre une et quatre heures. Il est intéressant de noter que le temps t_{100} croît quand la charge diminue.

La figure 6b montre la première courbe du graphique précédent à une échelle dilatée ($\sigma_a = 1\ 565$ kPa). Un gonflement apparaît pendant la première heure d'imbibition, puis s'annule au profit d'un tassement pendant le reste de la durée de l'essai (un mois et demi). Des phénomènes de cette nature apparaissent parfois avec les sols argileux compactés. Sur le plan expérimental, l'une des difficultés rencontrées concerne la présence de plaques poreuses sèches pendant les cycles de chargement du sol dans son état naturel au début des essais. En pratique, la durée des paliers et leur nombre pendant ces phases préliminaires doit résulter d'un compromis entre le temps nécessaire pour assurer l'équilibre des charges à chaque étape du chargement et la réduction des effets de succion entre les plaques poreuses et le sol. L'exemple commenté ici donne une illustration de ces difficultés expérimentales, le gonflement observé pendant la première heure d'imbibition pouvant résulter du rééquilibrage de la succion apportée par les plaques poreuses pendant le cycle de chargement préliminaire. Quoiqu'il en soit, la pression de gonflement mesurée $\sigma_a = 680$ kPa est inférieure à la contrainte maximale appliquée ($\sigma_a = 1\ 565$ kPa).

3.2

Contrainte oedométrique radiale

Un autre aspect important du gonflement concerne les effets tridimensionnels. De nombreux essais de gonflement ont été effectués sur des argiles, des marnes ou des roches dans leur état naturel, ou des sols compactés, au moyen d'un oedomètre K_0 à haute pression. L'intérêt est ici de mesurer la contrainte totale radiale σ_r générée par l'imbibition, sous un palier de chargement axial donné. Ce type d'appareillage est utilisé plus conventionnellement pour déterminer le

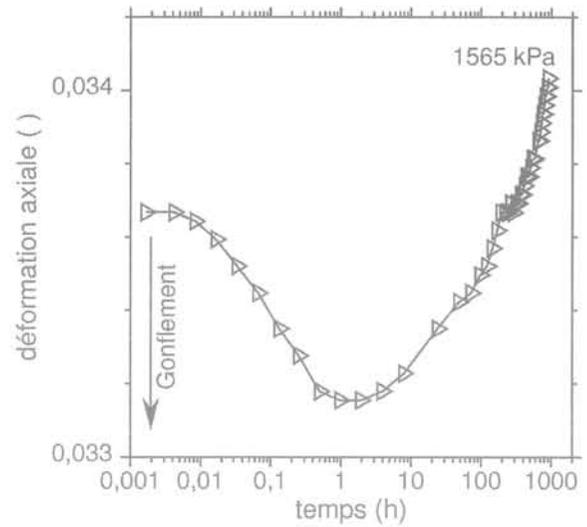
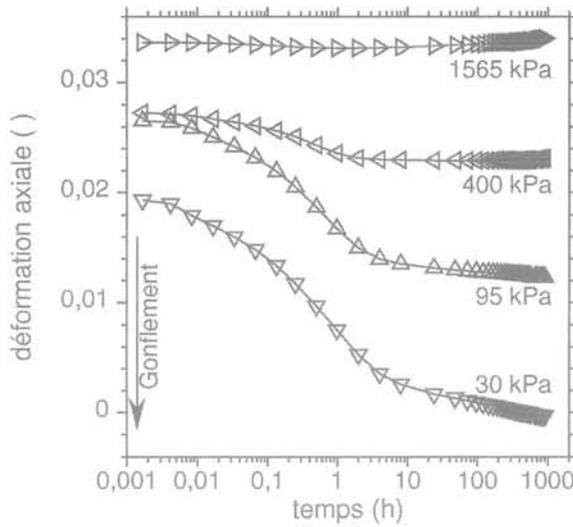


FIG. 6 Essais de gonflement en parallèle, marne du site d'Arbus.
 a) Déformations axiales pendant les paliers d'imbibition ; b) Déformation sous contrainte $\sigma_a = 1\,565$ kPa.
 Parallel swelling tests, Arbus marl.
 a) Axial strains under soaking; b) Axial strain during the stage $\sigma_a = 1,565$ kPa.

chemin des contraintes oedométriques et son hystérésis pendant des cycles de chargements monotones drainés d'un sol ou d'une marne (Serratrice et Flavigny, 1996). Une éprouvette de diamètre $d_o = 60$ mm et de hauteur $h_o = 25$ mm est découpée à la trousse coupante et placée dans une bague oedométrique très peu déformable et équipée de jauges de déformation qui permettent de mesurer la contrainte radiale après étalonnage préalable de la bague. Le chargement est effectué à l'aide d'une presse, en condition drainée et à vitesse de déplacement constante. L'appareil permet d'appliquer une contrainte axiale maximale égale à 20 MPa (Fig. 7). La réalisation de chargements par paliers est moins aisée, car le dispositif existant nécessite de contrôler la charge axiale manuellement.

La figure 8 montre la réponse de la marne d'Esna pendant un essai de gonflement réalisé avec un oedomètre K_o à haute pression. La contrainte axiale est imposée initialement à $\sigma_a = 1\,500$ kPa après un premier cycle de chargement dans l'état naturel de la marne et à l'aide d'une presse triaxiale (figure 8a). L'imbibition produit un gonflement ($\Delta \epsilon_a < 0$, figure 8b). Corrélativement, la contrainte radiale augmente pendant une certaine d'heures (figure 8a). La contrainte axiale augmente aussi, sous l'effet de la rigidité du bâti de chargement. Le rappel de la contrainte axiale à sa valeur imposée de 1,5 MPa à plusieurs reprises (contrôle manuel) change peu la réponse radiale σ_r qui demeure comprise entre 6,5 et 7,5 MPa. Dans le même temps, la déformation de gonflement $\Delta \epsilon_a$ n'excède pas 5 %. Après 700 heures d'essai, le déchargement total de l'éprouvette produit un très fort gonflement axial de près de 20 % en plus de 200 heures. La contrainte radiale diminue aussi progressivement.

Dans un tel essai effectué en condition oedométrique, le gonflement de la marne produit une forte augmentation de la contrainte radiale, qui devient largement supérieure à la contrainte axiale. De ce fait, le chargement induit par le gonflement passe à un état de contrainte en extension caractérisé par un déviateur des contraintes $q = \sigma_a - \sigma_r$ négatif. Un tel état des contraintes peut conduire à la rupture de la marne en extension. Cette rupture est atteinte d'autant plus facilement que le gonflement a provoqué simultanément une dégradation des propriétés mécaniques du matériau par déstructuration (le sol se transforme au cours du gonflement).

Ces déformations de rupture en extension (déformations plastiques) se superposent aux déformations de gonflement, car ces deux types de déformations sont du même signe ($\Delta \epsilon_a < 0$). En ce sens, les déformations de gonflement libre (charge axiale nulle) peuvent parfois se montrer excessivement surestimées à l'oedomètre, du fait de la superposition de déformations plastiques. La rupture dans l'oedomètre se manifeste alors de manière explicite avec l'apparition de plans de rupture sub-parallèles aux faces de l'éprouvette (disquage). Cette superposition des mécanismes de gonflement et de rupture s'observe ici au laboratoire,

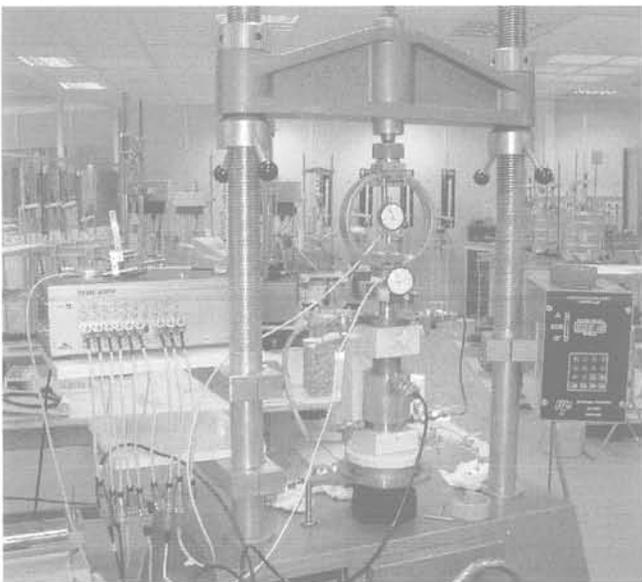


FIG. 7 Essai de gonflement à l'oedomètre K_o à haute pression. Appareil K_o , presse triaxiale et chaîne de mesure.
 Swelling test with high pressure K_o oedometric cell. K_o apparatus, loading frame and data acquisition system.

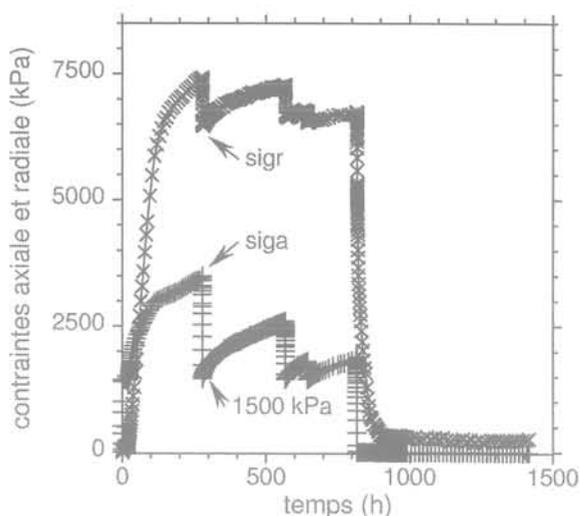
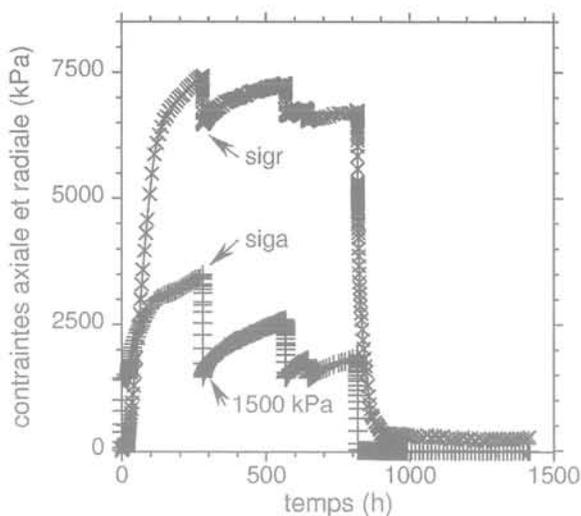


FIG. 8 Essai de gonflement K_0 , marne d'Esna.
 a) Contraintes axiale et radiale en fonction du temps ; b) Déformation axiale en fonction du temps.
 K_0 swelling test, Esna marl.
 a) Axial and radial stresses versus time; b) Axial strain versus time.

quand une contrainte axiale ne vient pas s'opposer au gonflement axial, à déformation radiale nulle. Cette superposition peut apparaître aussi dans les ouvrages, en fond d'excavation notamment, ou en radier de tunnel, pour aboutir à un processus autoentretenu de fissuration du terrain et d'approfondissement progressif de la pénétration de l'eau au sein du massif, quand il n'est pas confiné.

La figure 9 donne un autre exemple d'essai de gonflement réalisé avec un oedomètre K_0 à haute pression. Il s'agit d'une marne très compacte de l'Oxfordien (« Terres noires », Hautes-Alpes). La contrainte axiale est maintenue à 1,9 MPa pendant 35 jours. La pression radiale croît jusqu'à $\sigma_r = 6,7$ MPa sans se stabiliser pendant la durée du palier.

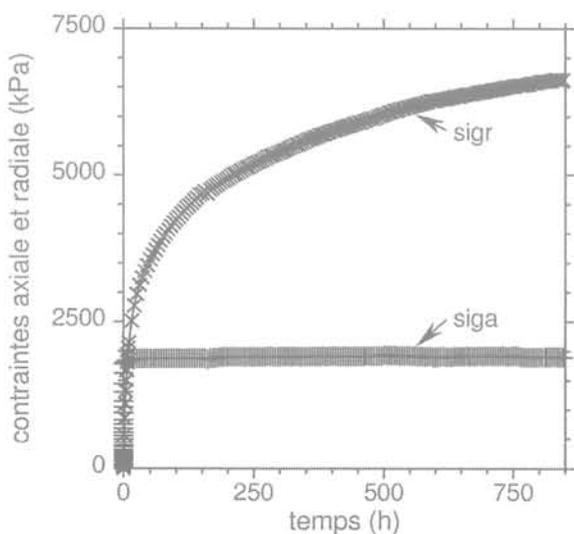


FIG. 9 Essai de gonflement K_0 , marne de Terres noires.
 K_0 swelling test, Terres noires marl.

pression sur différents matériaux au cours de séries d'essais comprenant plusieurs éprouvettes chargées dans la plage indiquée de la contrainte axiale σ_a (e_0 sont les indices des vides initiaux mesurés sur les différentes éprouvettes testées). Des observations analogues ont été recueillies pour des sols argileux compactés, avec des pics du déviateur pendant la phase d'imbibition, puis de fortes amplitudes de gonflement en fin de déchargement. Les contraintes mesurées sont néanmoins plus petites sur les sols compactés en comparaison des terrains marneux plus ou moins indurés ou rocheux du tableau III. Les résultats d'essais de gonflement réalisés à l'oedomètre K_0 sur une anhydrite du tunnel de Foix sont donnés à titre comparatif dans le tableau III, même si le gonflement ne trouve pas la même origine physique dans cette roche, en comparaison des marnes.

TABEAU III Contraintes radiales σ_r mesurées à l'oedomètre K_0 à haute pression sur différents terrains, en fonction de la contrainte axiale appliquée σ_a .

Site	Matériau	e_0	σ_a (MPa)	σ_r (MPa)
Tunnel de Chamoise	marne	0,13 à 0,15	0,1 à 12,5	3,8 à 13
Marne d'Esna	marne	0,3	2	6,5 à 7,5
Tunnel de Tartaignille	marne	0,12 à 0,35	2 à 7	1,6 à 6,5
« Terres noires » Hautes-Alpes	marne	0,08 à 0,15	2	1 à 7
Tunnel du mont Sion	molasses	0,1 à 0,25	3 à 8	4
Tunnel de Foix	anhydrite	(0,05)	2,5	10

Une approche expérimentale différente a été proposée par Windal (2001) et Windal *et al.* (2002) pour aborder les effets tridimensionnels du gonflement. Des oedomètres à paroi souple ont été mis au point et utilisés sur divers matériaux. Les essais sont de type oedo-

Gonflement et déstructuration

métrique à chargement par palier. Des éprouvettes sont découpées dans un même échantillon et sont placées dans des bagues minces de différentes rigidités. Ces bagues mesurent la contrainte radiale σ_r et autorisent une déformation radiale proportionnelle à cette contrainte. Chaque essai se déroule par des paliers de déchargement sous imbibition.

La figure 10 montre les déformations axiales ϵ_a et les contraintes radiales σ_r mesurées sur trois éprouvettes de marne de l'Oligocène (Marseille) pendant le premier palier d'imbibition sous une contrainte axiale $\sigma_a = 780$ kPa. Les modules de rigidité des anneaux flexibles sont $K_{an} = 370, 580$ et $3\,045$ MPa respectivement. Il apparaît clairement que la contrainte radiale σ_r est d'autant plus grande que la bague « oedométrique » est rigide et que, dans le même temps, la déformation axiale ϵ_a est plus grande. L'autorisation d'une déformation latérale induit donc une diminution concomitante de la pression de gonflement latérale et de la déformation axiale de gonflement. La pression radiale et la déformation axiale de gonflement sont maximales dans les conditions oedométriques « stricte » des essais K_{an} sans déformation latérale.

Sur le plan pratique, cette illustration de la mesure des contraintes radiales pendant le gonflement traduit une forte interaction entre l'éprouvette et la bague oedométrique, qui n'est pas sans conséquence sur les résultats de l'essai. Cela suggère que les gonflements mesurés dépendent du protocole d'essai et, en particulier, du niveau de contrainte axiale sous lequel est initié le gonflement pendant le premier palier d'imbibition. D'où les divergences observées entre les procédures courantes, divergences qui peuvent être accentuées par les imperfections des instruments de mesure (frottement du sol sur la bague oedométrique par exemple), l'évolution du sol pendant le gonflement, les interférences entre les paliers de déchargement sous imbibition, etc.

Le point suivant concerne l'évolution des terrains gonflants du fait de l'imbibition, à l'échelle de temps des essais de laboratoire. Cette question a déjà été évoquée plus haut. L'exemple de la figure 3b concerne la marne du tunnel de Tartaguille et l'une des éprouvettes de la figure 3a (éprouvette mise en imbibition sous 178 kPa). Ces essais ont été poursuivis après la première phase d'imbibition par un cycle de déchargement, recharge, déchargement par paliers, sous imbibition. La courbe contrainte déformation de l'éprouvette soumise à imbibition sous la contrainte axiale $\sigma_a = 178$ kPa est représentée dans le plan $(\lg(\sigma_a), \epsilon)$. Il apparaît nettement que la compressibilité de la marne mesurée après le gonflement a largement augmenté en comparaison de sa compressibilité d'origine. Les trois autres éprouvettes ont montré un comportement identique. Dotée d'un module d'Young de plusieurs GPa dans son état naturel, d'après des mesures réalisées en compression uniaxiale ou au triaxial à haute pression, la marne se retrouve après gonflement avec un coefficient de compressibilité $C_c = \Delta \epsilon / \Delta \lg(\sigma_a)$ égal à 0,16, c'est-à-dire un taux de compressibilité typique de celui d'une argile. Les déformations de gonflement s'avèrent presque totalement irréversibles par rapport à l'état naturel de la marne. Cette évolution peut être reliée vraisemblablement à l'évolution des minéraux argileux sous l'effet de l'hydratation dans les conditions mécaniques particulières de l'essai, conjointement à des mécanismes d'interaction avec l'appareil d'essai (fort état de contrainte d'extension). On peut parler alors de mécanisme d'altération à l'échelle de temps de l'essai et, pour les ouvrages, d'altération à une échelle de temps humaine. Les sols se transforment du fait du gonflement (Serratrice et Soyez, 1996).

Un exemple opposé est donné sur la figure 11 où les pressions de gonflement mesurées sur les molasses

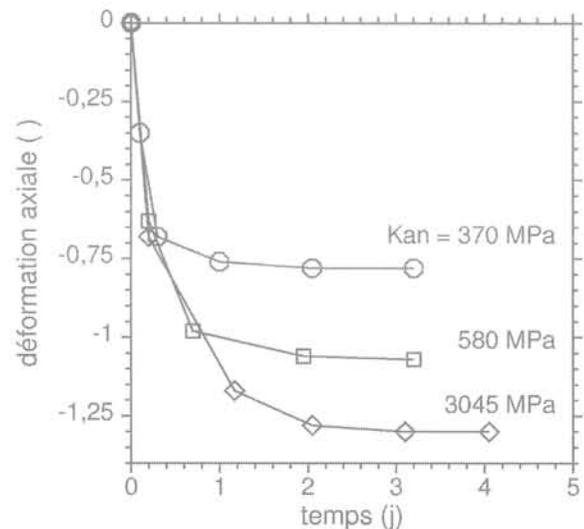
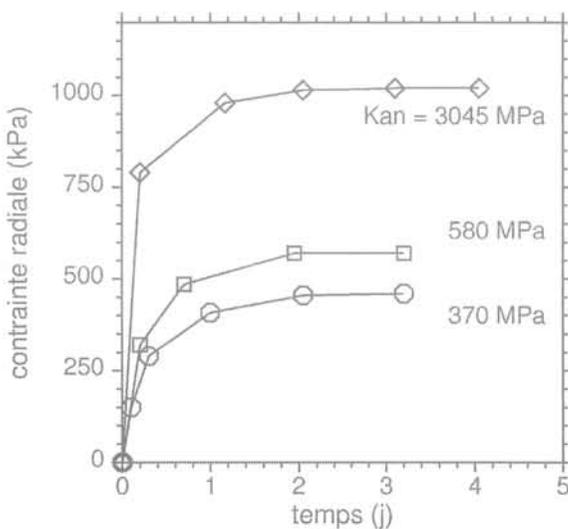


FIG. 10 Essais de gonflement à l'oedomètre à paroi souple, marne de l'Oligocène. Paliers d'imbibition sous $\sigma_a = 780$ kPa, K_{an} rigidité des bagues.
 a) Contraintes radiales en fonction du temps ; b) Déformations axiales en fonction du temps (d'après Windal et al., 2002).
 Swelling tests with flexible oedometers, Oligocene marl. Soaking stages under $\sigma_a = 780$ kPa, K_{an} ring stiffness.
 a) Radial strain versus time; b) Axial strain versus time (after Windal et al., 2002).

Problèmes posés par les essais de fluage sur les marnes

du site du mont Sion (Haute-Savoie) sont reportées en fonction de leurs indices des vides initiaux (Gaudin et Serratrice, 1998). La dispersion des indices des vides initiaux tient à la variabilité spatiale de la compacité des molasses, qui sont prélevées dans différents sondages carottés profonds. Des pressions de gonflement maximales apparaissent pour les indices des vides voisins de $e_0 \approx 0,15$, par opposition aux terrains plus compacts ou plus lâches ($0,09 < e_0 < 0,31$). Cet exemple suggère la présence d'effets de structure plus ou moins marqués qui s'opposent à la déstructuration du matériau pendant le gonflement. Ces effets sont modulés par la compacité du terrain comme exprimé ici, mais peuvent l'être aussi par la variabilité de la composition minéralogique des molasses dans leur état naturel (tableau II). Leroux (1972), puis Pejon *et al.* (1997), suggèrent que la composition minéralogique globale des marnes ne permet pas de caractériser seule le comportement de ces matériaux en présence d'eau et que leur texture ou leur micro-fissuration jouent un rôle prépondérant pendant le gonflement.

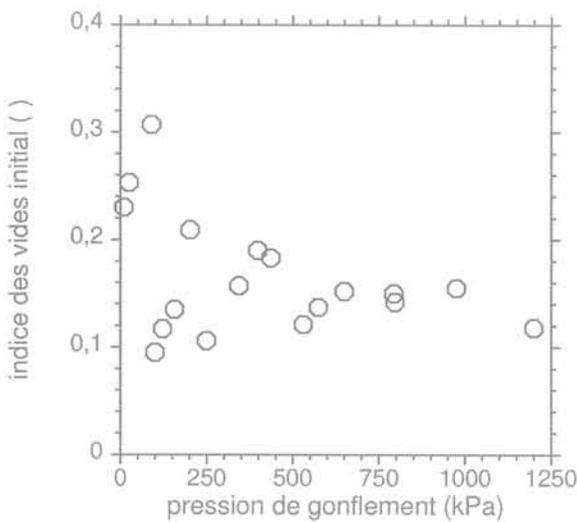


FIG. 11 Pressions de gonflement en fonction de l'indice des vides initial, molasses du site du mont Sion.
Swelling pressure versus initial void ratio, Mont Sion marl.

Cet exemple vient en marge du sujet abordé ici, mais il permet de souligner les difficultés expérimentales qui sont rencontrées au laboratoire en matière de gonflement et de retrait. Il s'agit d'essais de fluage destinés à mesurer des vitesses de déformation sous contraintes constantes dans le cadre d'un projet de tunnel. La marne est très compacte, avec des indices des vides voisins de 0,1, et possède des modules d'Young compris entre 2 et 12 GPa et des résistances en compression uniaxiale comprises entre 3 et 50 MPa. La figure 12 montre les déformations axiales ϵ_a enregistrées en fonction du temps pour quatre essais de fluage en compression uniaxiale. Pour être isolées des conditions ambiantes, les éprouvettes de marne sont placées dans des cellules triaxiales sans fluide de confinement et sont protégées par deux membranes en latex graissées, avant d'être chargées. Dans un premier temps, les quatre éprouvettes sont soumises à des contraintes axiales égales à 674, 1 303, 1 936 et 2 568 kPa pendant près de 200 heures, puis à des contraintes égales à 293, 545, 2 568 et 1 050 kPa respectivement, pendant 600 heures supplémentaires (trois éprouvettes sont donc déchargées). Ces contraintes sont très inférieures à la résistance de la marne. Les enregistrements montrent des déformations de compression, qui progressent indépendamment des charges appliquées et des déchargements. Pour tenter de confirmer cette évolution et au bout de 1 000 heures, quelques gouttes d'eau ont été introduites au fond des cellules triaxiales sans contact avec les éprouvettes, ce qui a produit une inversion immédiate du sens des déformations. Les déformations du début de l'essai, qui pouvaient être interprétées comme du fluage, s'apparentent plus à des déformations de retrait du fait de leur inversion en gonflement quand les conditions hydriques sont modifiées dans les cellules triaxiales. Cet exemple montre les difficultés expérimentales qui sont rencontrées en matière de caractérisation mécanique des matériaux marneux au laboratoire sur des longues durées, quand les terrains sont sensibles aux variations des conditions hydriques.

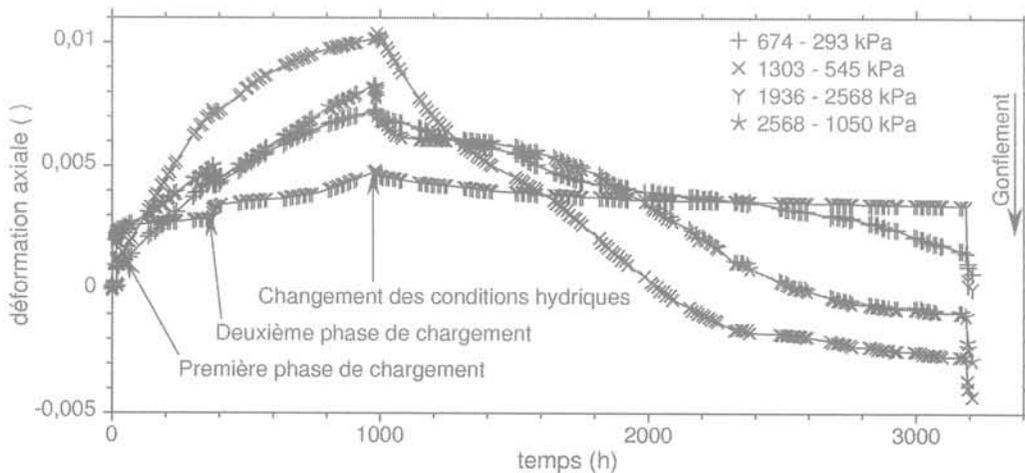


FIG. 12 Essais de fluage incontrôlés sur une marne. Déformation en fonction du temps.
Uncontrolled creep tests on a marl. Axial deformations versus time.

Essais de retrait

Pour un matériau non remanié, la limite de retrait est définie comme la teneur en eau pondérale au-dessous de laquelle le matériau ne présente plus de variation géométrique notable au cours de sa dessiccation (norme NF P 94-060-2). L'essai consiste à mesurer simultanément la déformation axiale et la teneur en eau d'une éprouvette à différents stades de sa dessiccation en atmosphère ambiante. Une variante de cet essai a été mise au point afin de suivre le retrait en continu (Serratrice, 2007). L'éprouvette est découpée à la trousse coupante. L'éprouvette, la trousse et un capteur de déplacement placé dans l'axe de la trousse sont posés sur le plateau d'une balance de précision. L'enregistrement de la variation de la masse de l'éprouvette à l'aide de la balance et de sa variation de hauteur à l'aide du capteur de déplacement axial permet de suivre la courbe de retrait en continu. La déformation radiale n'est pas mesurée.

Des exemples d'essais sont donnés sur la figure 13 où sont reportées les courbes (w , e), donnant l'indice des vides en fonction de la teneur en eau, obtenues sur une marne, une argile, un limon compacté et un limon déstructuré saturé. La droite de saturation d'équation $e = w \rho_s / S_r \rho_w$ est représentée sur le graphique (ρ_s masse volumique des grains solides, ρ_w masse volumique de l'eau, S_r degré de saturation ; ici $S_r = 1$ et $\rho_s / \rho_w = 2,7$). La marne ne montre pas de variation de volume à cette échelle du graphique, contrairement au limon remanié à une teneur en eau initiale de 58 %. L'argile présente une courbe de retrait typique sur laquelle les caractéristiques de retrait, définies par les pentes des branches représentatives des variations de volume et les coordonnées du point d'intersection, sont aisément identifiables. La courbe du limon compacté présente une allure comparable, mais le sol n'est pas saturé au départ.

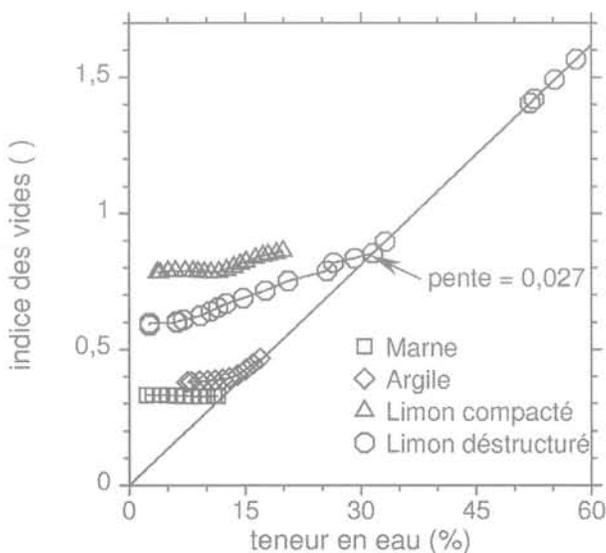


FIG. 13 Essais de retrait avec enregistrement continu sur différents sols.
Shrinkage tests with continuous measurement on various soils.

Ces exemples montrent une large étendue des variations de volume de retrait observées sur les sols. Les expériences accumulées au fil du temps révèlent que la limite de retrait n'est pas une grandeur intrinsèque du sol. L'amplitude des déformations de retrait, d'une part, et la limite de retrait, d'autre part, dépendent de l'état initial du matériau et, pour les sols reconstitués ou compactés, de la méthode de préparation au laboratoire. Sur un plan pratique, l'une des difficultés soulevées par les essais de retrait provient de l'impossibilité d'opérer un contrôle mécanique de la déformation pendant la dessiccation en atmosphère ambiante, contrairement aux essais de gonflement.

Variations de volume de retrait et de gonflement

Compacité et pression de gonflement

La figure 14 montre les pressions axiales de gonflement σ_{ag} et le potentiel de gonflement mesurés au moyen d'essais oedométriques sur différentes marnes. Comme précédemment, les indices des vides sont reportés suivant l'axe des ordonnées du graphique. En abscisse, les pressions de gonflement σ_{ag} sont graduées selon une échelle arithmétique. En chacun des points, l'amplitude du gonflement est représentée par un segment vertical d'abscisse σ_{ag} et de longueur Δe_{10} (un double figuré représente les extrémités de chacun des segments verticaux) tel que :

$$\Delta e_{10} = -K_e \lg(10/\sigma_{ag}) = (1+e_0) K \lg(10/\sigma_{ag}) \quad (3)$$

c'est à dire l'augmentation de l'indice des vides obtenue entre une pression de référence égale à $\sigma_a = 10$ kPa et la pression de gonflement. Cet indice Δe_{10} combine à la fois les paramètres K_e (ou K) et σ_{ag} . A l'échelle des ordonnées du graphique, qui exprime la grande variété des indices des vides initiaux des matériaux testés dans leur état naturel, y compris dans un même site, les segments verticaux sont réduits et peu visibles (double figuré d'abscisse σ_{ag}).

Les points expérimentaux peuvent être regroupés en familles pour traduire une transition entre les terrains peu compacts associés à des faibles pressions de gonflement vers des terrains très compacts associés à de fortes pressions de gonflement. Dans chacune des familles la dispersion des points expérimentaux tient à la variété des compacités qui caractérisent le site de prélèvement. En chaque point, l'amplitude des gonflements Δe_{10} reste faible en regard de la variété des indices des vides initiaux (entre 0,07 et 0,8 sur ces exemples). De ce fait, tous les matériaux naturels gonflants présentent des pressions de gonflement plus ou moins grandes suivant leur nature et leur structure, mais les pressions les plus fortes ne peuvent être trouvées que parmi les terrains les plus compacts. Ce commentaire ne peut être détaché du fait que l'observation du gonflement s'effectue ici à une échelle macroscopique au moyen d'essais oedométriques.

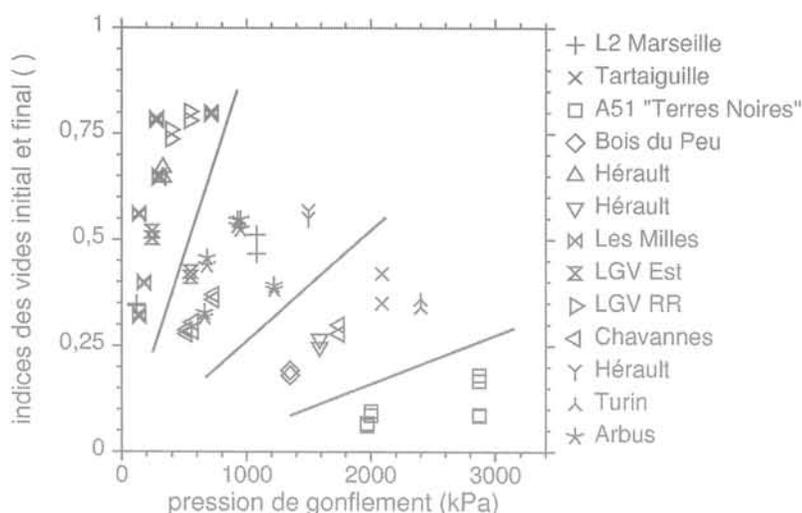


FIG. 14 Pressions de gonflement et variations de l'indice des vides au cours du gonflement pour treize marnes. Swelling pressures and variations of void ratio during swelling for thirteen marls.

5.2

Dynamique de retrait/gonflement

Les graphiques de la figure 15 associent l'indice des vides initial e_o aux variations Δe d'indice des vides de gonflement ou de retrait mesurées au laboratoire. Le cadre de cette comparaison doit être précisé, car les variations de volume de retrait et de gonflement ne sont pas strictement comparables de par la nature différente des essais. Dans les essais de gonflement oedométriques, les variations de volume sont contrôlées par la charge (et les effets tridimensionnels), contrairement aux essais de retrait où les variations de volume de dessiccation en atmosphère ambiante ne dépendent que du sol et de la dimension des éprouvettes. Aussi, pour le gonflement, la variation de volume sera égale à $\Delta e = \Delta e_{10}$, c'est à dire l'amplitude du gonflement à partir de 10 kPa définie plus haut. Pour le retrait, Δe représente la variation totale de volume mesurée entre le début et la fin de l'essai. Ce choix arbitraire n'entache pas les conclusions qui seront tirées des graphiques.

Les matériaux sont des marnes et des argiles testées dans leur état naturel, des sols compactés ou des sols déstructurés saturés lâches. Deux points supplémentaires de retrait ont été ajoutés sur la figure 15a, représentant une montmorillonite (m) et une kaolinite (k) déstructurées et saturées (Briaud et Zhang, 2004). Ces graphiques prolongent la notion évoquée précédemment selon laquelle les pressions de gonflement les plus fortes ne peuvent être attendues que dans les terrains les plus compacts. Les figures 15a et 15b montrent que les amplitudes totales des déformations de retrait et de gonflement semblent d'autant plus grandes que l'indice des vides initial est grand. Cette amplitude pourrait être qualifiée de « dynamique de retrait/gonflement ». Le terme « dynamique » est employé ici au sens d'une amplitude. Mais il ne ressort pas une règle unique de variation de Δe avec e_o devant la variété des réponses des différents terrains dans différents états et leur propre hétérogénéité. Par contre, il apparaît plus nettement que la plus grande part des variations de volume des sols lâches relève du retrait, tandis que la plus grande part des variations de volume

des terrains compacts relève du gonflement. Ainsi, les sols déstructurés saturés à forte teneur en eau ne gonflent pas et les terrains compacts ne se rétractent pas. Des exemples ont été donnés sur la figure 13.

La droite (1) de pente -1 indiquée sur les graphiques délimite le domaine des retraits possibles, c'est à dire $-e_o < \Delta e < 0$. Les trois autres courbes (2, 3 et 4) expriment une relation entre e_o et Δe telle que :

$$\Delta e = e_k [1 - \exp(-e_o/b)] - e_o \quad (4)$$

avec $b = -e_{on} / \ln(1 - e_o/e_k)$ et e_k et e_{on} des paramètres. La variation de volume de retrait-gonflement est nulle ($\Delta e = 0$) si $e_o = 0$ ou $e_o = e_{on}$. Le paramètre e_{on} peut être considéré comme un paramètre de structure, car le sol présente une dynamique de gonflement si $0 < e_o < e_{on}$ et une dynamique de retrait si $e_{on} < e_o < e_k$. Le paramètre e_k dépend de la nature du sol et son mode de formation. Les trois courbes de la figure 15 sont calculées avec les couples (e_k, e_{on}) égaux à (0,4 ; 0,04), (1,6 ; 0,6) et (3 ; 2) respectivement.

Quelques matériaux particuliers sont mis en exergue sur la figure 15b, parmi l'ensemble des données de la figure 15a. Les molasses du mont Sion se regroupent du côté des terrains gonflants et des fortes compacités. Toutefois, les molasses les plus expansives ne sont pas les plus compactes (figure 11). L'argile des Milles, qui est peu compacte et hétérogène, présente des déformations de retrait plus grandes que celles de gonflement. Une tendance analogue s'observe avec le limon de Goderville compacté en différents points d'état (Serratrice, 2007).

Il ne doit pas être perdu de vue que cette perception globale du comportement des différents matériaux dans différents états résulte d'une approche macroscopique au laboratoire qui est transcrite ici par des paramètres tels que K , σ_{ag} ou Δe . En pratique, la dynamique de retrait/gonflement dépend de nombreux facteurs comme la nature du sol, sa composition minéralogique, sa structure pour les terrains testés dans leur état naturel, son anisotropie, le mode de préparation et de densification au laboratoire pour les sols compactés ou les sols déstructurés. Néanmoins, l'état de compacité initial du matériau, traduit ici par e_o , détermine pour

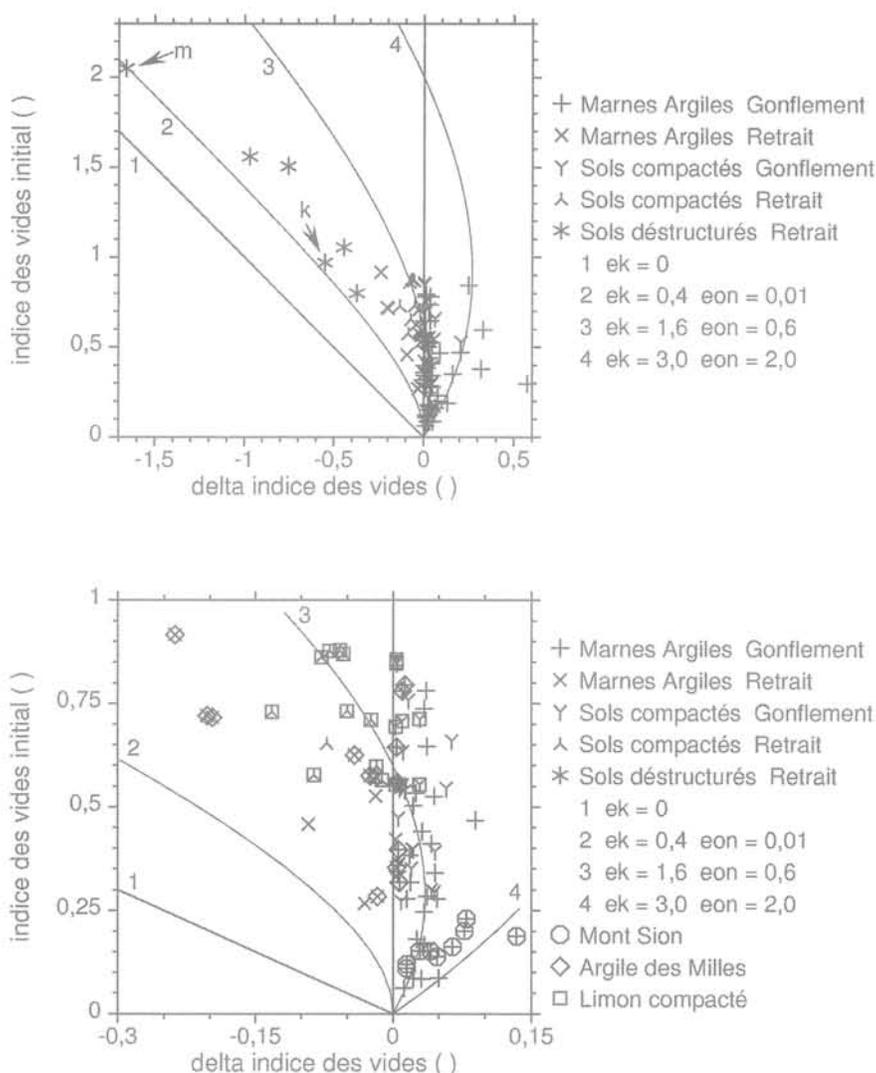


FIG. 15 Variations de volume de retrait/gonflement.
 a) Ensemble des données ; b) Matériaux particuliers.
 Shrink-swell volume changes.
 a) All data ; b) Particular soils.

une large part cette dynamique. Les courbes tracées sur les graphiques de la figure 15 suggèrent que, malgré la variabilité des compacités et des compositions minéralogiques des terrains d'un même site, chaque formation semble posséder une seule dynamique de retrait/gonflement. Mais, en pratique, il n'existe pas de terrains dont l'hétérogénéité provienne de la seule variabilité des compacités.

6

Conclusion

Cette présentation de quelques aspects expérimentaux du gonflement et du retrait vus au travers d'exemples d'essais de laboratoire ne fait qu'évoquer des questions connues depuis longtemps, tant sur le plan de la pratique des essais que de la compréhension des phénomènes et la transposition de ces données au comportement des ouvrages.

La cinétique du gonflement est très lente pour les terrains compacts testés dans leur état naturel. Elle prend souvent l'allure de courbes de consolidation

inversées, avec une phase de « gonflement secondaire » linéaire en logarithme du temps sur de longues périodes. Le gonflement (et le retrait) sont des mécanismes tridimensionnels. Les essais oedométriques K_0 (mesure de la contrainte radiale) font apparaître de très forts états de contrainte d'extension pouvant conduire à la rupture du sol dans les bagues oedométriques. Des déformations plastiques se superposent alors aux déformations de gonflement, ce qui permet d'avancer que les potentiels de gonflement peuvent être surestimés dans bien des cas. L'utilisation de bagues oedométriques déformables confirme cette tendance. Ces effets tridimensionnels peuvent expliquer aussi pourquoi les pressions de gonflement oedométriques dépendent du protocole d'essai. En présence de terrains dotés d'un fort potentiel de gonflement, il paraît nécessaire de pratiquer des essais à haute pression susceptibles de dépasser la pression de gonflement et s'assurer alors de la nullité des déformations. Enfin, le gonflement d'un sol se traduit par une dégradation de ses propriétés mécaniques, qui peut être vue comme le résultat d'un mécanisme d'altération à l'échelle du temps des essais de laboratoire.

L'amplitude des déformations qu'un sol est susceptible de développer, pendant l'un ou l'autre des deux mécanismes de retrait/gonflement, a été qualifiée de « dynamique de retrait/gonflement ». Si l'approche macroscopique pratiquée au laboratoire et illustrée ici au travers de différents exemples ne permet pas d'expliquer en détail les mécanismes observés, il ressort néanmoins que cette dynamique dépend de la compacité initiale du sol, en première approximation. En termes de potentiel de déformation et pour les matériaux sensibles aux variations hydriques, un sol lâche produira préférentiellement une dynamique de retrait,

alors qu'un matériau compact produira plutôt une dynamique de gonflement. Dans ce sens, les pressions de gonflement les plus élevées sont à attendre de la part des sols les plus compacts. Cela sous-tend l'idée que, en termes d'effets de structure, l'espace poreux disponible dans le sol et les liaisons d'induration associées, jouent vraisemblablement un rôle dans les variations de volume observées à une échelle macroscopique. Ces différentes observations tirées des essais de laboratoire ne sont pas sans analogie avec les observations pratiquées sur les ouvrages.

Bibliographie

- AFNOR – Norme XP P 94-060-2, Détermination effective de la limite de retrait sur un prélèvement non remanié, décembre 1997, 10 p.
- AFNOR – Norme XP P 94-091, Essai de gonflement à l'oedomètre. Détermination des déformations par chargement de plusieurs éprouvettes, décembre 1995, 13 p.
- Bigot G., Zerhouni M.I. – Retrait, gonflement et tassement des sols fins. *Bull. des Labo. des P. et Ch.*, 229, 2000, p. 105-114.
- Briaud J.-L., Zhang X. – Water content method for movement prediction of swell shrink soils. *Symp. Int. Fondsup*, Paris 2004, vol. 2, p. 353-372.
- Gaudin B., Serratrice J.-F. – Étude en laboratoire du comportement mécanique d'une molasse. *2nd Int. Symp. on Hard Soils - Soft Rocks, Naples*, 1998, tome 1, p. 173-181.
- Guillaume A., Jeanette D., Paquet H., Serratrice J.-F. – Géotechnique de la formation d'Esna et conservation de la tombe de Ramsès II (Vallée des Rois, Louqsor, Égypte). *Revue d'Archéométrie*, n° 25, 2001, p. 113-123.
- ISRM. – Suggested methods for laboratory testing of argillaceous swelling rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, vol. 26, n° 5, p. 415-426.
- Leroux A. (1972) – Caractérisation mécaniques des roches argileuses en relation avec leur texture. *Bull. liaison Labo. P. et Ch.*, 61, 1972, p. 155-178.
- Mieussens C. – Détermination de la sensibilité des sols aux variations de teneur en eau en laboratoire. Essais oedométriques sur les sols compactés. *Projet de méthode d'essai des LPC*. LPC de Toulouse, 1993.
- Pejon O.J., Le Roux A., Guignard D. – Comportement à l'eau des roches argilo-marneuses, suivi du gonflement, importance de la minéralogie et des textures. *Bull. AIEG*, Paris, 55, avril 1997, p. 105-119.
- Serratrice J.-F., Flavigny E. – Mesure en laboratoire du coefficient K_0 d'une marne. *1st Int. Symp. on Hard Soils - Soft Rocks*, Athènes, 1993, vol. 1, p. 787-793.
- Serratrice J.F. – Comportement d'une argile compactée. *Bull. liaison Labo. P. et Ch.*, 200, 1995, p. 13-23.
- Serratrice J.F. – Comportement d'une craie compactée. *Colloquium Mundanum « Craies et Schistes »*, GBMR, Bruxelles, 1995, p. 1.1.71-1.1.80.
- Serratrice J.-F. – Comportement d'un limon compacté. *Bull. des labo. P. et Ch.*, 2007, à paraître.
- Serratrice J.-F., Soyez B. – Les essais de gonflement. *Bull. liaison Labo. P. et Ch.*, 204, 1996, p. 65-85.
- Sridharan A., Rao A.S., Sivapullaiah P.V. – Swelling pressure of clays. *Geotech. Testing J.*, vol. 9, n° 1, 1986, p. 24-33.
- Windal T. – Étude en laboratoire du gonflement des sols : mise au point d'un oedomètre flexible et étude du gonflement tridimensionnel. Thèse de l'Université des sciences et technologies de Lille, 2001, 128 p.
- Windal T., Shahrour I., Magnan J.-P., Serratrice J.-F. – Étude du gonflement des sols pour les projets de tunnels. *Revue française de géotechnique*, n° 100, 2002, p. 91-99.

Modélisation numérique du comportement d'un sol gonflant chargé soumis à des variations hydriques

M. MRAD, A. ABDALLAH,
F. MASROURI

Laboratoire Environnement
Géomécanique et Ouvrages
Nancy-Université
Rue du Doyen Marcel Rou-
bault
BP 40
54501 Vandœuvre-lès-
Nancy Cedex

Mohamad.Mrad@ensg.inpl-
nancy.fr
Adel.Abdallah@ensg.inpl-
nancy.fr
Farimah.Masrouri@ensg.
inpl-nancy.fr

Résumé

Les phénomènes de retrait-gonflement des sols argileux se manifestent par des désordres affectant principalement des maisons individuelles souvent peu rigides et fondées superficiellement. En effet, l'alternance des périodes de sécheresse et de précipitation entraîne des modifications de l'état hydrique du sol se traduisant par des déplacements des fondations superficielles. Cette alternance de retrait et de gonflement peut provoquer des dégâts dans les bâtis sous forme de fissures, voire entraîner la rupture partielle ou totale de l'ouvrage, lorsqu'ils ne sont pas pris en compte dans les projets. Dans cet article, le modèle élastoplastique BExM (Barcelona Expansive Model), pour les sols gonflants non saturés implanté dans le code de calcul aux éléments finis Code_Bright, est utilisé pour l'étude du comportement hydromécanique d'un sol gonflant chargé par une semelle filante. L'objectif de cette étude est d'analyser l'influence des sollicitations hydriques dues à la variation des conditions climatiques (précipitation et évaporation) sur les déplacements du massif de sol argileux, et d'étudier l'influence d'une géomembrane posée dans le sol afin de retarder les transferts hydriques et les phénomènes de retrait-gonflement. Les résultats obtenus montrent que le modèle est capable de prédire qualitativement les déplacements du massif de sol pendant les différentes sollicitations hydriques.

Mots-clés : sol gonflant non saturé, couplage hydromécanique, modélisation numérique, éléments finis, fondation superficielle, géomembrane, modèle BExM.

Numerical modelling of a loaded swelling soil behaviour under hydraulic variations

Abstract

One of the primary causes of shallow foundation problems in many regions is the highly expansive nature of the clayey soil on which the buildings rest. The clay expands or contracts as its moisture content changes with the variation of the climatic conditions. Indeed, the alternation of rainfall and drought periods involves modifications of the soil hydric state resulting in displacements. When not taken into account in the project design this alternation of shrinkage and swelling can damage buildings by inducing cracks and partial or total failure of the structure. In this paper, the elastoplastic model BExM (Barcelona Expansive Model) for swelling unsaturated soils implemented in the finite-element program Code_Bright is used for the study of the hydromechanical behaviour of a swelling soil loaded by a strip foundation. The objective of this study is to analyze the effects of hydric solicitations due to variations of the climatic conditions (precipitation and evaporation) on the displacements of the clayey soil and to study the effect of a geomembrane protection posed in the soil in order to delay the hydraulic transfer and the shrinkage-swelling of the soil.

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 30 avril 2008.

The obtained results show that the numerical model is able to qualitatively predict the soil displacements during various hydric solicitations.

Key words: unsaturated swelling soil; hydromechanical coupling; Finite-Element method; shallow foundation; geomembrane; BExM model.

1

Introduction

Certains sols argileux présentent des variations de volume importantes liées à la variation de leur teneur en eau en fonction des conditions climatiques. Ces variations de volume sont à l'origine de nombreux désordres tant pour les constructions en surface (fondations superficielles, ouvrages de soutènement, remblais, barrages en terre, ...) notamment quand elles provoquent des déformations différentielles, que pour les ouvrages enterrés (tunnels, canalisations, fondations profondes...). Les exemples de désordres liés à la présence d'argiles gonflantes sont nombreux et variés (Chen, 1975 ; Philipponat, 1991 ; Vandangeon, 1992 ; Derriche *et al.*, 1999 ; Hachichi et Fleureau, 1999 ; etc.). En France, depuis les sécheresses des années 1989-1991, 1997-1998 et 2003, qui ont affecté notamment des constructions fondées superficiellement, les conséquences du retrait-gonflement des sols argileux sur ce type de structure est un objet de préoccupation.

Plusieurs modèles élastoplastiques ont été développés pour décrire le comportement des sols non saturés (Alonso *et al.*, 1987 ; Karube *et al.*, 1989 ; Kohgo *et al.*, 1991 ; Gallipoli *et al.*, 2003 ; Wheeler *et al.*, 2003...). Ces modèles sont capables de reproduire les principaux traits de comportement hydromécanique caractéristiques des sols non saturés. Alonso *et al.* (1987, 1990) ont proposé un modèle élastoplastique pour les sols non saturés non gonflants, nommé *BBM* (*Barcelona Basic Model*). Ce modèle est une extension du modèle de Cam-Clay modifié (Roscoe *et al.*, 1968) dans le domaine des succions non nulles. Il considère que l'état des contraintes des sols non saturés est défini par deux variables indépendantes : la contrainte moyenne nette (p^*) égale à la différence entre la contrainte totale moyenne ($p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$) et la pression de l'air (u_a), et la succion (s) définie comme la différence entre la pression de l'air et la pression de l'eau (u_w). Le modèle *BBM* est capable de décrire correctement : (i) l'effondrement ou le gonflement en fonction de la charge appliquée lors de l'humidification ; (ii) l'augmentation de la pression de préconsolidation apparente et de la cohésion du sol avec la succion ; (iii) la diminution de la compressibilité avec la succion ; (iv) les différentes irréversibilités rencontrées le long des chemins où la succion et la contrainte varient simultanément, et (v) l'indépendance du chemin de contrainte pour une variation monotone du degré de saturation.

En revanche, le modèle *BBM* ne tient pas compte de quelques aspects particuliers observés dans des sols gonflants comme : (i) l'apparition du gonflement irréversible lors de l'humidification du sol ; (ii) l'influence de l'état initial et du chemin de contrainte suivi sur le gonflement et les pressions de gonflement (Brackley, 1973 ; Justo *et al.*, 1984) ; (iii) l'accumulation des déformations de compression ou d'extension au cours des cycles hydriques (Pousada, 1984 ; Dif et Blumel, 1991),

et (iv) la dépendance de la réponse du sol du chemin de contrainte suivi même lors d'une variation monotone croissante du degré de saturation (Cuisinier, 2002).

Les modèles de comportement volumique des sols gonflants sont actuellement assez peu répandus du fait de leur complexité et de la difficulté des études expérimentales couplées tenant compte des effets de changement de succion et de contrainte. Le comportement des sols gonflants a été souvent décrit par des lois relativement simples et empiriques, qui relient la réponse du sol aux changements de la succion et aux contraintes appliquées. Il y a relativement peu de modèles qui intègrent tous les aspects principaux du comportement hydromécanique couplé de ces sols dans un cadre unifié. Robinet *et al.* (1998, 1999) et Baudet et Stallebrass (2004) ont proposé des modèles pour les sols gonflants saturés. Cui *et al.* (2002) ont présenté un modèle élastique non linéaire permettant de décrire le comportement des sols gonflants non saturés mais fortement compactés. Le modèle proposé par Gens et Alonso (1992) et Alonso *et al.* (1999) (*BExM : Barcelona Expansive Model*) peut être mentionné comme un modèle de référence pour décrire le comportement des sols gonflants non saturés. Ce modèle a été implanté dans *Code Bright* (Mrad, 2005), un code de calcul aux éléments finis développé par le département de géotechnique et geosciences de l'université polytechnique de Catalogne (Espagne) depuis 1996, pour l'analyse des problèmes couplés thermo-hydro-mécaniques dans des géomatériaux (Olivella *et al.*, 1996).

Cet article présente une application du modèle *BExM* au problème de retrait-gonflement des sols d'assise des fondations superficielles. Dans cette application, l'influence du processus de la saturation et de la désaturation sur le comportement hydromécanique d'un sol gonflant chargé par une semelle filante est étudiée. Une étude de l'influence d'une géomembrane posée dans le sol afin de retarder les transferts hydriques et les phénomènes de retrait-gonflement est également présentée.

2

Description du modèle *BExM*

Le modèle *BExM* considère une structure à deux échelles pour les sols gonflants, la microstructure qui correspond aux minéraux actifs de l'argile constituant les agrégats, et la macrostructure qui tient compte du reste de la structure du sol et de l'arrangement des agrégats. La microstructure est supposée saturée et présente un comportement réversible indépendant du comportement de la macrostructure, tandis que la macrostructure peut voir son degré de saturation varier. La microstructure est couplée à la macrostructure ; ce couplage se traduit par la possibilité d'apparition de déformations plastiques macrostructurales à partir des déformations microstructurales élastiques.

Le comportement de la macrostructure est défini par la courbe *LC* (*Loading Collapse*) qui traduit l'augmentation de la pression de préconsolidation apparente avec la succion (Figure 1a). Le comportement de la microstructure est considéré toujours réversible et ne dépend que de la contrainte effective classique [$p' = (p^* + s)$]. Ceci permet de définir dans le plan ($p^* - s$) une ligne dite *NL* (*Neutral Line*) orientée à 45° par rapport aux axes et qui sépare la zone du gonflement microstructural de la zone de retrait microstructural (Figure 1a). Le couplage entre la microstructure et la macrostructure permet de définir de part et d'autre de la ligne neutre, deux nouvelles lignes notées *SI* (*Suction Increase*) et *SD* (*Suction Decrease*), qui délimitent la zone des déformations élastiques de la macrostructure en réponse à une sollicitation hydrique.

Ce modèle a été élaboré pour les états de contrainte isotrope et triaxial. Sous chargement isotrope, il utilise deux variables indépendantes : la contrainte moyenne nette (p^*) et la succion (s). Dans le cas triaxial, une troisième variable utilisée est la contrainte déviatorique q . La surface de charge dans ce cas est tridimensionnelle (Fig. 1b). Alonso *et al.* (1999) supposent que pour des valeurs constantes de la succion, elle se réduit à une ellipse (équation 1).

$$q^2 - M^2(p^* + p_s)(p_0(s) - p^*) = 0 \quad (1)$$

où M est la pente de la courbe d'état critique supposée indépendante de la succion et $p_s = k \cdot s$, avec k , un paramètre décrivant l'augmentation de la cohésion avec la succion et p_0 la pression de préconsolidation apparente pour une succion donnée s :

$$\frac{p_0}{p_c} = \left[\frac{p_0^*}{p_c} \right]^{\frac{\lambda(0) - \kappa}{\lambda(s) - \kappa}} \text{ avec } \lambda(s) = \lambda(0)[r + (1 - r)\exp(-\beta s)] \quad (2)$$

où p_0^* est la pression de préconsolidation sous une succion nulle, p_c est une pression de référence, κ est le coefficient de compressibilité élastique, $\lambda(s)$ est le coefficient de compressibilité plastique à succion constante, r est un paramètre lié à la rigidité du sol et β un paramètre contrôlant le taux d'augmentation de la rigidité avec la succion. Les surfaces de charge *SI* et *SD* sont contrôlées par les deux variables d'écroûissage s_h et s_v .

Les lois d'écroûissage des surfaces de charge *SI*, *SD* et *LC* sont données par :

$$ds_0 = \frac{(1 + e_m)(p^* + s)(de_{vSI}^p + de_{vSD}^p)}{\kappa_m f} = ds_h \quad \text{et} \\ \frac{dp_0^*}{p_0^*} = \frac{(1 + e_M)}{\lambda(0) - \kappa} (de_{vSI}^p + de_{vSD}^p + de_{vLC}^p) \quad (3)$$

où de_{vSI}^p , de_{vSD}^p et de_{vLC}^p sont les déformations volumiques plastiques dues à l'activation respectivement de *SI*, *SD* et *LC* ; e_m et e_M sont respectivement les indices des vides microstructural et macrostructural, κ_m est l'indice de compressibilité de la microstructure et f une fonction du couplage micro-macrostructurale (Alonso *et al.*, 1999 ; Alonso *et al.*, 2001 et Lloret *et al.*, 2003).

3

Implantation et validation

Le modèle *BExM* a été implanté dans le code de calcul aux éléments finis *Code_Bright* (Mrad, 2005). Un algorithme explicite raffiné combiné avec une technique de progression automatique avec contrôle des erreurs a été utilisé pour l'intégration numérique de la relation élastoplastique contrainte-déformation. Cet algorithme est inspiré de celui proposé par Sloan (1987), avec l'extension aux conditions non saturées. Le modèle implanté a été vérifié à l'aide de la simulation des essais œdométriques à succion contrôlée réalisés par Cuisinier (2002) sur un mélange compacté de 60 % de bentonite et de 40 % de limon, par Lloret *et al.* (2003) sur une bentonite contenant plus de 90 % de montmorillonite, et par Romero (1999) sur l'argile de Boom. Ces essais comprennent une combinaison de chemins de chargement à succion constante et de chemins de séchage/humidification à charge constante. Les comparaisons entre les simulations numériques et les mesures expérimentales ont montré que le modèle numérique est en mesure de reproduire quantitativement de façon acceptable les phénomènes caractéristiques du comportement des sols gonflants non saturés

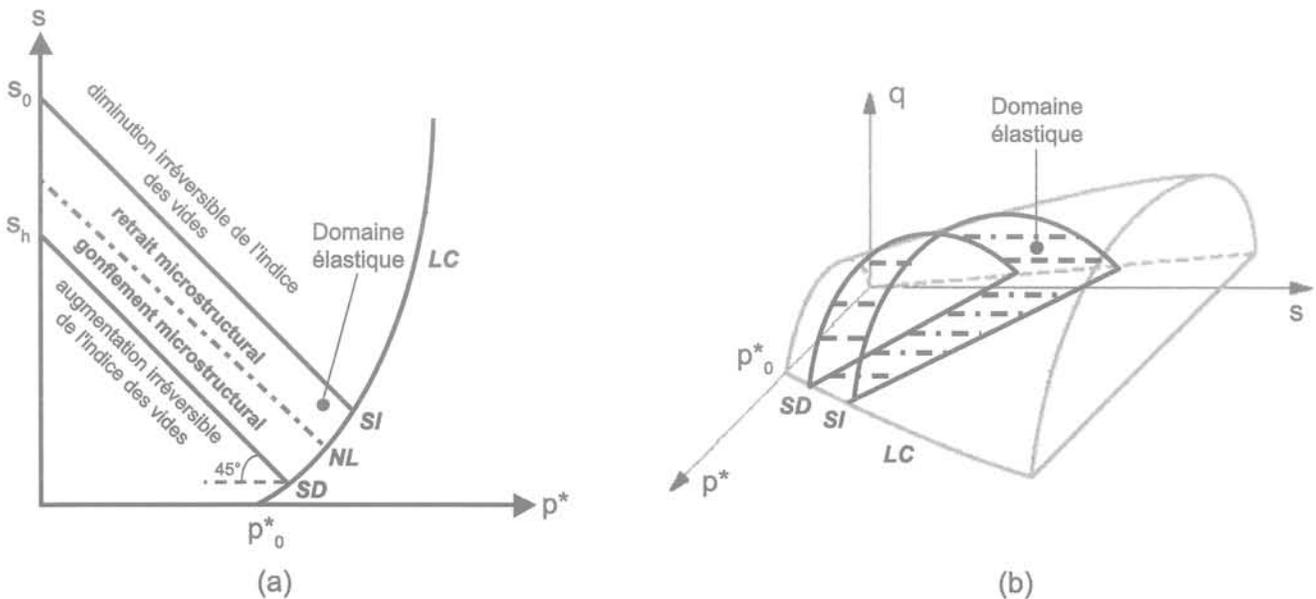


Fig. 1 Surfaces de charges dans le modèle *BExM* : (a) dans le plan [p^*, s] ; (b) dans l'espace [p^*, q, s] (Alonso *et al.*, 1999).

BExM yield loci: (a) in (p^*, s) plane; (b) in (p^*, q, s) space (Alonso *et al.*, 1999).

Application du *BExM* à un sol gonflant chargé

Dans ce qui suit, sont étudiés les déplacements verticaux d'un sol gonflant chargé par une semelle filante en béton et exposé à des variations de conditions climatiques. Le choix de la modélisation d'un tel type de fondation a été basé sur l'analyse statistique d'un grand nombre de sinistres dus au phénomène de retrait-gonflement réalisée par le CEBTP-Solen dans le cadre du projet Retrait-Gonflement – RGC&U (Vincent *et al.*, 2006). Cette analyse montre que les principaux bâtis gravement endommagés par les phénomènes de retrait-gonflement sont des maisons individuelles, dont les fondations sont dans la grande majorité des cas (95 %) des semelles filantes. Dans 87 % des cas de sinistre, le niveau d'assise des fondations est inférieur à 1,20 m de profondeur par rapport à la surface.

Les modélisations numériques ont été réalisées en utilisant le *Code_Bright* où le modèle *BExM*, servant à décrire le comportement du sol gonflant, a été implémenté.

4.1

Caractéristiques de la fondation

La fondation est posée à 60 cm de profondeur dans le sol gonflant (Fig. 2). Le béton de la semelle suit un comportement de type élastique linéaire. Une

contrainte verticale de 300 kPa est appliquée à sa base. Ses propriétés mécaniques et hydrauliques sont rassemblées dans le tableau I (Burlion *et al.*, 2005).

4.2

Caractéristiques du massif de sol

La fondation superficielle repose sur une couche limitée à 1,6 m d'épaisseur d'argile gonflante homogène (Fig. 2) et un sol non gonflant qui a un comportement de type élastique linéaire. Cette argile a les caractéristiques d'un mélange limon-bentonite compacté (Cuisinier, 2002 ; Cuisinier et Masrouri, 2004). Son comportement élastoplastique est représenté par le modèle *BExM* dont les paramètres ont été déterminés à partir d'essais réalisés au laboratoire (Mrad, 2005) (tableaux I et II).

Ce sol argileux possède une perméabilité à la saturation de 5×10^{-9} m/s. Les paramètres de la courbe de rétention ont été déterminés par ajustement de la courbe expérimentale de Cuisinier (2002) par le modèle de van Genuchten (1980) (Fig. 3 et tableau I).

La prise en compte de la fouille creusée pour réaliser la fondation a été introduite dans le modèle par la considération d'une zone à plus grande perméabilité, située au-dessus de la fondation : « remblai ». Le comportement hydrique de ce remblai plus perméable que le sol environnant influence les résultats de la modélisation (Fig. 3 et tableau I). Son comportement mécanique est supposé régi par le modèle *BExM* dont les paramètres sont identiques à ceux de l'argile gonflante (tableau II).

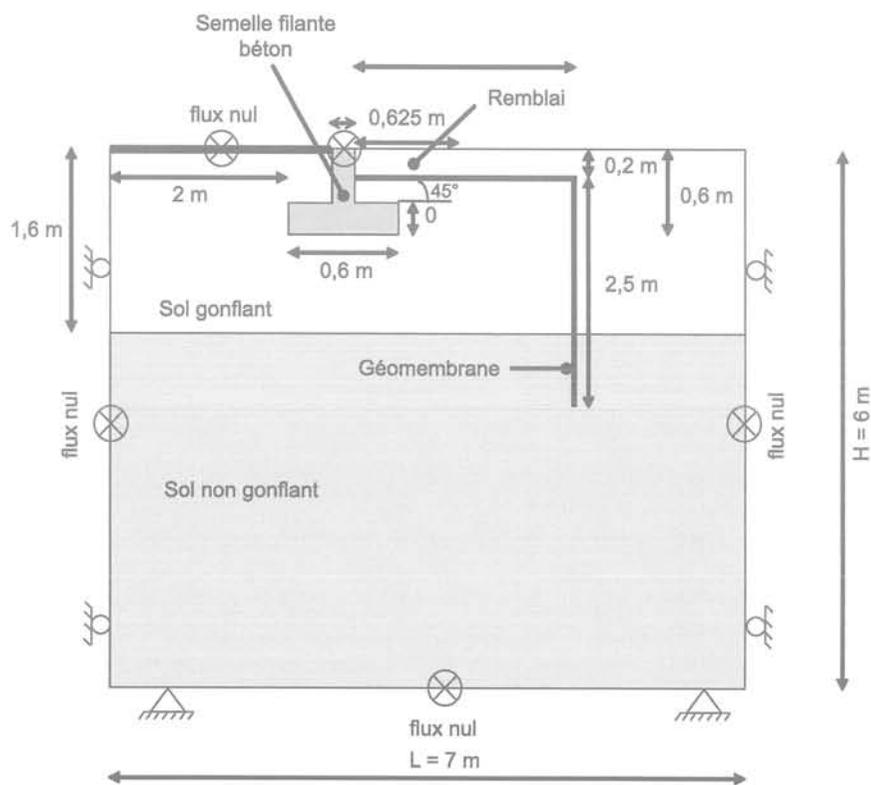


Fig. 2 Géométrie et conditions aux limites du modèle.
Geometry and boundary conditions of the model.

TABEAU II Paramètres caractérisant les matériaux du modèle.
Parameters characterizing materials of the model.

Matériau	Béton de la fondation (Burlion <i>et al.</i> , 2005)	Argile gonflante : mélange limon-ben- tonite (Cuisinier, 2002)	Remblai	Sol non gonflant
Type de comportement	élastique linéaire $E = 27\,000\text{ MPa}$ $\nu = 0,2$	élastoplastique : <i>BExM</i> (voir tableau II)	élastoplastique : <i>BExM</i> (voir tableau II)	élastique linéaire $E = 6\text{ MPa}$ $\nu = 0,2$
Poids volumique des grains solides γ_s	26,5 kN/m ³	26,7 kN/m ³	26,7 kN/m ³	26,7 kN/m ³
Perméabilité à l'état saturé k_s	10 ⁻¹² m/s	5×10 ⁻⁹ m/s	5×10 ⁻⁷ m/s	5×10 ⁻⁹ m/s
Courbe de rétention (van Genuchten, 1980) $S_e = \frac{S_r - S_{r(res)}}{S_{r(sat)} - S_{r(res)}} = [1 + (\alpha s)^n]^{-m}$	0,0235 MPa ⁻¹	1,5 MPa ⁻¹	5 MPa ⁻¹	1,5 MPa ⁻¹
α	2,105	1,34	1,44	1,34
n	0,525	0,254	0,306	0,254
$m = 1-1/n$	0	0,05	0,02	0,05
$S_{r(sat)}$	1	1	1	1
Courbe de la conductivité hydraulique (Mualem, 1976 ; van Genuchten, 1980) $k = k_s \sqrt{S_e} [1 - (1 - S_e^{1/n})^m]^2$				
m	0,17	0,254	0,306	0,254
$S_{r(res)}$	0	0,05	0,02	0,05
$S_{r(sat)}$	1	1	1	1

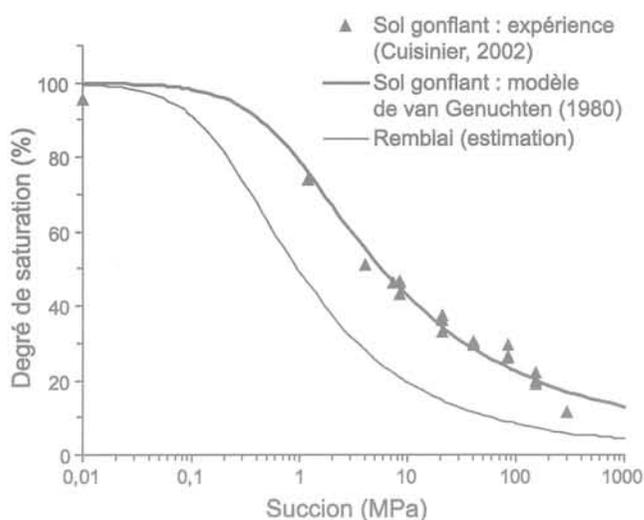


Fig. 3 Courbes de rétention du sol argileux et du remblai.
Soil water retention curves of the silt-bentonite mixture and the backfill.

4.3

Influence de la mise en place d'une géomembrane

Pour limiter l'évaporation, il est recommandé de mettre en place une géomembrane en périphérie de la fondation (Vincent *et al.*, 2006). Une deuxième modélisation a donc été effectuée en considérant une couche de géomembrane posée dans le sol à 20 cm de la surface, qui s'étend à une distance de 2,5 m et qui pénètre dans le sol jusqu'à 2,5 m de profondeur. Cette géomembrane a une épaisseur de 4 mm et un coefficient de perméabilité de 10⁻¹⁴ m/s (Bordes, 1995).

4.4

Le modèle et les conditions initiales et aux limites

La fondation est modélisée en déformation plane. L'imperméabilisation du côté intérieur du bâtiment dû à l'existence du plancher a été prise en compte. Le massif de sol a été discrétisé dans son intégralité par des éléments finis rectangulaires isoparamétriques à 4 nœuds. Le même type d'élément a été adopté pour le maillage de la fondation, afin d'assurer un assemblage correct. Le maillage est constitué en totalité de 1 436 éléments et 1 508 nœuds.

Les conditions initiales du modèle sont définies dans le tableau III et les conditions aux limites sont représentées sur la figure 2.

4.5

Phasage de calcul

Pour cette étude, les conditions climatiques correspondant aux données météorologiques issues des mesures effectuées entre 1998 et 1999 sur un terrain situé à Rambouillet, France (Beauchamp, 2006) ont été considérées (tableau IV). Elles montrent que la période entre novembre et février est caractérisée par de fortes précipitations. Tandis que, les résultats du bilan hydrique pour les autres mois correspondent à une période de sécheresse.

Pour le calcul, trois phases consécutives ont été considérées. Dans chaque phase hydrique, une condition simulant une précipitation ou une évaporation a été imposée à la surface du sol (tableau IV) :

– phase I (novembre-février). Pendant les quatre mois de précipitations, les valeurs de flux d'eau infiltré dépassent la perméabilité à la saturation, la capacité d'infiltration du sol est alors atteinte ; par conséquent,

TABLEAU II Paramètres du modèle BExM pour le mélange bentonite-limon et pour le remblai.
Parameters of the BExM model for the silt-bentonite mixture and the backfill.

Paramètres définissant la loi de comportement macrostructural			
κ	0,02	p_0^*	0,844 MPa
$\lambda(0)$	0,315	s_0	30 MPa
r	0,2777	s_h	14 MPa
β	$8,054 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$	k	0,09
κ_s	0,015	M	1,24
p_c	0,609 MPa		
Paramètres définissant la loi du comportement microstructural			
κ_m	0,011	e_m	0,25
Fonctions de couplage micro-macrostructurale			
$f_i = 0,5 + 9,9 \left(\frac{p^*}{p_0} \right)^1$		$f_b = 1 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-2} \left(1 - \frac{p^*}{p_0} \right)^{0,1}$	

pour simuler la précipitation une succion nulle à la surface de sol a été imposée ;

– phase II (mars). La modélisation de l'évaporation a été réalisée en imposant un flux d'eau négatifs de $1,37 \times 10^{-8}$ m/s à la surface du sol ; à la fin de cette phase, une succion de 20 MPa est obtenue à la surface ;

– phase III (avril-octobre). Dans cette phase, l'imposition du flux en surface aboutit à des grandes valeurs de succion, ce qui entraîne des problèmes numériques de convergence. Il a donc été décidé d'appliquer la succion de 20 MPa obtenue dans la phase précédente à la surface de sol. Par ailleurs, cette valeur correspond à la succion au-delà de laquelle la désaturation du sol engendre une faible variation d'indice des vides (Cuisinier, 2002).

4.6

Résultats

Dans ce paragraphe, sont présentés les principaux résultats des modélisations et les comparaisons des deux cas avec et sans géomembrane.

4.6.1

Succions et degrés de saturation

Les figures 4a et 4b présentent les courbes d'évolution temporelle de la succion et du degré de saturation. Elles permettent de visualiser les phénomènes de transfert hydrique pour différents points (A à D) dans le sol situés sous la base de la fondation à une profondeur de

TABLEAU III Conditions initiales du modèle (succion initiale = 20 MPa).
Initial Conditions of the model.

Matériau	Béton de la fondation	Argile gonflante (mélange limon-bentonite)	Remblai	Sol non gonflant
Porosité n	0,16	0,524	0,6	0,524
Indice des vides e	0,19	1,1	1,5	1,1
Poids volumique sec γ_d (kN/m ³)	22,3	12,7	10,7	12,7

TABLEAU IV Données météorologiques à Rambouillet, France (Beauchamp, 2006) et phasage de calcul.
Meteorological data in Rambouillet, France (Beauchamp, 2006) and calculation phases.

Mois	P (mm/mois)	ETP (mm/mois)	P - ETP (mm/mois)	P - ETP (m/s)	Conditions aux limites appliquées en surface
Novembre	53,4	9,2	44,2	$1,71 \times 10^{-8}$	Phase I : Succion = 0
Décembre	70,3	17,1	53,2	$1,99 \times 10^{-8}$	
Janvier	41,4	16,2	25,2	$9,41 \times 10^{-9}$	
Février	86,5	35,1	51,4	$2,12 \times 10^{-8}$	
Mars	14,1	50,9	-36,8	$-1,37 \times 10^{-8}$	Phase II : Flux d'eau évaporé = $-1,37 \times 10^{-8}$ m/s
Avril	64,3	80,9	-16,6	$-6,40 \times 10^{-9}$	Phase III : Succion = 20 MPa
Mai	9,1	120,6	-115,5	$-4,31 \times 10^{-8}$	
Juin	56,2	104,7	-48,5	$-1,87 \times 10^{-8}$	
Juillet	39,4	143,2	-103,8	$-3,88 \times 10^{-8}$	
Août	11,8	118,7	-106,9	$-3,99 \times 10^{-8}$	
Septembre	30,0	67,4	-37,4	$-1,44 \times 10^{-8}$	
Octobre	28,6	40,0	-11,4	$-4,26 \times 10^{-9}$	

P : précipitation ; ETP : évapotranspiration potentielle ; P - ETP : flux d'eau injecté ou évaporé.

65 cm, dans les cas avec (a) et sans (s) géomembrane. L'allure générale de l'évolution du degré de saturation est logiquement semblable à celle de la succion.

Dans le cas sans géomembrane, la phase d'humidification (phase I) entraîne une augmentation rapide des valeurs du degré de saturation qui décroissent progressivement avec le temps pendant les phases de séchage (phases II et III). Comme le plancher du bâtiment et la semelle en béton constituent des écrans contre l'écoulement, le sol sous-jacent s'humidifie moins vite que les autres points situés au même niveau mais à l'extérieur de la fondation. À la fin de la phase d'humidification, les valeurs de la succion sous le plancher (point A) sont supérieures à celles des autres points situés à l'extérieur de la fondation, le transfert hydrique vers le point A continue alors pendant les phases de séchage.

La mise en place de la géomembrane limite de manière considérable le phénomène d'humidification-séchage, plus particulièrement aux points A et C. Contrairement à ce que l'on a observé dans le cas sans géomembrane, le sol sous le centre de la fondation (point B) s'humidifie plus vite que le point C situé sous la géomembrane. Le transfert de l'eau pour le point B continue pendant le début des phases de séchage et ce jusqu'à 180 jours. Le comportement hydrique du point D, à l'extérieur de la géomembrane, est similaire dans les deux cas, avec et sans géomembrane.

4.6.2

Déplacements verticaux

La figure 5a présente la comparaison de l'évolution temporelle du déplacement vertical qui est considérablement influencée par la présence de la géomembrane. Le chargement mécanique a engendré un déplacement maximum de 35 mm pour le point B situé sous la semelle. Pendant la phase d'humidification, le sol gonfle progressivement avec le temps. À la fin de cette phase, la mise en place de la géomembrane réduit les gonflements du point D de 72,6 mm à 54 mm, du point C de 51 mm à 27,4 mm et du point B de 45 mm à 8,8 mm. Pour le point situé sous le bâtiment (point A), au lieu de gonflement de 17 mm, la présence de la géomembrane induit un tassement de 22,7 mm. Pour ce même point, le début de la phase d'humidification comporte une période où le sol tasse avant de gonfler.

Ce qui est dû à un gonflement plus important du sol se situant côté extérieur (droite) de la semelle qui engendre une rotation de la fondation rigide. Les phases de séchage produisent, un tassement à l'extrémité du modèle (point D) de 11 mm dans le cas sans géomembrane et de 6 mm dans le cas avec géomembrane et un tassement au point C de l'ordre de 6 mm dans les deux cas et une stabilisation du gonflement pour les autres points (points A et B). Ces résultats montrent que l'existence de la géomembrane diminue et retarde les variations de volume du massif de sol de manière importante.

4.6.3

Analyse des chemins de contraintes

La figure 6 montre les chemins de contrainte suivis au cours des phases de calcul dans le plan (p, s) pour le point B situé sous le centre de la fondation dans le cas du modèle *BExM*. La phase d'humidification provoque la plastification du sol, après 22 jours de précipitation dans le cas sans géomembrane, et après 88 jours de précipitation dans le cas avec géomembrane. En effet, cette phase d'humidification crée un dépassement de la courbe *SD* de sa position initiale SD_i vers sa position finale SD_f . Ce déplacement est couplé avec un mouvement de la courbe *LC* (LC_i vers LC_f) et de la courbe *SI* (SI_i vers SI_f). Les chemins de contrainte au cours des phases de séchage se développent donc dans la zone élastique. Ceci explique les faibles valeurs du tassement du sol pendant les phases de séchage pour le modèle *BExM* (Figure 5a).

4.6.4

Apport du modèle *BExM*

Afin de montrer l'apport du modèle utilisé (*BExM*), les mêmes calculs ont été effectués en supposant que le sol de la fondation est élastoplastique et représenté par le modèle *BBM* pour les sols non saturés (Fig. 5b). La comparaison de ces résultats montre que les déplacements en humidification et en retrait sont sous-estimés dans le cas du modèle *BBM* qui ne prend pas en compte le gonflement irréversible lors de l'humidification (i.e. surface de charge *SD*).

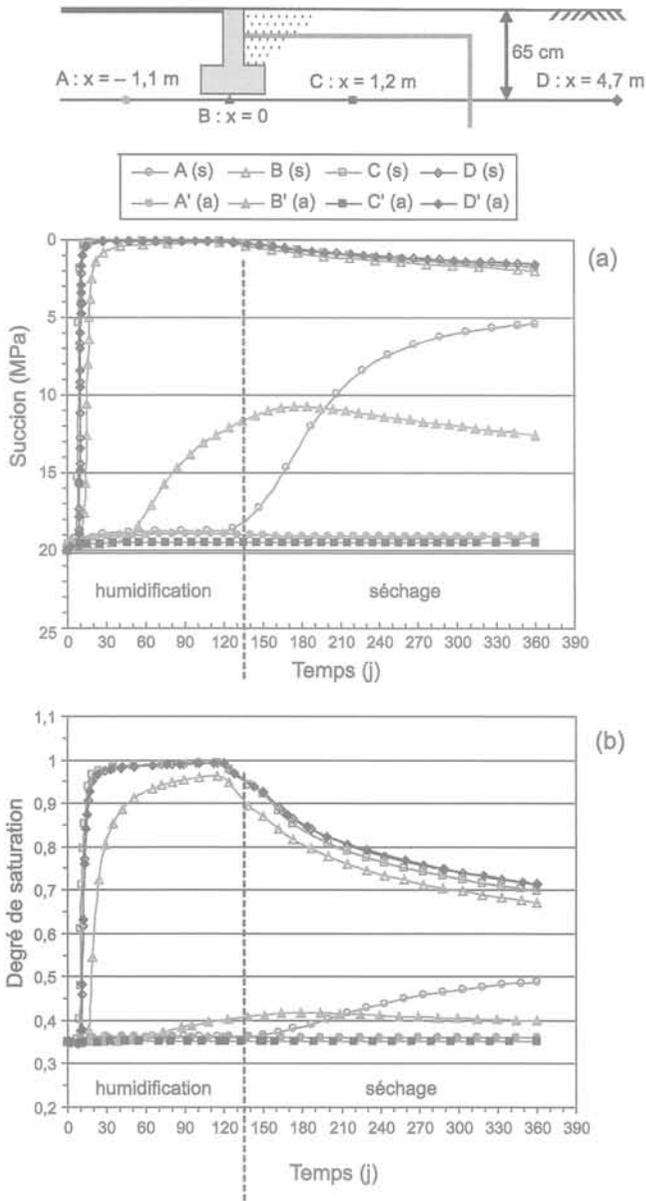


FIG. 4 Comparaison de l'évolution temporelle : a) de la suction ; et b) du degré de saturation, avec (a) et sans (s) géomembrane.
 a) Suction and (b) degree of saturation, versus time in the soil, with (a) and without (s) geomembrane protection.

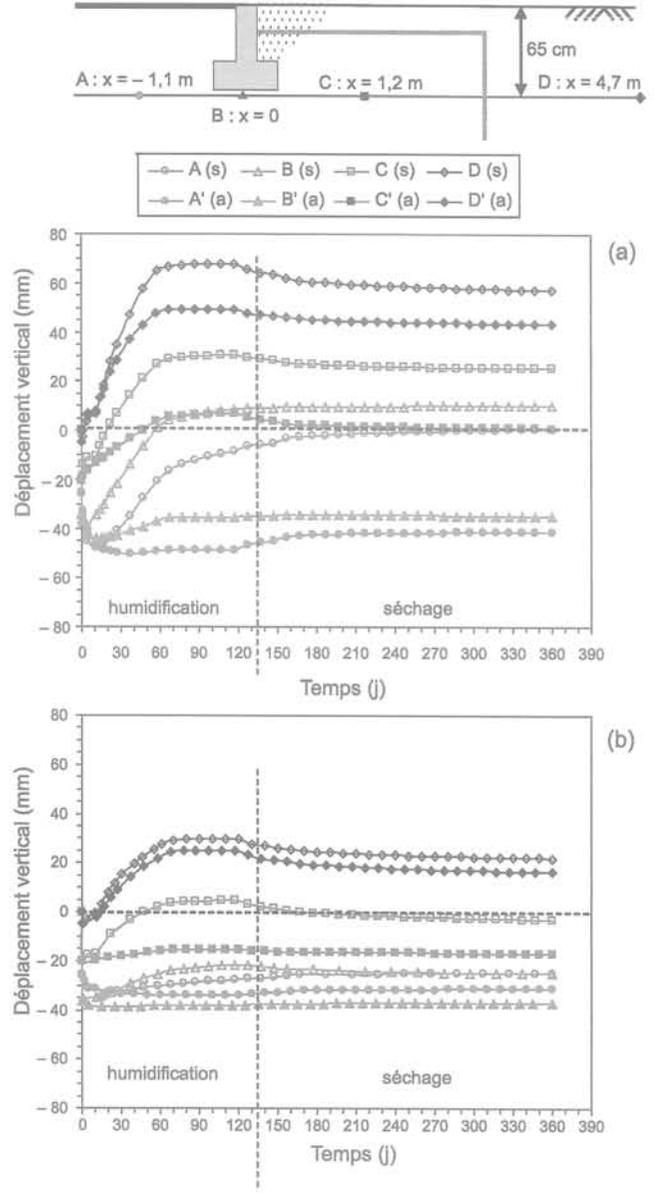


FIG. 5 Comparaison de l'évolution temporelle du déplacement vertical avec (a) et sans (s) géomembrane prédites par les : a) modèle BExM ; b) modèle BBM.
 Comparison of the vertical displacement with (a) and without (s) geomembrane protection predicted by the : a) BExM model; b) BBM model.

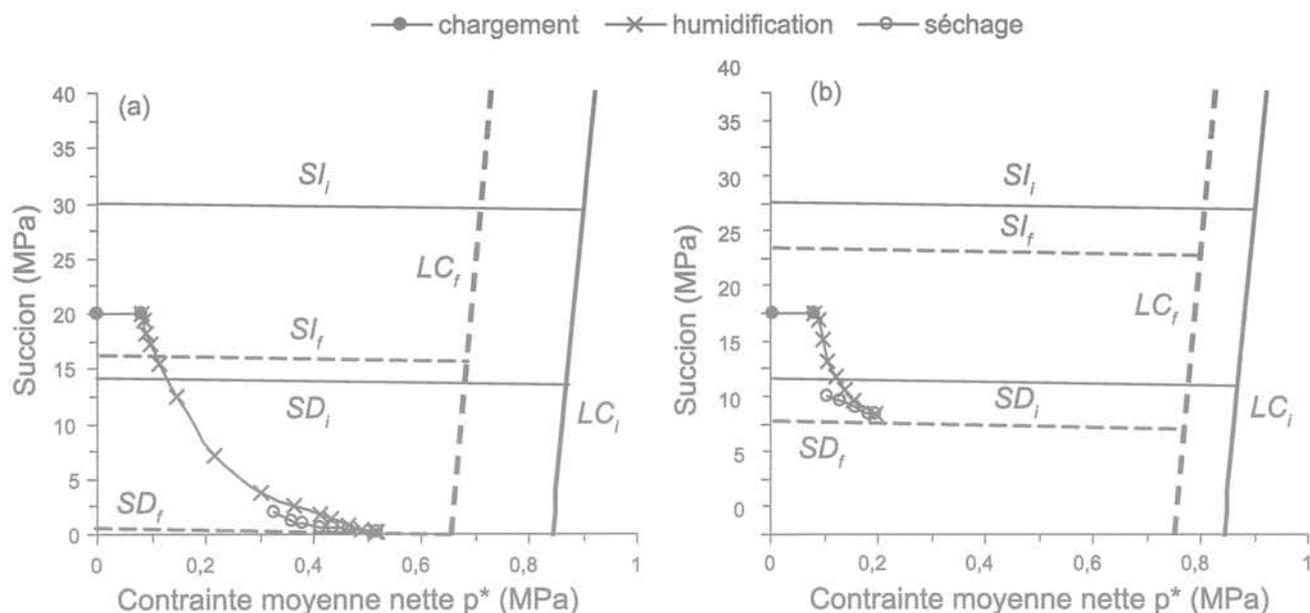


FIG. 6 Chemins de contrainte suivis par le centre de la fondation (point B) au cours des phases de calcul : a) sans géomembrane ; b) avec géomembrane.
Stress-paths on the soil under the centre of the foundation (point B): a) with geomembrane protection; b) without geomembrane protection.

5

Conclusion

Dans cet article, le modèle élastoplastique (*BExM*) a été présenté, il permet de décrire la plupart des phénomènes hydromécaniques qui ont été constatés expérimentalement dans le cas des sols gonflants non saturés.

Une application de ce modèle, implanté dans le *Code_Bright*, à la modélisation du problème de retrait-gonflement d'une couche d'argile gonflante chargée par une fondation superficielle a été présentée. Les résultats ont montré que le modèle est capable de décrire qualitativement les déplacements du massif de sol pendant les différentes sollicitations hydriques. Le chargement mécanique engendre un déplacement maximum sous le centre de la fondation. Le gonflement sous la base de la semelle dû uniquement à la précipitation est plus faible que celui des autres points situés au même niveau mais à l'extérieur de la semelle, car cette dernière constitue elle-même un écran contre l'écoulement dans le cas où les chemins préférentiels d'écoulement le long de la fondation ne sont pas pris en compte.

Les résultats d'une modélisation avec la prise en compte d'une géomembrane posée dans le sol, mon-

trant que cet écran limite le gonflement du massif de sol de manière importante et son utilisation pour retarder les transferts hydriques et les phénomènes de retrait-gonflement est valable.

La comparaison des déplacements verticaux prédits par les deux modèles *BExM* et *BBM* a montré la capacité du premier modèle à prendre en compte l'apparition des gonflements irréversibles lors de l'humidification du sol, qui n'étaient pas prise en compte dans le cadre du modèle *BBM*.

À ce stade, il serait intéressant de disposer des résultats des mesures *in situ* des déformations volumiques lors des cycles de séchage-humidification dans des sols gonflants, afin de valider les résultats numériques obtenus.

REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet de recherche national : « Analyse du Retrait-Gonflement et de ses Incidences sur les Constructions » (ARGIC) financé par l'Agence nationale de la recherche (ANR) – Réseau Génie Civil et Urbain (RGC&U). Les auteurs tiennent à remercier l'ensemble de partenaires de ce projet, tout particulièrement pour la coordination M. Marc Vincent, ingénieur de recherche au BRGM, unité Aménagement et Risques naturels.

- Alonso E.E., Gens A., Hight D.W. - General report. Special problem soils. *Proceedings of the 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Dublin, vol. 3, 1987, p. 1087-1146.
- Alonso E.E., Gens A., Josa A. - A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique*, vol. 40, n° 3, 1990, p. 405-430.
- Alonso E.E., Vaunat J., Gens A. - Modelling the mechanical behaviour of expansive clays. *Engineering Geology*, vol. 54, 1999, p. 173-183.
- Alonso E.E., Romero E., Hoffmann C., Garcia-Escudero E. 2001. Expansive bentonite/sand mixtures in cyclic controlled suction drying and wetting. *Proceedings of the 6th International Workshop on Key Issues in Waste Isolation Research*, Paris, École nationale des ponts et chaussées, 2001, p. 513-542.
- Baudet B., Stallebrass - A constitutive model for structured clays. *Géotechnique*, vol. 54, n° 4, 2004, p. 269-278.
- Beauchamp J. - L'eau et le sol. [En ligne : enregistré le 21 août 2006]: <http://www.oleiculteur.com/L'eau%20et%20le%20sol.htm>, 2006.
- Bordes J.-L. - *Géomembranes : utilisation en génie civil*. Techniques de l'ingénieur, traité construction, article C5430, 1995, 14 p.
- Brackley I.J.A. - Swell pressure and free swell in compacted clay. *Proceedings of the 3rd International Conference on Expansive Soils*, Haifa, vol. 1, 1973, p. 169-176.
- Burlion N., Bourgeois F., Shao J.F. - Effects of desiccation on mechanical behaviour of concrete. *Cements & Concrete Composites*, vol. 27, 2005, p. 367-379.
- Chen F.H. - *Foundations on expansive soils*. Amsterdam, Elsevier. Developments in Geotechnical Engineering, vol. 12, 1975, 280 p.
- Cui Y.J., Yahia-Aissa M., Delage P. - A model for the volume change behavior of heavily compacted swelling clays. *Engineering Geology*, vol. 64, 2002, p. 233-250.
- Cuisinier O. 2002. *Comportement hydromécanique des sols gonflants compactés*. Thèse de doctorat, INPL, Nancy, 176 p.
- Cuisinier O., Masroufi F. - Testing the hydromechanical behaviour of a compacted swelling soil. *ASTM, Geotechnical Testing Journal*, vol. 27, n° 6, 2004, p. 598-606.
- Derriche Z., Iguechtal L., Tas M. - Comportement des ouvrages dans les argiles expansives d'In-Aménas. *Revue française de géotechnique*, n° 89, 1999, p. 55-65.
- Dif A.E., Bluemel W.F. 1991. Expansive soils under cyclic drying and wetting. *Geotechnical Testing Journal*, vol. 14, n° 1, 1991, p. 96-102.
- Gallipoli D., Gens A., Sharma R., Vaunat J. - An elasto-plastic model for unsaturated soil incorporating the effects of suction and degree of saturation on mechanical behaviour. *Géotechnique*, vol. 53, n° 1, 2003, p. 123-135.
- Gens A., Alonso E.E. 1992. A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 29, 1992, p. 1013-1032.
- Hachichi A., Fleureau J.-M. - Caractérisation et stabilisation de quelques sols gonflants d'Algérie. *Revue française de géotechnique*, n° 86, 1999, p. 37-51.
- Justo J.L., Delgado A., Ruiz J. - The influence of stress-path in collapse-swelling of soils at the laboratory. *Proceedings of the 5th International Conference on Expansive Soils*, Institution of Engineers of Australia, Adelaide; vol. 1, 1984, p. 67-71.
- Karube D. & Kato S. - Yield functions of unsaturated soils. *Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol. 1, 1989, p. 615-618.
- Kohgo Y., Nakano M., Miyazaki T. - Elastoplastic constitutive modelling for unsaturated soils. *Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Balkema, 1991, p. 631-636.
- Lloret A., Villar M.V., Sánchez M., Gens A., Pintado X., Alonso E.E. - Mechanical behaviour of heavily compacted bentonite under high suction changes. *Géotechnique*, vol. 53, n° 1, 2003, p. 27-40.
- Mrad M. 2005. *Modélisation du comportement hydromécanique des sols gonflants non saturés*. Thèse de doctorat, INPL, Nancy, 244 p.
- Mrad M., Cuisinier O., Abdallah A., Masroufi F. - Modélisation du comportement hydromécanique des sols gonflants non saturés sous fortes succions. *Comptes rendus du XVI^e Congrès international de mécanique des sols et de la géotechnique*. Osaka, Japon, 2005, p. 551-554.
- Mrad M., Abdallah A., Masroufi F., Vaunat J. - Finite-Element implementation of BExM elastoplastic model for swelling unsaturated soils. *Proceedings of the 4th International Conference on Unsaturated Soils*, Arizona, USA, 2006.
- Mualem Y. - A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Res.*, vol. 12, 1976, p. 513-522.
- Olivella S., Gens A., Carrera J., Alonso E.E. - Numerical formulation for a simulator (Code_Bright) for the coupled analysis of saline media. *Engineering Computations*, vol. 13, n° 7, 1996, p. 87-112.
- Philipponat G. - Retrait-gonflement des argiles, proposition de méthodologie. *Revue française de géotechnique*, n° 57, 1991, p. 5-22.
- Pousada E. 1984. *Deformabilidad de arcillas expansivas bajo succión controlada*. Thèse de doctorat, Universidad Politécnica de Madrid 1984, Espagne, 1984.
- Robinet J. C., Pothier C., Jullien A., Plas F. 1998. Evaluation of a constitutive model for expansive and non expansive clays. *Proceedings of the 5th International Workshop on Key Issues in Waste Isolation Research*, Barcelona, Spain, 1998.
- Robinet J. C., Pakzad M., Jullien A., Plas F. 1999. A general modelling of expansive and non-expansive clays. *International Journal For Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 23, 1999, p. 1319-1335.
- Romero E. - *Characterization and thermo-hydro-mechanical behaviour of unsaturated boom clay: an experimental study*. PhD thesis, Technical University of Catalonia, Spain, 1999, 405 p.
- Roscoe K.H., Burland J.B. - On the generalized stress-strain behaviour of the wet clay. *Engineering Plasticity*, Heyman, J., Leckie, F.A. (Eds), Cambridge University Press, Cambridge, 1968, p. 535-609.
- Sloan S.W. - Substepping schemes for the numerical integration of elastoplastic stress-strain relations. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 24, 1987, p. 893-911.
- Vandangeon P. - Exemples de sinistres en région parisienne. *Revue française de géotechnique*, n° 58, 1992, p. 7-14.
- Vincent M., Bouchut J., Fleureau J.M., Masroufi F., Oppenheim E., Heck J.V., Ruaux N., Le Roy S., Dubus I., Surdyk N. - Étude des mécanismes de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux et de ses interactions avec le bâti. Rapport final du projet RGC&U, BRGM/RP-54862-FR, octobre, 2006.
- van Genuchten M.T.H. - A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society American Journal*, vol. 44, 1980, p. 892 - 898.
- Wheeler S.J., Sharma R.S., Buisson M.S.R. 2003. Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behaviour in unsaturated soils. *Géotechnique*, vol. 53, n°1, 2003, p. 41-54.

Apport de la physico-chimie à l'étude du retrait-gonflement d'une argile plastique compactée

**H. SOULI,
J.-M. FLEUREAU**

Laboratoire MSSMat,
CNRS UMR8579
et École centrale Paris
Grande Voie des Vignes
92295 Châtenay-Malabry cedex
Hanene.Souli@ecp.fr
Jean-Marie.Fleureau@ecp.fr

R. SOEMITRO

Jurusan Teknik Sipil, Institut
Teknologi Sepuluh Nopember
Kampus ITS-Sukolilo
Surabaya 60111 (Indonésie)
soemitro@sby.dnet.net.id

Résumé

L'article présente le comportement d'une argile très plastique ($w_L = 170\%$, $I_p = 110\%$), compactée à l'optimum Proctor normal, sur les chemins de drainage et d'humidification. La pression de gonflement a été mesurée par deux méthodes, avec des valeurs de 540 et 880 kPa. Les essais de drainage-humidification effectués sur des échantillons normalement consolidés, surconsolidés et compactés mettent en évidence l'effet de l'état initial. Sur le chemin de drainage, l'échantillon compacté présente un comportement surconsolidé tandis que, sur le chemin d'humidification, son gonflement est moins important que celui des matériaux normalement consolidés ou surconsolidés séchés. Pour comprendre ces différences, des mesures physico-chimiques ont été effectuées afin d'étudier le rôle des différentes catégories de pores ainsi que l'évolution de l'organisation et de la texture du matériau lors du gonflement. La porosimétrie au mercure et l'analyse thermique mettent en évidence le rôle prépondérant des pores interagrégats dans le processus de gonflement alors que la diffraction des rayons X indique que le nombre de couches d'eau adsorbées change relativement peu. La comparaison des formes des réflexions (001) permet en outre d'avoir une idée qualitative sur l'orientation des particules. Ces différentes analyses constituent un apport très important pour expliquer les observations macroscopiques.

Mots-clés : retrait, gonflement, pression de gonflement, compactage Proctor, texture, porosité, physico-chimie.

Contribution of physicochemistry to the study of the swelling-shrinkage behaviour of a compacted plastic clay

Abstract

The paper presents a study of the hydromechanical behaviour of a very plastic ($w_L = 170\%$, $I_p = 110\%$) clay sample, compacted to the Proctor optimum, on drying-wetting paths. The swelling pressure value derived from two methods varies from 540 kPa to 880 kPa. Drying and wetting tests carried out on normally consolidated, overconsolidated and compacted clay samples highlight the influence of the initial state. On drying path, the compacted sample exhibits an overconsolidated behaviour whereas, on wetting path, its swelling is smaller than that of normally consolidated and overconsolidated dried specimens. To understand these differences, physicochemical tests were carried out to study the contribution of the different classes of pores to the swelling process, as well as the changes in the organization and fabric of the sample. Mercury intrusion porosimetry and thermal analysis highlight the predominant part of the inter-aggregate pores in the swelling process. X-ray diffraction shows that the number of layers of adsorbed water does not change very much during wetting. Furthermore, the comparison of the shapes of the (001) reflections gives a qualitative idea about particle orientation. These different analyses bring out an important contribution to explain the macroscopic observations.

Key words: Shrinkage, swelling, swelling pressure, Proctor compaction, fabric, porosity, physicochemistry.

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 30 avril 2008.

Introduction

Les argiles suscitent beaucoup d'intérêt dans différentes applications. Leurs diverses propriétés, notamment leur capacité de gonflement et de rétention, font d'elles des matériaux intéressants dans de nombreux domaines : fluides de forage pour le génie civil et le génie pétrolier, additifs pour les industries pharmaceutique et cosmétique, barrières étanches pour le stockage des déchets, etc. En revanche, ces mêmes caractéristiques font que les argiles et les sols argileux sont redoutés en tant que matériaux de fondation des bâtiments ou matériaux de remblais. En particulier, la construction des ouvrages sur des sols argileux nécessite de caractériser le potentiel de retrait-gonflement de ces sols. Ainsi, un sol argileux très plastique humidifié sous de faibles contraintes pourra gonfler fortement et son séchage se traduira par une importante diminution de volume. Plusieurs études se sont intéressées aux facteurs influençant les changements volumiques des argiles : Chen (1988) relie le gonflement des argiles à leur limite de liquidité, Komine et Ogata (1994) et Suratman (1995) montrent que le taux de gonflement varie linéairement en fonction de la densité sèche initiale tandis que la pression de gonflement décrit une loi exponentielle en fonction de la densité sèche initiale. Hachichi et Fleureau (1999) trouvent que le gonflement augmente quand la teneur en eau initiale du sol diminue, mais seulement lorsque celle-ci est supérieure à la limite de retrait. Ils montrent en outre que la pression de gonflement suit une loi linéaire en fonction de la teneur en eau. Plusieurs études réalisées dans le domaine des sols non saturés (Biarez *et al.*, 1993, 1994 ; Fleureau *et al.*, 1995 ; Modaresi *et al.*, 1996) ont permis de développer des modèles globaux de comportement basés sur le concept de contraintes effectives. Dans une autre approche, Fleureau *et al.* (1993) ont étudié les courbes de drainage-humidification de sols de différentes minéralogies pris dans divers états de consolidation en essayant de relier certaines caractéristiques des sols comme la limite de retrait ou la pression de désaturation à la limite de liquidité. Les auteurs ont aussi montré que les courbes de drainage étaient sensibles à l'état initial du sol et au mode de préparation des échantillons.

L'objectif de l'article est de présenter différents aspects du retrait-gonflement d'une argile très plastique compactée à l'optimum Proctor normal (OPN), aux échelles macroscopique et microscopique. Dans la première partie, la pression de gonflement de l'argile est mesurée par les méthodes d'humidification sous différentes contraintes et de gonflement libre-rechargement, sont étudiées les variations de volume et de saturation de l'échantillon lors d'un cycle de drainage-humidification. Cette première partie met en évidence une différence de comportement entre le sol compacté et les sols normalement consolidés et surconsolidés, pris comme références, sur le chemin d'humidification. Pour expliquer ce résultat, différentes techniques physico-chimiques ont été mises en œuvre dans la seconde partie de l'étude, en vue d'analyser les phénomènes à une échelle plus petite. Ces techniques, appliquées à l'étude du gonflement de l'échantillon d'argile compacté à l'OPN, mettent en évidence les transformations subies par le matériau du point de vue de la porosité et de la texture. Ainsi, la diffraction des rayons X donne accès aux distances interfoliaires et à l'eau adsorbée,

tandis que la comparaison des formes des réflexions (001) permet d'avoir une idée qualitative sur l'orientation des particules et l'anisotropie du matériau. La porosimétrie au mercure et l'analyse thermique permettent d'étudier la contribution des différentes classes de macropores au processus de gonflement sous l'effet du réarrangement des particules.

Méthodes expérimentales

La mesure des limites d'Atterberg et les essais de sédimentométrie sont réalisés selon les procédures des normes P 94-051 et P 94-057, respectivement. Les essais de gonflement sous contrainte et de compression sont réalisés en compactant les échantillons à l'optimum Proctor normal. La teneur en eau optimale et la densité maximale de l'OPN ont été déterminées en utilisant la méthode de compactage normalisée par chocs décrite dans la norme P 94-093. Le compactage des échantillons humides est réalisé par compression dans des cellules œdométriques de 40 mm de diamètre sous une presse à la vitesse de 1 mm/min, jusqu'à obtenir la densité sèche fixée. A la fin du compactage les échantillons ont une hauteur de 20 mm. La pression de gonflement est mesurée dans les cellules œdométriques en utilisant deux méthodes, la première par humidification sous différentes contraintes imposées et la seconde par humidification à contrainte nulle suivie d'un chargement. Dans la première méthode, plusieurs échantillons compactés à l'OPN sont humidifiés par mise en contact avec un réservoir d'eau ($u_c = 0$), sous des contraintes mécaniques verticales variant de 10 à 1000 kPa, selon la procédure de la norme P 94-091. Dans la deuxième méthode, l'échantillon, initialement compacté à l'OPN, est humidifié à pression capillaire nulle sous le poids du piston (correspondant à une contrainte de 10 kPa, désigné par la suite par « gonflement libre ») ; après stabilisation du gonflement, un chargement par paliers successifs de 10 à 1 000 kPa est appliqué à l'échantillon. Les essais sont suivis grâce à des capteurs de déplacement jusqu'à la stabilisation qui est atteinte quand le capteur de déplacement présente un taux de déplacement inférieur à 0,01 mm/jour.

Les essais de drainage-humidification à pression capillaire imposée u_c et contrainte nulle ($\sigma = 0$) sont réalisés sur des échantillons préparés dans différents états initiaux : (a) sous forme de pâte à une teneur en eau initiale de 1,5 w_L , (b) consolidés sous une contrainte de 100 kPa dans un œdomètre et (c) compactés à l'OPN. Les pressions capillaires sont imposées en utilisant des plaques tensiométriques pour les pressions capillaires variant de 0,1 kPa à 30 kPa, des solutions osmotiques pour les pressions capillaires variant de 0,1 à 1,5 MPa et des solutions salines pour les pressions capillaires supérieures à 1,5 MPa (Biarez *et al.*, 1988). Le principe des plaques tensiométriques est de mettre les échantillons en contact avec un réservoir d'eau maintenu en dépression par une colonne d'eau. Cet essai nécessite d'utiliser des membranes de séparation semi-perméables qui permettent le passage de l'eau tout en empêchant le passage de l'air, ce qui est réalisé en pratique en utilisant un milieu poreux de faible porosité (verre fritté). En ce qui concerne l'osmose, les pressions capillaires sont imposées en utilisant des solutions de polyéthylène glycol (PEG de poids moléculaire 20 000). Dans cette méthode, les échantillons sont mis au contact de

la solution de PEG à travers une membrane de dialyse (diamètre des pores inférieur à 50 nm) qui laisse passer l'eau et empêche le passage des molécules de PEG. L'eau est échangée entre la solution et le sol jusqu'à ce qu'il s'établisse un équilibre pour lequel la pression capillaire de l'eau dans l'échantillon correspond à la pression osmotique imposée par la concentration en PEG de la solution (Indarto, 1991). Les solutions salines, enfin, permettent d'imposer des pressions capillaires supérieures à 1,5 MPa. Le principe de cette méthode est d'utiliser des solutions salines qui, selon le sel utilisé et sa concentration, permettent d'imposer une valeur donnée d'humidité relative dans le récipient fermé où est placé l'échantillon. Il s'établit alors un équilibre entre la pression capillaire dans le sol et la pression de vapeur du liquide (loi de Kelvin).

Les diffractogrammes de rayons X sont réalisés à l'air ambiant sur des échantillons lamellaires à faces parallèles coupés dans la direction parallèle au sens de la contrainte appliquée. Les diffractogrammes sont enregistrés dans un intervalle d'angle qui varie de 2,8 à 70°, avec un pas de 0,02° par seconde, ce qui correspond à une durée d'essai de 1 h. Les diffractogrammes sont obtenus au moyen d'un appareil Siemens de type D5000 comportant un générateur de rayons X alimenté sous une tension de 35 kV et une intensité de 30 mA, muni d'un tube de rayons X dont la cathode est en cuivre ($\lambda_{CuK\alpha} = 0,15418$ nm). En ce qui concerne les courbes d'analyse thermogravimétrique (ATG), les essais sont réalisés avec un appareil de type Setaram TGA 92 dont le gaz vecteur est l'argon et la vitesse de chauffage est de 5°C/min, dans une plage de température de 21°C à 1000°C. La masse des échantillons utilisés est d'environ 50 mg. Les mesures de porosimétrie au mercure sont effectuées sur des échantillons préalablement lyophilisés, selon la technique décrite par Tessier et Berrier (1979), de façon à préserver leur texture lors de la dessiccation. La porosimétrie au mercure est réalisée au moyen d'un porosimètre Micromeritics Autopore IV grâce auquel on peut appliquer des pressions variant de 0,0035 à 210 MPa, ce qui permet d'étudier des tailles de pores variant de 350 μm à 0,0036 μm . La taille des pores est déduite de la relation de Washburn (1921):

$$P = \frac{2\gamma \cos(\theta)}{r}$$

où P est la pression d'injection du mercure, γ , la tension superficielle du mercure (484 mN/m), θ , l'angle de contact mercure/solide/air (130°) et r, le rayon d'entrée des pores.

3

Identification géotechnique et minéralogique des échantillons

Le matériau utilisé provient de l'île volcanique de Kimolos dans la mer Égée (Grèce). D'après Christidis et Scott (1997), les couches d'argile dateraient du Pléistocène (entre le Pliocène et l'Holocène). Cet échantillon, désigné ci-après par « argile grecque », a été commercialisé par la société Sobrep. Du point de vue minéralogique, le diffractogramme de rayons X présente une première réflexion à 1,5 nm caractéristique d'une montmorillonite calcique (Fig. 1). La bande (060) à 0,149 nm est révélatrice du caractère dioctaédrique de l'argile.

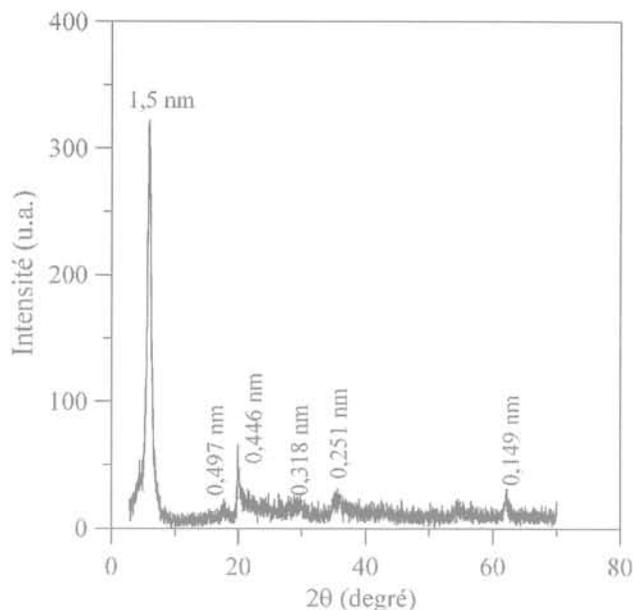


FIG. 1 Diffractogramme de rayons X de l'argile grecque en poudre.
X-ray diffractogram of greek clay powder.

Les propriétés géotechniques de l'échantillon d'argile sont présentées dans le Tableau I (Fleureau *et al.*, 1992). Les résultats de sédimentométrie montrent que le matériau a un pourcentage de grains inférieurs à 2 μm de 40 %. Les limites de liquidité et de plasticité de cette argile sont respectivement égales à 170 et 60 %. Ces données, reportées dans les abaques de Dakshinamurphy et Raman (1973), Chen (1988), Seed *et al.* (1962), Williams et Donaldson (1980), Building Research Establishment (1980) montrent que l'argile grecque est une argile très plastique à très fort potentiel de gonflement et de retrait (Fig. 2). A l'OPN, la masse volumique sèche, la teneur en eau et l'indice des vides sont respectivement de 1,15 Mg/m³, 40% et 1,45. Ces valeurs sont conformes à celles déduites des corrélations avec la limite de liquidité de l'argile (Fleureau *et al.*, 2002).

TABLEAU II Caractéristiques géotechniques de l'argile grecque.
Geotechnical properties of the greek clay.

Granulométrie			Plasticité			Compactage Proctor normal (OPN)	
< 80 μm (%)	< 2 μm (%)	d ₅₀ (μm)	w _l (%)	w _p (%)	I _p (%)	w (%)	γ_d (kN/m ³)
100	40	4	170	60	110	40	11

4

Pression de gonflement des échantillons compactés à l'OPN

Les mesures de la pression de gonflement sous charge constante et par gonflement libre suivi de rechargement sont présentées sur la figure 3. Les valeurs obtenues sont de 540 kPa pour la première méthode et de 880 kPa pour la seconde. Cet écart est en accord avec les résultats trouvés par Guiras-Skandaji (1996) qui a montré que l'essai de gonflement libre-rechargement conduisait à une valeur de pression de gonflement plus importante que l'essai à charge

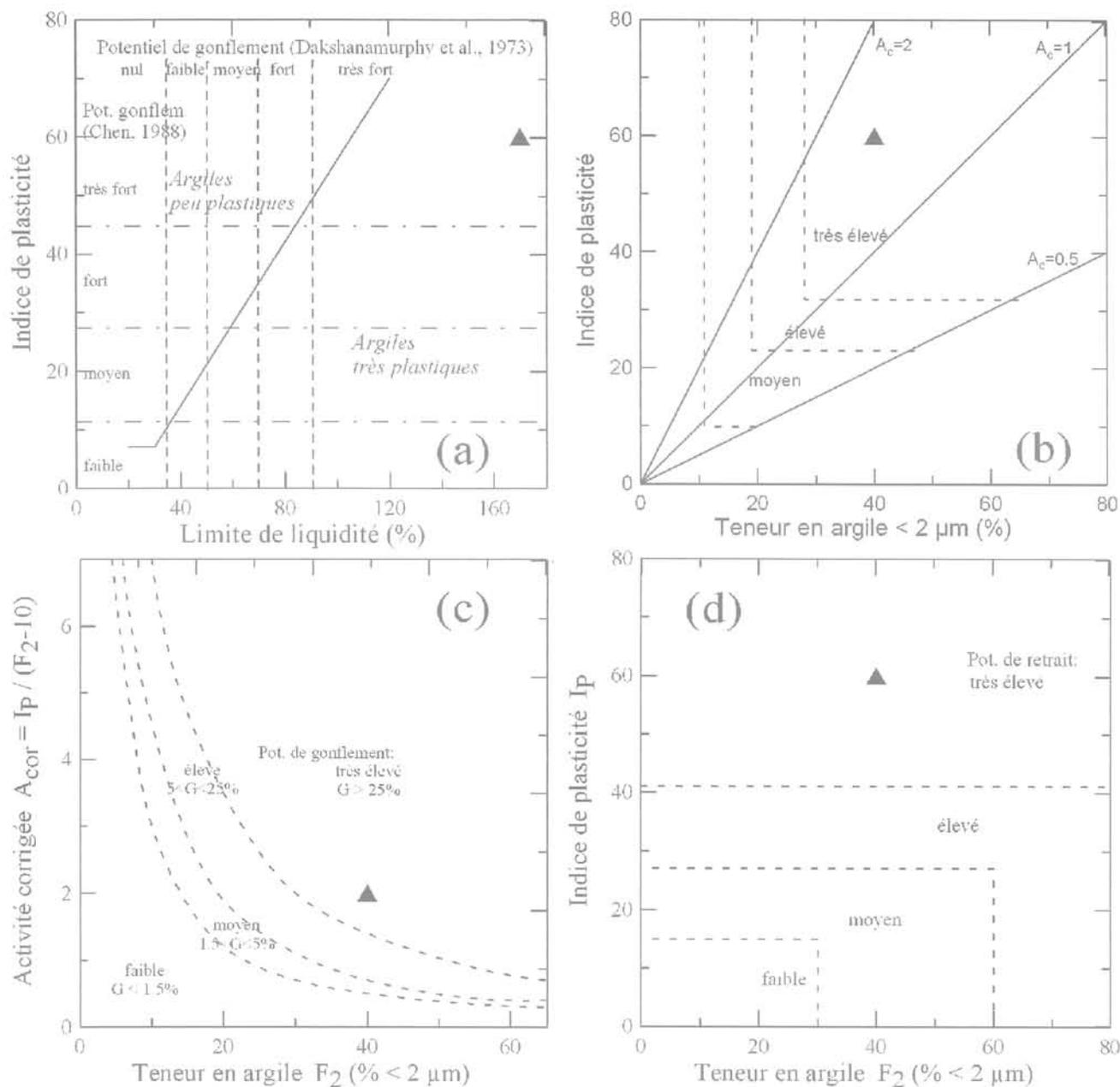


FIG. 2 Classification du potentiel de gonflement ou de retrait de l'argile grecque en fonction des paramètres d'identification (a) Dakshanamurphy et Raman, 1973 et Chen, 1988 ; (b) Williams et Donaldson, 1980 ; (c) Seed et al., 1962 ; (d) Building Research Establishment, 1980.
Classification of the swelling or shrinkage potential of the greek clay as a function of the identification parameters.

constante. Cette différence est évidemment liée aux déformations plastiques subies par le sol lors de la phase de gonflement libre qui entraînent une déstructuration plus ou moins forte de celui-ci. Souli (2006) a montré qu'au cours du gonflement libre, les particules tendent à s'orienter parallèlement les unes aux autres (cf. § 6.1), phénomène qui s'accroît lors du chargement du matériau quasi-saturé. En revanche, lors de l'humidification d'un sol à volume constant, celui-ci tend à conserver la même texture que celle qu'il avait dans son état initial compacté, c'est-à-dire un arrangement plus isotrope des particules. Par conséquent, dans le premier cas, les forces de répulsion de double-couche seront plus élevées que dans le second cas, ce qui se traduira par une pression de gonflement plus forte. Pour la mesure sous charge constante, les conditions de déformation sont intermédiaires entre les deux

cas précédents, surtout au voisinage de la pression de gonflement, ce qui explique la valeur mesurée de 540 kPa par rapport aux 880 kPa obtenus par gonflement-rechargement. Dans les essais de compression, il est utile de tracer la droite « normalement consolidée » (NC) qui représente le comportement d'un matériau initialement peu dense : il s'agit donc d'une référence qui indique la compressibilité maximum que peut avoir le matériau saturé. La pente C_c de la droite normalement consolidée est une caractéristique intrinsèque du sol, reliée par exemple aux limites d'Atterberg. Biaz et Favre (1975) ont montré qu'on pouvait la définir, pour un sol saturé, à partir des points suivants :

$$w = w_L \text{ soit } e = G_s w_L \text{ pour } \sigma = 7 \text{ kPa ;}$$

$$w = w_p \text{ soit } e = G_s w_p \text{ pour } \sigma = 1000 \text{ kPa ;}$$

où G_s est la densité des grains solides, w_L et w_p les limites de liquidité et de plasticité, respectivement.

On constate sur la figure 3 que, dans le cas de l'argile grecque, la contrainte appliquée à la fin de l'essai de compression n'est pas suffisante pour que le matériau rejoigne le comportement normalement consolidé, il reste dans un état légèrement surconsolidé.

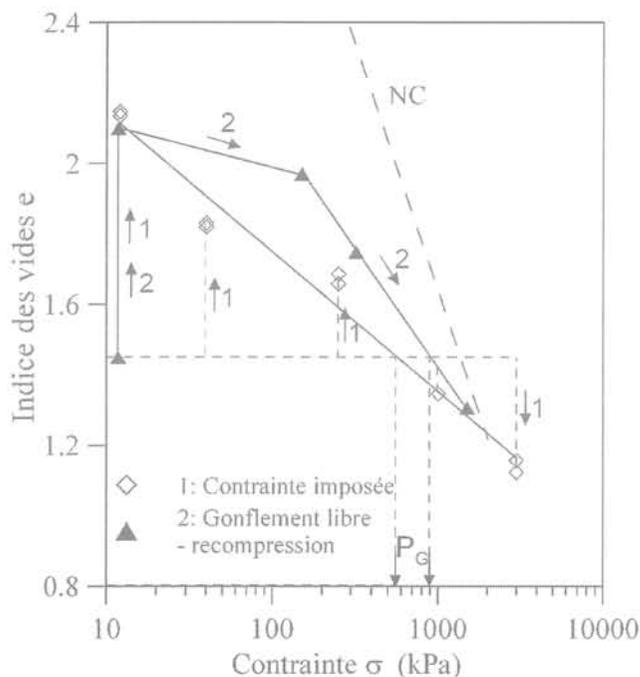


FIG. 3 Mesure de la pression de gonflement de l'argile grecque compactée à l'optimum Proctor normal (1) par humidification sous charge constante et (2) par gonflement libre-recompression ; NC : Droite « normalement consolidée ».
Measurement of the swelling pressure of the greek clay compacted to Proctor optimum derived from the (1) wetting under constant stress and (2) free swell-recompression methods; NC: 'normally consolidated' line.

5

Chemins de drainage-humidification

5.1

Échantillon normalement consolidé

L'état normalement consolidé est utilisé dans la présente étude comme référence pour comparer le comportement des échantillons compactés et surconsolidés. La figure 4 présente le premier cycle de drainage-humidification réalisé sur l'argile grecque sous forme de pâte à une teneur en eau égale à une fois et demie la limite de liquidité. Les chemins sont représentés dans les plans $[u_c, e]$, $[w, e]$ et $[u_c, S_r]$, où u_c représente la pression capillaire, e l'indice des vides, w la teneur en eau et S_r le degré de saturation.

Dans le plan $[u_c, e]$, l'indice des vides initial de la pâte correspond au point A, le chemin de drainage (augmentation de u_c) correspond à la branche de courbe AC. Cette partie de la courbe est elle-même divisée en deux parties, la première notée AB et la seconde BC. La partie AB met en évidence une diminution impor-

tante de l'indice des vides alors que la courbe $[u_c, S_r]$, montre que, pour cette gamme de pressions capillaires, l'échantillon reste saturé. A partir du point B, une faible variation de l'indice des vides est observée, qui correspond à une diminution importante du degré de saturation comme le montrent les courbes $[u_c, S_r]$ et $[w, S_r]$. En d'autres termes, lors du drainage, l'échantillon présente une première phase dans laquelle il se déforme et se réorganise de façon importante sans se désaturer, puis une seconde phase où il se désature fortement avec une faible déformation. La branche de courbe AB correspond à un comportement normalement consolidé du sol saturé ou quasi-saturé, ce qui signifie qu'elle peut être approchée par les corrélations en fonction de la limite de liquidité présentées dans la section 4 (Fleureau et al., 1993). Les lignes normalement consolidées déduites des corrélations pour les différentes valeurs de w_L ont été tracées sur la figure 4 et l'on constate un bon accord entre la courbe de l'argile grecque et la ligne correspondant à sa limite de liquidité. La variation de l'indice des vides en fonction de la pression capillaire est analogue à la courbe de compressibilité du sol, mais diffère de celle-ci par la présence d'un palier représenté par la branche BC. L'existence de ce palier permet de définir une valeur caractéristique de la pression capillaire qui marque la transition entre deux types de comportement très différents : un comportement saturé ou quasi-saturé « classique » ($S_r > 80\%$ environ), dans lequel les concepts des sols saturés restent largement applicables, et un comportement non saturé sensiblement différent du précédent. Dans le cas de cette argile, la pression capillaire seuil est égale à 1 000 kPa. Fleureau et al. (1992) ont montré que cette valeur dépendait de la minéralogie de l'échantillon et qu'elle était importante dans le cas des smectites. Pratiquement, cette transition correspond à la limite de retrait, qui est estimée à 33 % en utilisant la courbe $[w, e]$.

La courbe d'humidification (branche CE) est elle-même divisée en deux parties, notées CD et DE. Les branches BC et CD sont pratiquement superposées. Comme la branche BC, la branche CD est caractérisée par une variation importante du degré de saturation, alors que la variation de l'indice des vides est très faible. Dans ce domaine de pression, on peut imaginer qu'il existe des ménisques d'eau entre les particules ou groupes de particules, qui se traduisent par des forces d'attraction très importantes et contribuent à l'augmentation de la rigidité et de la résistance du matériau mais sans provoquer de réorganisation puisque les forces intergranulaires sont peu inclinées par rapport aux plans de contact entre les grains (Biarez et al., 1993). On remarque que sur les branches de courbes AB et DE, les déformations sont fortement irréversibles. Sur cette partie de la courbe le sol est quasi saturé et l'échantillon présente un comportement surconsolidé.

5.2

Échantillon compacté à l'OPN

La Figure 5 présente le chemin de drainage-humidification du sol compacté à l'optimum Proctor normal. Dans ce cas, l'échantillon compacté possède une pression capillaire initiale qui augmente avec la limite de liquidité du sol et qui, pour l'argile grecque, est de l'ordre de 2 à 3 MPa (représentée par la ligne en tirets épais sur la figure 5). Des corrélations ont également été établies entre ce paramètre et toutes les caractéristiques

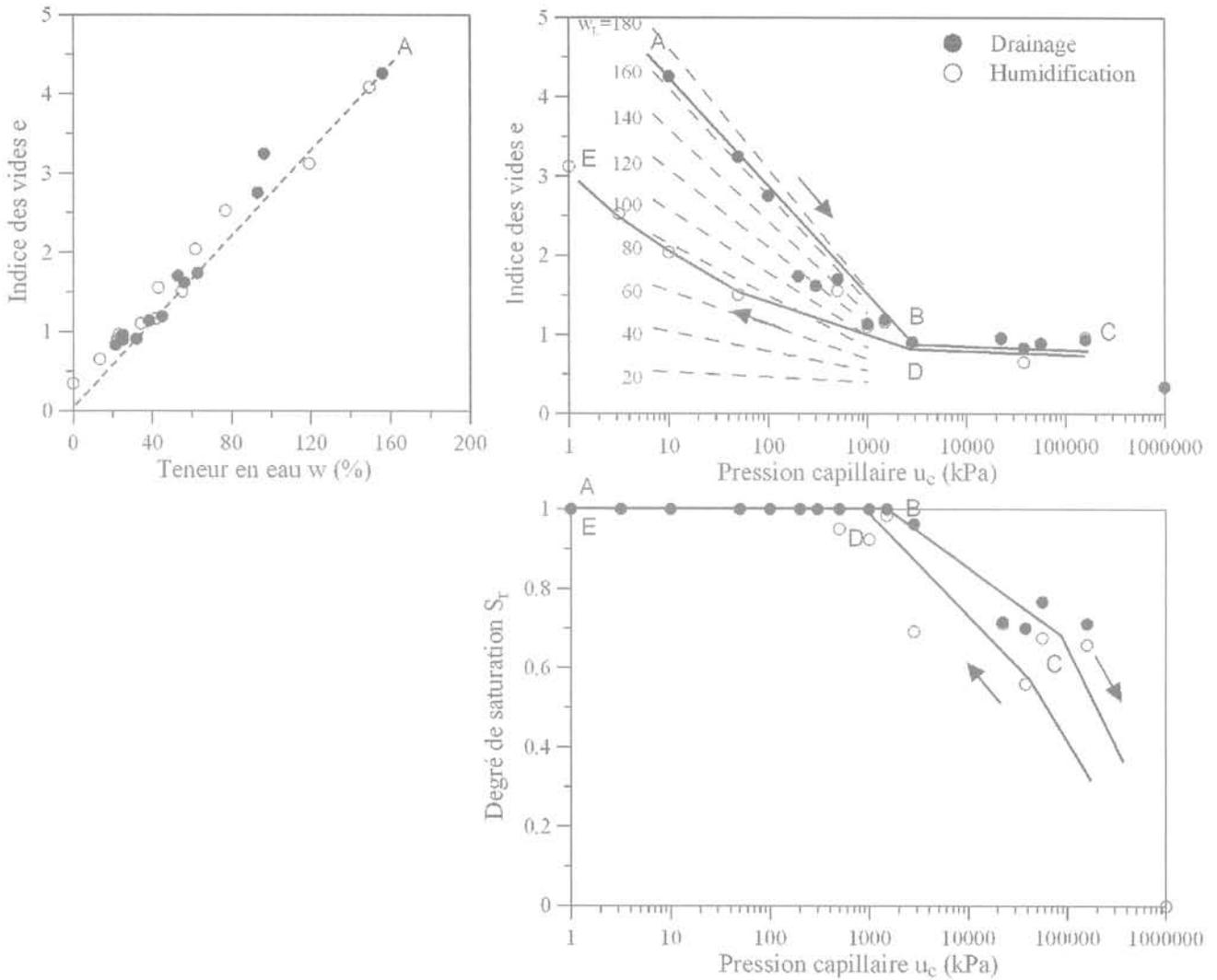


FIG. 4 Courbe de drainage humidification de l'argile grecque sous forme de pâte ($w_i = 1,5 w_L$) et comparaison avec le chemin normalement consolidé déduit des corrélations avec la limite de liquidité.
Drying-wetting curve of the greek clay prepared as a slurry ($w_i = 1,5 w_L$) and comparison with the normally consolidated path derived from the correlations with the liquid limit.

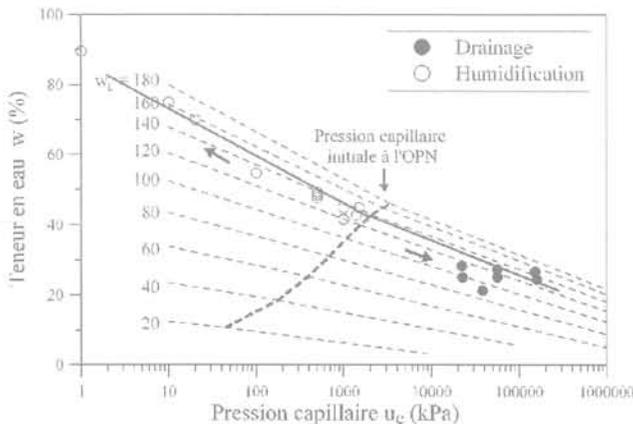


FIG. 5 Chemins de drainage et d'humidification de l'échantillon compacté à l'optimum Proctor normal et comparaison avec les corrélations déduites de la limite de liquidité.
Drying and wetting paths of the specimen compacted to the Proctor optimum and comparison with the correlations with the liquid limit.

des chemins de drainage-humidification : indice des vides, teneur en eau et pression capillaire à l'OPN, pentes des chemins de drainage et d'humidification depuis l'OPN (Fleureau *et al.*, 2002, 2003). Ces corrélations sont reportées sur la figure 5 pour les différentes valeurs de w_L . Là encore, on constate un bon accord entre les points expérimentaux de l'argile grecque et la ligne correspondant à $w_L = 170\%$. D'une façon plus générale, les corrélations permettent de donner une première estimation des chemins de drainage et d'humidification des sols compactés.

5.3

Comparaison des chemins de drainage et d'humidification du sol compacté et des sols normalement consolidés et surconsolidés

La figure 6 montre l'effet de l'état initial sur le chemin de drainage. Dans ce but, les échantillons ont été préparés dans trois états initiaux : (a) sous forme de pâte à une teneur en eau initiale de 1,5 fois la limite de liquidité, (b) consolidés sur chemin œdométrique

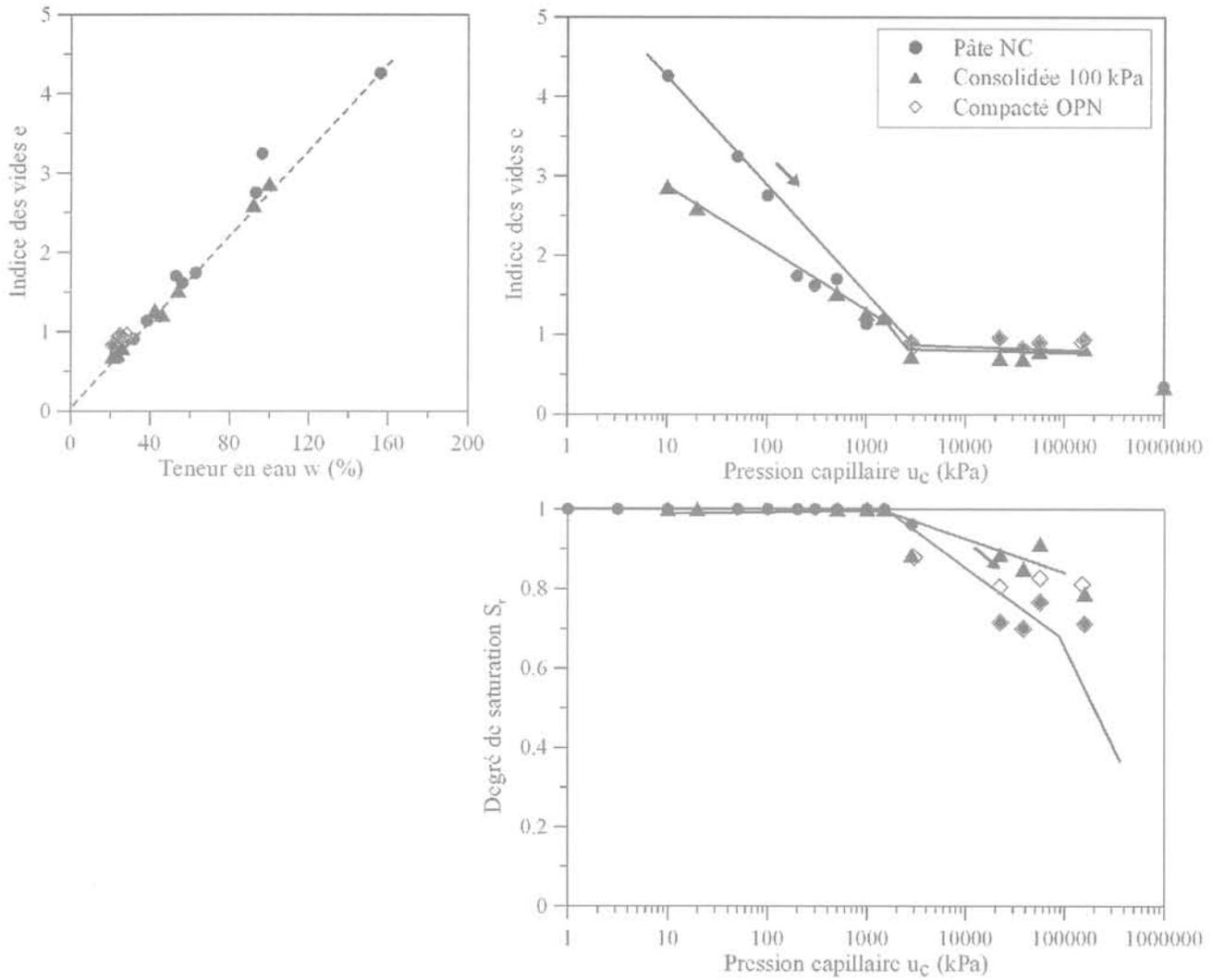


FIG. 6 Effet de l'état initial sur les courbes de drainage.
Effect of the initial state on the drying curves.

sous 100 kPa de contrainte verticale et (c) compactés à l'OPN. La pâte consolidée à 100 kPa présente le comportement d'un sol surconsolidé. Son chemin de drainage rejoint le chemin normalement consolidé dans le domaine saturé et présente le même palier et la même limite de retrait. En ce qui concerne l'échantillon compacté à l'OPN, son chemin de drainage rejoint la courbe normalement consolidée dans le domaine non saturé mais on ne note pas de différence appréciable entre le palier de retrait du sol compacté et celui de l'argile normalement consolidée. On peut donc dire en première approximation que le sol compacté à l'OPN se comporte de façon macroscopique comme un sol surconsolidé.

L'effet de l'état initial sur les chemins d'humidification des mêmes échantillons est présenté sur la figure 7. Les résultats montrent que les trois matériaux présentent des chemins légèrement différents : le gonflement le plus important est observé pour la pâte séchée et la pâte consolidée séchée alors que la déformation apparaît sensiblement plus faible dans le cas du sol compacté, humidifié à partir de son état initial, c'est-à-dire n'ayant pas subi de séchage. On retrouve là un résultat classique selon lequel le gonflement est d'autant plus important que la contrainte de consolidation du sol est plus forte. Dans le cas des

deux échantillons séchés, cette contrainte de consolidation provient principalement de la pression capillaire de séchage, c'est-à-dire de l'écroûissage hydrique. On peut noter également que l'essentiel du gonflement des sols séchés se produit lorsque les matériaux se resaturent, c'est-à-dire pour des valeurs de pression capillaire inférieures à 2 MPa. L'échantillon compacté, en revanche, se resature beaucoup plus difficilement. Les différences observées entre l'échantillon compacté et les échantillons séchés, sur chemin d'humidification mais aussi, dans une certaine mesure, sur chemin de drainage, résultent probablement d'une texture différente liée au mode de préparation des matériaux. Il est en effet connu (Cui, 1993) que le mélange de particules humides et leur compactage conduit à la formation d'agrégats (ou « mottes »), tandis que la consolidation d'une pâte se traduit par des particules plus petites et une texture plus homogène et plus continue. Pour étudier plus en détail cet aspect, une étude associant différentes méthodes physico-chimiques a été réalisée en vue de caractériser les transformations texturales, de porosité et de répartition de l'eau du sol compacté lors de l'humidification. Des études similaires ont été effectuées par Qi (1996) sur des sols normalement consolidés.

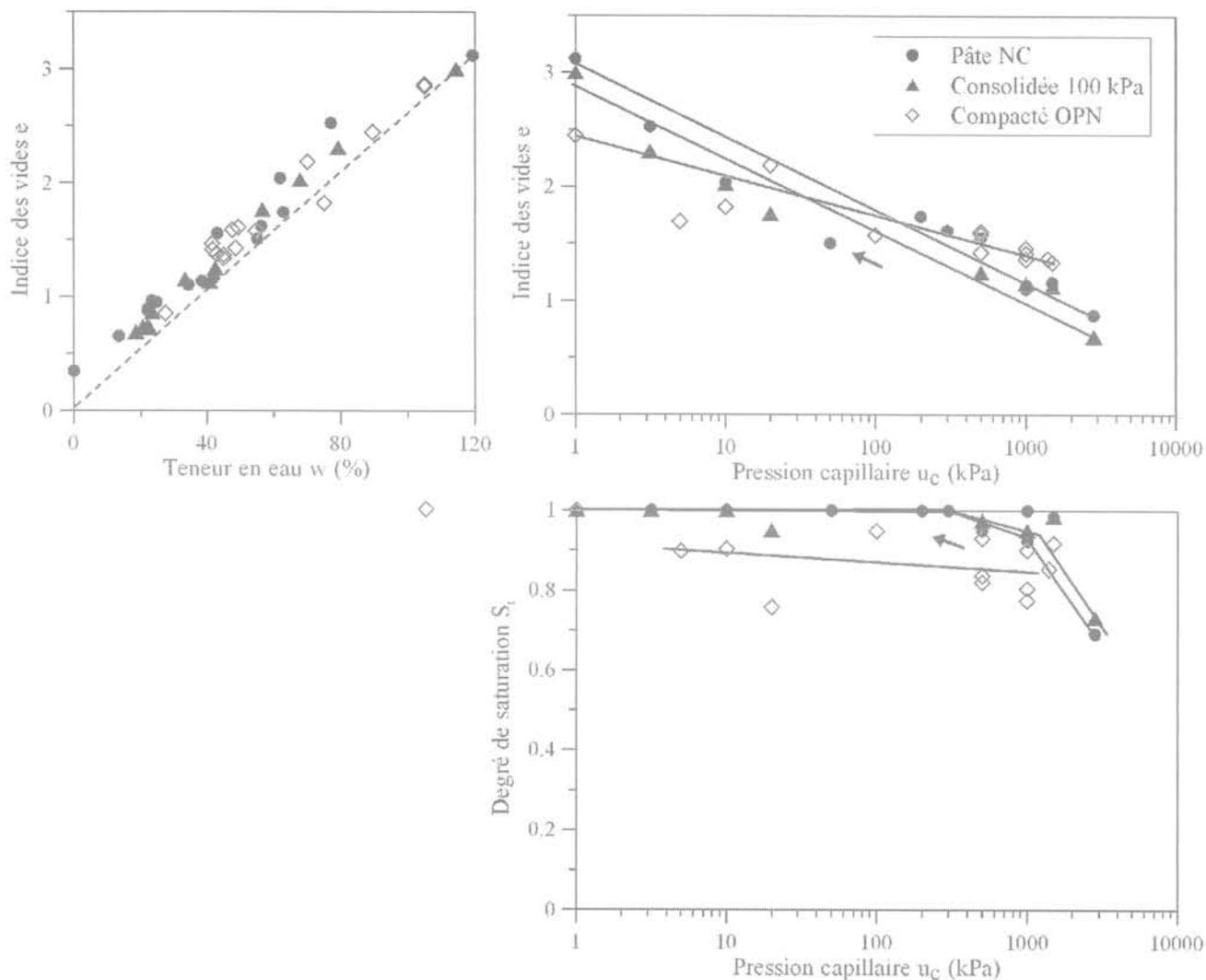


FIG. 7 Effet de l'état initial sur les courbes d'humidification.
Effect of the initial state on the wetting curves.

6

Évolution des paramètres texturaux de l'échantillon compacté à l'OPN lors de l'humidification

6.1

Étude de l'hydratation par la diffraction des rayons X (DRX)

La figure 8 présente les diffractogrammes de rayons X de l'argile grecque, à l'OPN et humidifiée en gonflement libre et sous une contrainte de 1 000 kPa. L'étude des diffractogrammes permet de suivre l'évolution de l'état d'hydratation des échantillons par l'intermédiaire des modifications de la distance entre les feuillets d'argile (distance interfoliaire). L'échantillon compacté à l'OPN présente une distance interfoliaire de 1,58 nm. Après humidification en gonflement libre, la distance interfoliaire se déplace à 1,90 nm, ce qui correspond à l'insertion d'une couche d'eau par rapport à l'état initial. Sous la contrainte de 1 000 kPa, en

revanche, la distance interfoliaire varie peu puisqu'elle passe de 1,58 à 1,45 nm, mais il se produit une réorganisation des molécules d'eau dans l'espace interfoliaire. Le nombre de couches d'eau est estimé en considérant que l'espacement entre les feuillets est de 0,9 à 1,0 nm et l'épaisseur d'une couche d'eau, de 0,25 à 0,30 nm. L'étude de l'intensité des réflexions (001), correspondant au premier pic de la courbe, permet d'avoir une idée sur l'évolution de l'organisation du matériau sous l'effet de la contrainte. En effet, l'échantillon est d'autant plus ordonné que l'intensité de sa réflexion (001) est importante (Guillot *et al.*, 2001a). Dans le cas de l'argile grecque, l'échantillon humidifié en gonflement libre présente une intensité de réflexion (001) plus importante que celle de l'échantillon à l'OPN, ce qui traduit une augmentation de l'orientation préférentielle des particules, c'est-à-dire de l'anisotropie du matériau, par rapport à celle de l'échantillon à l'état initial. Ce résultat peut s'expliquer par le fait qu'à l'état initial, la pression capillaire relativement forte qui règne dans l'échantillon (2 à 3 MPa) crée des forces interparticulaires d'attraction qui s'opposent à la réorganisation du sol. Lors de l'humidification, la pression capillaire et les forces dues à l'eau s'annulent, ce qui permet un réarrangement des particules perpendiculairement à la direction d'application de la contrainte. L'étude

des bandes (02, 11) permet de confirmer cette analyse. Si l'on compare avec l'échantillon humidifié sous la contrainte de 1000 kPa, les particules de l'échantillon humidifié en gonflement libre sont plus ordonnées.

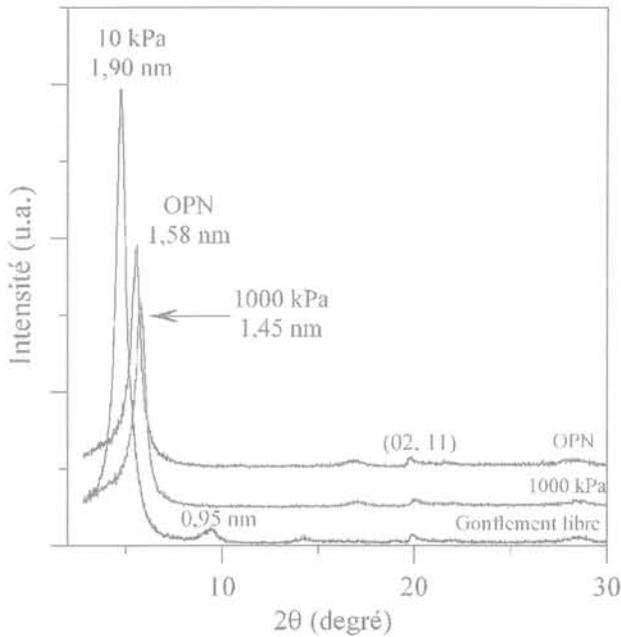


FIG. 8 Diffractogrammes de rayons X de l'argile grecque compactée à l'optimum Proctor normal et humidifiée sans contrainte et sous une contrainte de 1 000 kPa.
X-ray diffractograms of the greek clay compacted to Proctor optimum and hydrated without stress and under a stress of 1,000 kPa.

6.2

Étude de l'hydratation par analyse thermogravimétrique (ATG)

La figure 9a présente les courbes d'analyse thermogravimétrique de l'argile grecque compactée à l'OPN.

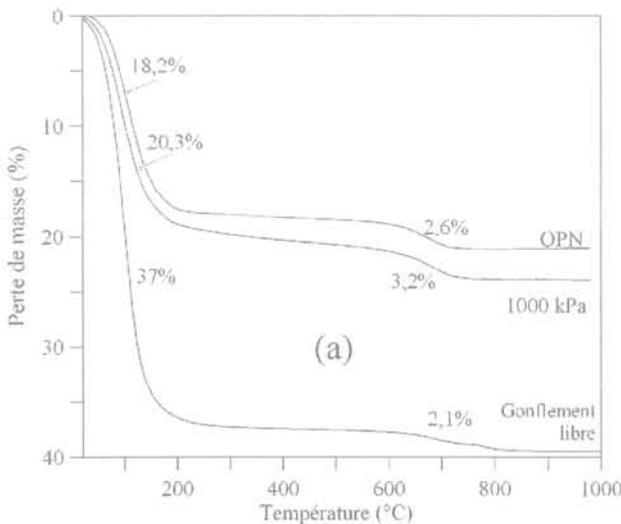


FIG. 9 (a) Courbes thermogravimétriques du matériau compacté ; (b) teneur en eau libre, teneur en eau de constitution et rapport de la teneur en eau libre à la teneur en eau totale à l'OPN et après hydratation en gonflement libre et sous une contrainte de 1 000 kPa.

(a) Thermogravimetric curves of compacted clay; (b) free water content, constitution water content and ratio of free water to total water contents at SPO and after hydration without stress and under a stress of 1,000 kPa.

On remarque sur la courbe qu'il existe majoritairement deux types d'eau :

- l'eau hygroscopique qui est éliminée à une température comprise entre 110 et 600 °C. Cet intervalle de température correspond à l'élimination de l'eau faiblement liée entre 110 et 150 °C et de l'eau plus fortement liée entre 150 et 600 °C. La quantité d'eau correspondant au dernier intervalle de température étant faible, elle a été intégrée dans le calcul à la quantité d'eau faiblement liée;

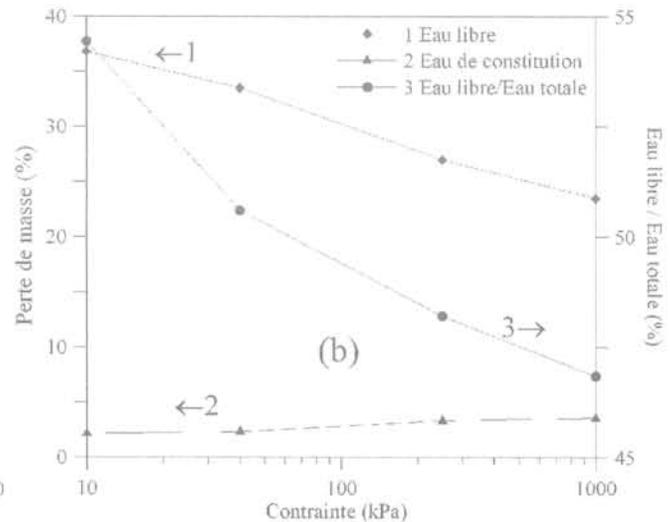
- l'eau structurale dont l'élimination correspond à la déshydroxylation des feuillet, à partir de 600 °C.

La figure 9b montre l'évolution des pourcentages d'eau faiblement liée et de déshydroxylation en fonction de la contrainte mécanique. Les résultats indiquent que la quantité d'eau faiblement liée, localisée dans les espaces interagrégats, varie sensiblement avec la valeur de la contrainte mécanique. La comparaison des pertes d'eau, pour les températures inférieures à 200 °C, aux teneurs en eau des échantillons montre qu'une grande partie de la teneur en eau totale est constituée d'eau faiblement liée. Ainsi, pour les échantillons compactés à l'OPN, l'eau faiblement liée constitue 46,9 % de la teneur en eau totale de l'échantillon pour la contrainte de 1 000 kPa et 54,4 % pour le gonflement libre. En ce qui concerne l'eau de déshydroxylation, elle varie peu et ne semble pas influencée par la contrainte mécanique.

6.3

Porosité en fonction de la contrainte

La variation des volumes cumulés en fonction de la taille des pores est présentée sur la figure 10. La courbe montre que l'augmentation de la contrainte sous laquelle s'effectue l'humidification se traduit globalement par la diminution du volume poreux. En réalité, le gonflement sous contrainte entraîne une réorganisation de la distribution des pores ; ainsi, les échantillons compactés à l'OPN présentent une répartition continue des tailles de pores. Après le gonflement libre, deux



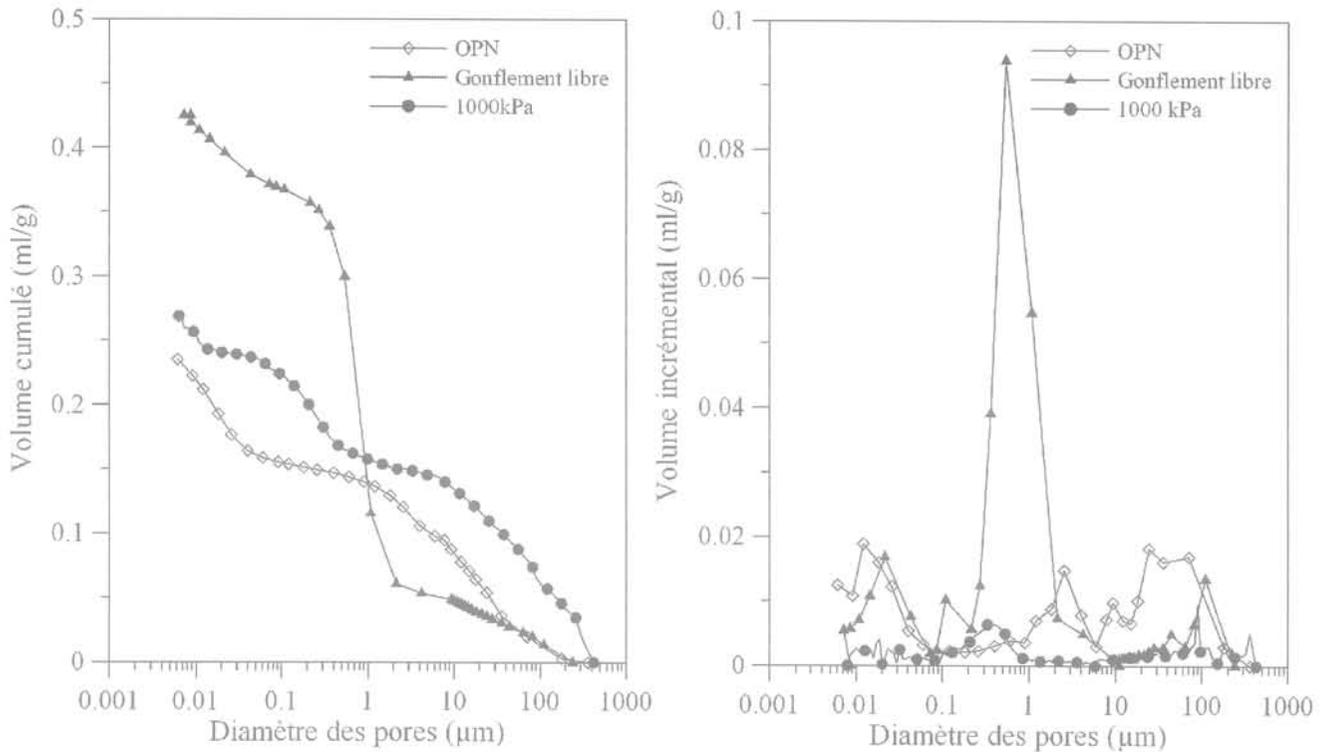


FIG. 10 Volumes cumulés et incrémentaux en fonction du diamètre des pores à l'OPN et après hydratation en gonflement libre et sous une contrainte de 1 000 kPa.
Cumulative and incremental volumes versus pore diameter at SPO and after hydration without stress and under a stress of 1,000 kPa.

familles de pores apparaissent, la première avec des diamètres proches de 100 μm et la seconde, autour de 1 μm . Pour l'échantillon humidifié sous la contrainte de 1 000 kPa, il apparaît une seule famille de pores, centrée sur 0,3 μm . Le tableau II présente la contribution de la porosité déduite des essais de porosimétrie au mercure à la porosité totale calculée à partir de l'indice des vides. Pour les différents essais réalisés, il apparaît que la porosimétrie au mercure permet d'accéder à 55 à 60 % du volume des pores.

TABEAU II Tableau II. Pourcentage de la porosité totale mesurée par porosité au mercure à l'OPN et après hydratation en gonflement libre ou sous une contrainte de 1 000 kPa.
Percentage of total porosity measured by mercury intrusion porosimetry at SPO and after hydration without stress or under a stress of 1,000 kPa.

	Contrainte	Volume total des vides (ml/g)	Volume de mercure introduit (ml/g)	Pourcentage de la porosité mesurée par porosimétrie au mercure (%)
Argile grecque OPN	État initial	0,54	0,22	41
	Gonflement libre	0,93	0,45	55
	1 000 kPa	0,44	0,26	60

6.4

Synthèse des résultats des mesures physico-chimiques

Les résultats obtenus par la diffraction des rayons X, la porosimétrie au mercure et l'analyse thermique mettent en évidence la complexité d'interprétation du gonflement à l'échelle microscopique. En effet, il ressort nettement de la porosimétrie au mercure et de l'analyse thermique que, dans l'argile compactée, ce sont essentiellement les macropores interagrégats qui contribuent au processus de gonflement. Par ailleurs, les résultats de la diffraction des rayons X suggèrent qu'il existe des pores dont le diamètre est de l'ordre du nanomètre, qui jouent un rôle important dans le phénomène mais ne sont pas pris en compte par la porosimétrie au mercure. Ces pores sont influencés par la variation de la contrainte et de l'état d'hydratation des échantillons. Ainsi, l'eau s'organise dans l'espace interfoliaire en fonction de l'état d'hydratation des échantillons : pour les faibles contraintes, la quantité de pseudo-couches d'eau dans l'espace interfoliaire augmente par rapport à l'état initial, alors que, pour l'échantillon humidifié sous des contraintes plus fortes (1 000 kPa dans le cadre de cette étude), les molécules d'eau se réorganisent dans l'espace interfoliaire puisqu'à l'état initial et sous la contrainte de 1 000 kPa, les distances interfoliaires, respectivement égales à 1,58 et 1,45 nm, correspondent au même nombre de couches d'eau.

Il faut nuancer ces conclusions par le fait que les techniques utilisées dans cette étude ne permettent pas d'avoir accès à tous les pores du milieu, comme on le constate en calculant la somme des porosités déduites de la DRX et de la porosimétrie au mercure, qui reste inférieure à la porosité totale déduite de l'indice des vides global. En effet, il existe dans les argiles des mésopores, dont la taille est inférieure à 2 nm, qui ne sont accessibles que par d'autres techniques physico-chimiques comme la BET (Brunauer *et al.*, 1938). D'ailleurs, les courbes de porosimétrie des échantillons ne présentent pas de palier au niveau des petits pores (au dessous de 6,3 nm), ce qui semble confirmer l'existence de mésopores dont la taille est inférieure à 6 nm. Certains auteurs (Guillot *et al.*, 2001b) ont également émis des critiques sur la technique de lyophilisation utilisée pour la préparation des échantillons pour les mesures de porosimétrie au mercure, qui ne permettrait pas d'extraire toute l'eau, ce qui peut paraître logique compte tenu de la complexité de la texture des smectites. Il faut aussi tenir compte des pores occlus, qui ne sont pas accessibles mais qui pourraient constituer une part non négligeable de la porosité.

7

Conclusion

L'article présente quelques aspects du comportement d'une argile très plastique compactée sur les chemins de drainage et d'humidification, en considérant à la fois les déformations macroscopiques et les changements à l'échelle microscopique. Dans une première partie, les variations d'indice des vides et de degré de saturation de l'argile compactée sont comparées à celles d'échantillons sous forme de pâte ou de pâte consolidée. Sur le chemin de drainage, l'échantillon compacté à l'optimum Proctor normal présente un comportement analogue à celui d'un échantillon surconsolidé, avec un palier de retrait identique à celui de la pâte ou de l'échantillon consolidé sous une contrainte de 100 kPa. Lors de l'humidification, le chemin de l'échantillon compacté se distingue nettement de ceux de la pâte ou de la pâte consolidée séchées et l'échantillon présente des déformations plus faibles.

Cette différence peut probablement être attribuée à la texture « en agrégats » de l'échantillon compacté, très différente de la texture plus continue des autres échantillons.

Dans la seconde partie, une étude microscopique utilisant différentes techniques physico-chimiques a été réalisée sur l'évolution de la texture du matériau compacté pendant l'humidification afin d'expliquer le comportement observé macroscopiquement. La diffraction des rayons X indique que l'humidification entraîne une variation de la distance interfoliaire en gonflement libre et la réorganisation des molécules d'eau adsorbées dans l'espace interfoliaire sous une contrainte de 1 000 kPa. Du point de vue de la texture, la comparaison des intensités des réflexions (001) montre que, lors de l'humidification, les particules s'orientent de façon préférentielle, d'autant plus que la contrainte est faible. On note ainsi une forte augmentation de l'anisotropie de l'échantillon lorsque la pression capillaire diminue. Les mesures d'analyse thermique et de porosimétrie au mercure révèlent que, dans le sol compacté, l'essentiel de l'eau se trouve dans les espaces interagrégats. Ainsi, les résultats de l'analyse thermique suggèrent que la quantité d'eau libre varie linéairement en fonction de la contrainte appliquée et que la quantité d'eau libre constitue environ 50 % de la porosité totale des échantillons. Par ailleurs la porosité interagrégats peut occuper jusqu'à 60 % de la porosité totale des échantillons. Le rôle important joué par les pores inter-agrégats au sein de l'argile compactée permet de comprendre les différences observées entre les échantillons compactés et consolidés. Toutefois, les conclusions doivent être nuancées par le fait que les techniques utilisées ne permettent pas de mesurer toute la porosité des échantillons comme les pores occlus ou les mésopores.

En conclusion, les méthodes physico-chimiques apportent des éléments complémentaires essentiels pour la compréhension de phénomènes complexes comme le retrait-gonflement des sols argileux. Elles permettent notamment d'avoir accès à l'évolution des différentes classes de porosité des échantillons, de la répartition de l'eau à l'intérieur de ces pores et de la texture (anisotropie) du matériau.

Introduction

L'objectif de ce travail est de compléter les connaissances expérimentales sur le comportement hydromécanique des sols gonflants rencontrés dans les travaux de génie civil, de géotechnique et de géotechnique de l'environnement afin de mieux en tenir compte dans les modèles de calcul. De nombreux travaux ont montré l'intérêt de réaliser des essais œdométriques pour caractériser le potentiel et la cinétique de gonflement des sols. Ils ont révélé également l'influence de l'humidification ou du séchage sur le gonflement ou le retrait, avec des pertes ou des augmentations de rigidité des éprouvettes.

Les sols gonflants sont constitués des particules argileuses du type smectite, en général ces particules s'associent aux autres constituants du sol pour former des agrégats. Deux niveaux structuraux ont alors été observés par Pusch (1982), Gens et Alonso (1992) : la microstructure qui correspond aux agrégats, et la macrostructure qui correspond à l'arrangement des agrégats entre eux (Fig. 1). La même double structure a été identifiée pour certaines argiles compactées utilisées dans les barrières ouvragées de déchets nucléaires par Atabek *et al.* (1991) sur l'argile de FoCa, Romero *et al.* (1999) sur l'argile de Boom et Cui *et al.* (2002) sur un mélange d'argile et de sable.

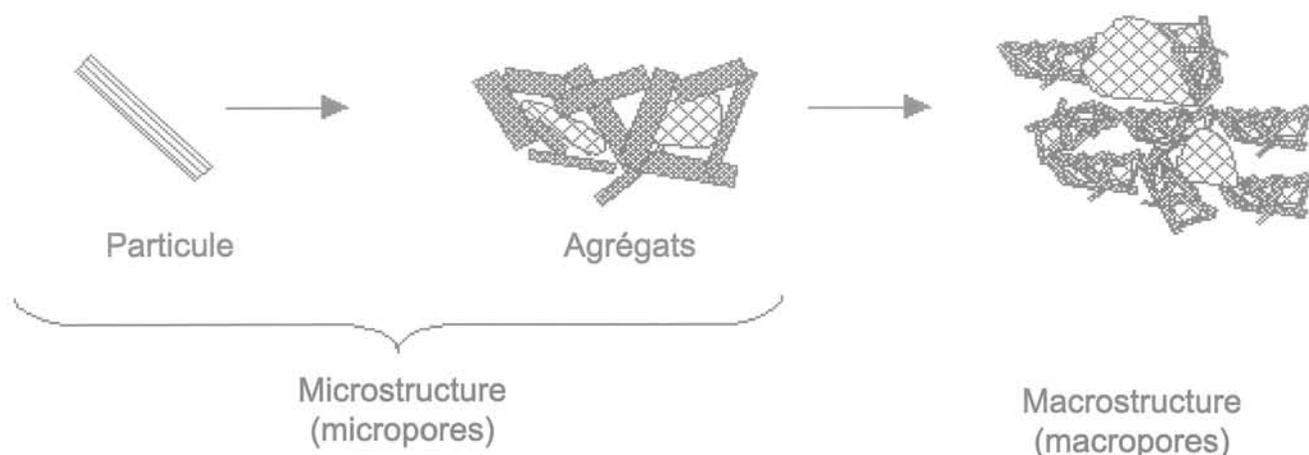


FIG. 1 Deux niveaux structuraux des particules argileuses (Gens et Alonso, 1992).
Two structural levels of the clayey particles (Gens & Alonso, 1992).

Des cycles d'humidification/séchage effectués sur des éprouvettes au laboratoire montrent qu'après quelques cycles hydriques d'une part, un état d'équilibre où le comportement du matériau est élastique et réversible peut être atteint, et d'autre part, que des déformations volumiques de retrait cumulé ou de gonflement cumulé sont obtenues. Day (1994), Subba Rao *et al.* (2000) et Tripathy *et al.* (2002) ont réalisé des essais cycliques sur un sol gonflant compacté. Leurs essais montrent que l'état réversible est atteint au bout de quatre ou cinq cycles d'humidification et de séchage. Les expériences effectuées par Dif et Bluemel (1991), Al-Homoud *et al.* (1995) et Alonso *et al.* (2005) montrent que les variations de volume des sols gonflants présentent des retraits cumulés pendant les cycles hydriques. Ce comportement a été expliqué par le réarrangement continu des particules du sol qui engendre une microstructure moins active. En revanche, Chu et Mou (1973) et Pousada (1984) observent un effet contraire dont un gonflement cumulé pendant un nombre de cycles successifs.

Une campagne d'essais œdométriques à succion contrôlée de longue durée a permis de recueillir en continu des mesures de déformation de deux types de sol, compacté et naturel, pendant plusieurs phases d'imbibition et de dessiccation afin d'étudier en particulier le phénomène d'accumulation de retrait ou de gonflement et son influence sur les paramètres mécaniques de ces matériaux. Ces résultats ont été analysés

dans le cadre du modèle élastoplastique (BExM) proposé par Alonso *et al.* (1999) qui prend en compte cette accumulation des déformations lors de l'application de différents chemins de chargement hydrique.

2

Technique expérimentale

Les études expérimentales des cycles d'humidification/séchage sur les matériaux gonflants étudiés ont été menées dans des œdomètres osmotiques proposés par Kassif et Ben Shalom (1971) et modifiés par Delage *et al.* (1992) (Fig. 2). La méthode osmotique est basée sur l'utilisation d'une membrane semi-perméable et d'une solution aqueuse de molécules organiques de Polyéthylène Glycol (PEG) avec une masse molaire de 6 000 ce qui permet d'imposer une succion maximale de 8,5 MPa (Delage *et al.*, 1998 ; et Cuisinier & Masroui, 2005).

3

Influence des cycles hydriques

Dans le cadre de cette étude, un sol compacté au laboratoire quasi sec et proche de sa limite de retrait, et un sol naturel saturé provenant du site du Deffend

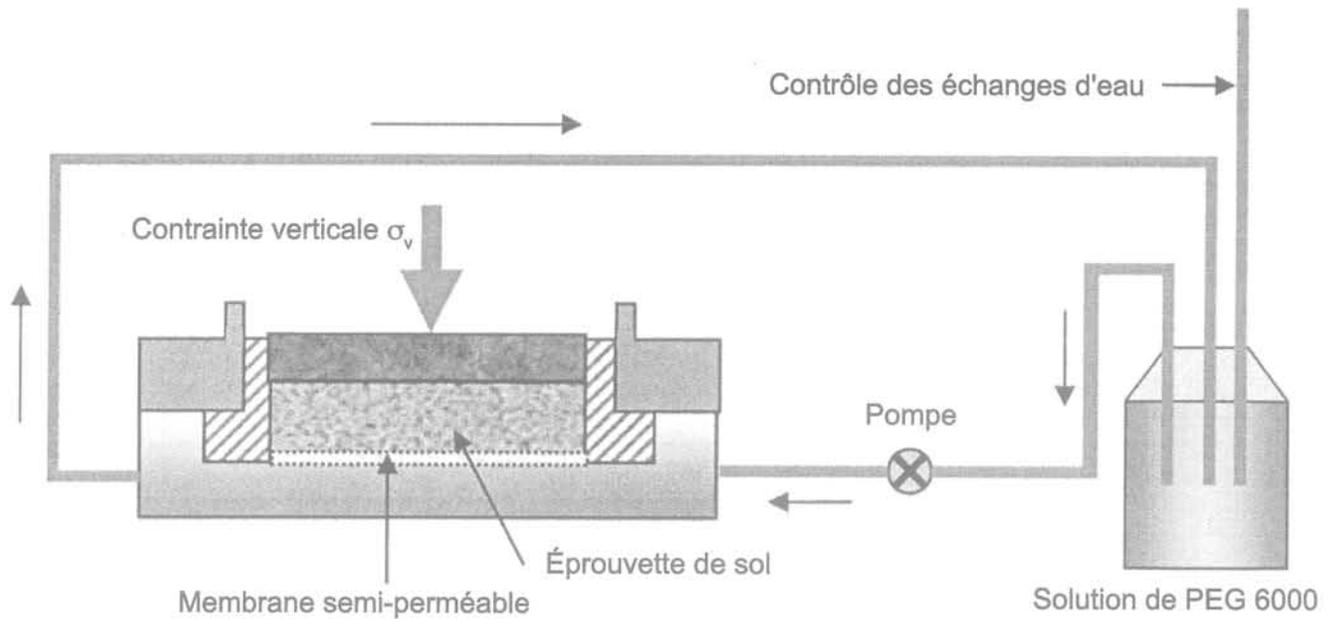


FIG. 2 Schéma de principe du dispositif œdométrique osmotique.
Schematic of the oedometer device using osmotic solutions.

ont été retenus. L'influence de cycles hydriques sur le comportement de ces deux différents types de sol argileux a été étudiée sous trois contraintes mécaniques constantes. Ces contraintes sont inférieures à la pression de préconsolidation de chaque matériau, de sorte que la plastification des éprouvettes sous chargement mécanique ne soit pas atteinte.

3.1

Sol compacté

Le matériau étudié est un mélange de 60 % d'une bentonite calcique et de 40 % du limon de Xeulley. Les différentes caractéristiques géotechniques du mélange sont données dans le tableau I. Le limon et la bentonite, initialement sous forme de poudres tamisées à 400 μm , sont mélangés puis humidifiés à une teneur en eau massique de 15 %. Cette valeur est proche de la limite de retrait du mélange. Le mélange humide a ensuite été conservé 7 jours dans un récipient hermétique. Après cette période, les éprouvettes ont été préparées par compactage statique à une vitesse de 1,14 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ sous une contrainte verticale de 1 000 kPa directement dans l'œdomètre utilisé. La masse volumique initiale étant de $1,27 \pm 0,01 \text{ Mg m}^{-3}$, le degré de saturation initial est ainsi proche de 35 %. La masse volumique sèche initiale relativement basse permet d'obtenir un matériau compacté présentant initialement une double structure marquée : les éprouvettes comprennent des agrégats entre lesquels existent des macropores. Un essai de porosimétrie au mercure a été réalisé pour évaluer la distribution de la dimension de pores du mélange compacté (Delage et Lefebvre 1984, Romero *et al.* 1999). La figure 3 présente le volume incrémental d'intrusion du mercure en fonction du diamètre des pores. Cette distribution de pores manifeste deux niveaux structuraux distincts qui est la caractéristique fondamentale de ce type de matériau : micro et macros-

structure (Alonso *et al.*, 1987). Le diamètre de pores qui sépare la micro- et la macrostructure est égal à 0,15 μm , d'après la loi de Jurin-Laplace ce diamètre correspond à une succion d'environ 2 MPa. Le sol présente une macrostructure dominante avec la valeur maximale de diamètre de 7,5 μm . Le diamètre dominant correspondant à la microstructure est de 0,011 μm .

La hauteur initiale des éprouvettes est de $10 \pm 0,5 \text{ mm}$ et leur diamètre de 70 mm. La succion totale initiale mesurée par la technique de papier filtre est comprise entre 20 et 25 MPa (ASTM 1995a). La méthode du gonflement libre a été utilisée pour déterminer le potentiel de gonflement, le rapport entre la variation de hauteur de l'éprouvette produite par la saturation sur sa hauteur initiale, et la pression de gonflement, pression nécessaire pour éliminer cette variation de hauteur (ASTM, 1995b). Ces grandeurs sont respectivement de 15 % et de 220 kPa.

TABEAU I Caractéristiques géotechniques du mélange compacté.

Properties of the compacted soil.

Matériau	Mélange
Limite de liquidité (%)	87
Indice de plasticité (%)	22
Densité des grains solides	2,69

Les chemins de contrainte suivis de trois essais effectués (O1, O2 et O3) sont indiqués sur la figure 4 et dans le tableau II. L'état initial est représenté par le point A qui correspond à l'état des éprouvettes après compactage une fois insérées dans l'œdomètre. La pression verticale appliquée est de l'ordre de 10 kPa. Le point B représente la succion de 8 MPa à la même pression verticale initiale pour les trois éprouvettes. A partir du point B, trois charges différentes ont été appliquées aux trois éprouvettes : 15 kPa (point C) pour essai O1, 30 kPa (point D) pour essai O2 et 60 kPa (point E) pour

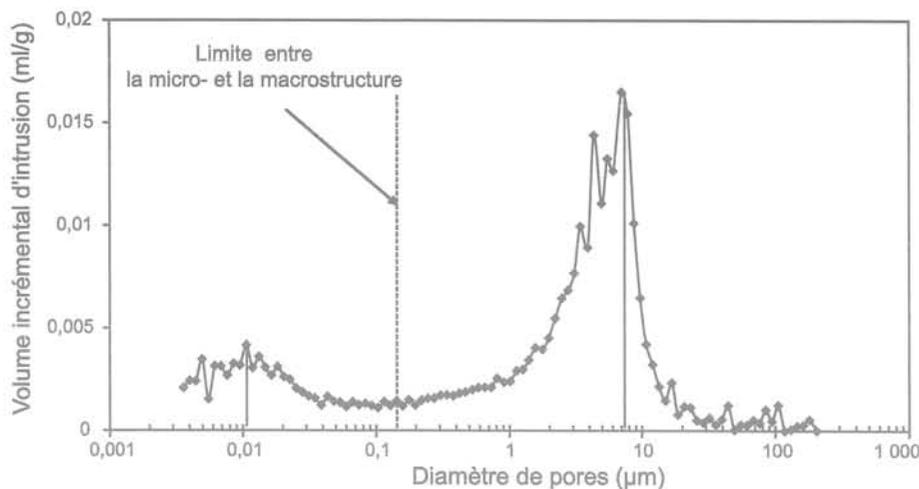


FIG. 3 Volume incrémental d'intrusion du mercure en fonction du diamètre des pores pour le matériau compacté, essai de porosimétrie au mercure.
Distribution of incremental pore volume for the compacted soil, mercury intrusion porosimeter test.

essai O3. Ces trois points sont les points de départ des cycles de succions appliquées. Par la suite, trois cycles successifs d'humidification ($s = 0$ MPa) et de dessiccation ($s = 8$ MPa) ont été appliqués (tableau II). Le choix de cet intervalle de succion est fait en fonction de la valeur de succion de 2 MPa qui correspond au rayon des pores délimitant la micro- et la macrostructure. De cette manière, les cycles de succion appliqués

influencent ces deux niveaux structuraux. Pour des commodités de représentation, les données obtenues avec une succion nulle seront reportées à une succion de 0,01 MPa. La faible perméabilité du matériau argileux étudié nécessite une période longue pour atteindre l'état d'équilibre avec l'imposition de succion par la méthode osmotique. La réalisation complète de chaque essai a duré deux mois.

TABLEAU II Description des chemins suivis pour le sol compacté.
Description of the followed stress paths for the molded soil.

O1	O2	O3
A-B-C ₁ -F ₁ -C ₂ -F ₂ -C ₃ -F ₃ -C ₄	A-B-D ₁ -G ₁ -D ₂ -G ₂ -D ₃ -G ₃ -D ₄	A-B-E ₁ -H ₁ -E ₂ -H ₂ -E ₃ -H ₃ -E ₄

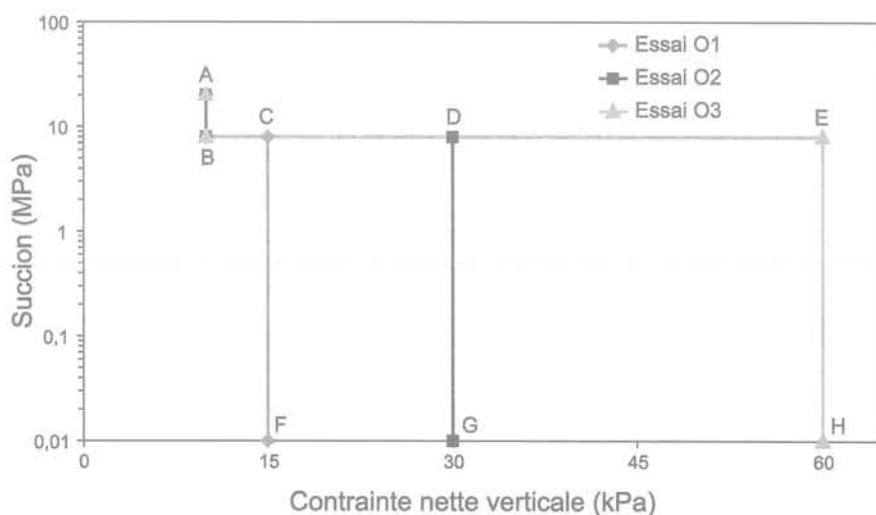


FIG. 4 Chemins de contrainte dans le plan ($\sigma'_v - \log s$) pour le sol compacté.
Description of ($\sigma'_v - \log s$) plan for the molded soil.

Les déformations volumiques des trois essais effectués sont présentées sur les figures 5a à 5c où les déformations dues au retrait sont considérées négativement. Le premier cycle d'humidification (A-B) produit un gonflement pour chacune des trois éprouvettes. En revanche, les éprouvettes manifestent un retrait cumulé lors des cycles successifs suivants. Enfin, les

déformations volumiques convergent vers un état d'équilibre, autrement dit, le sol présente un comportement totalement réversible. Cette convergence est complètement atteinte pour les deux premières éprouvettes (O1 et O2). Toutefois, pour l'essai O3, un ou deux cycles supplémentaires auraient été nécessaires pour atteindre cet état élastique.

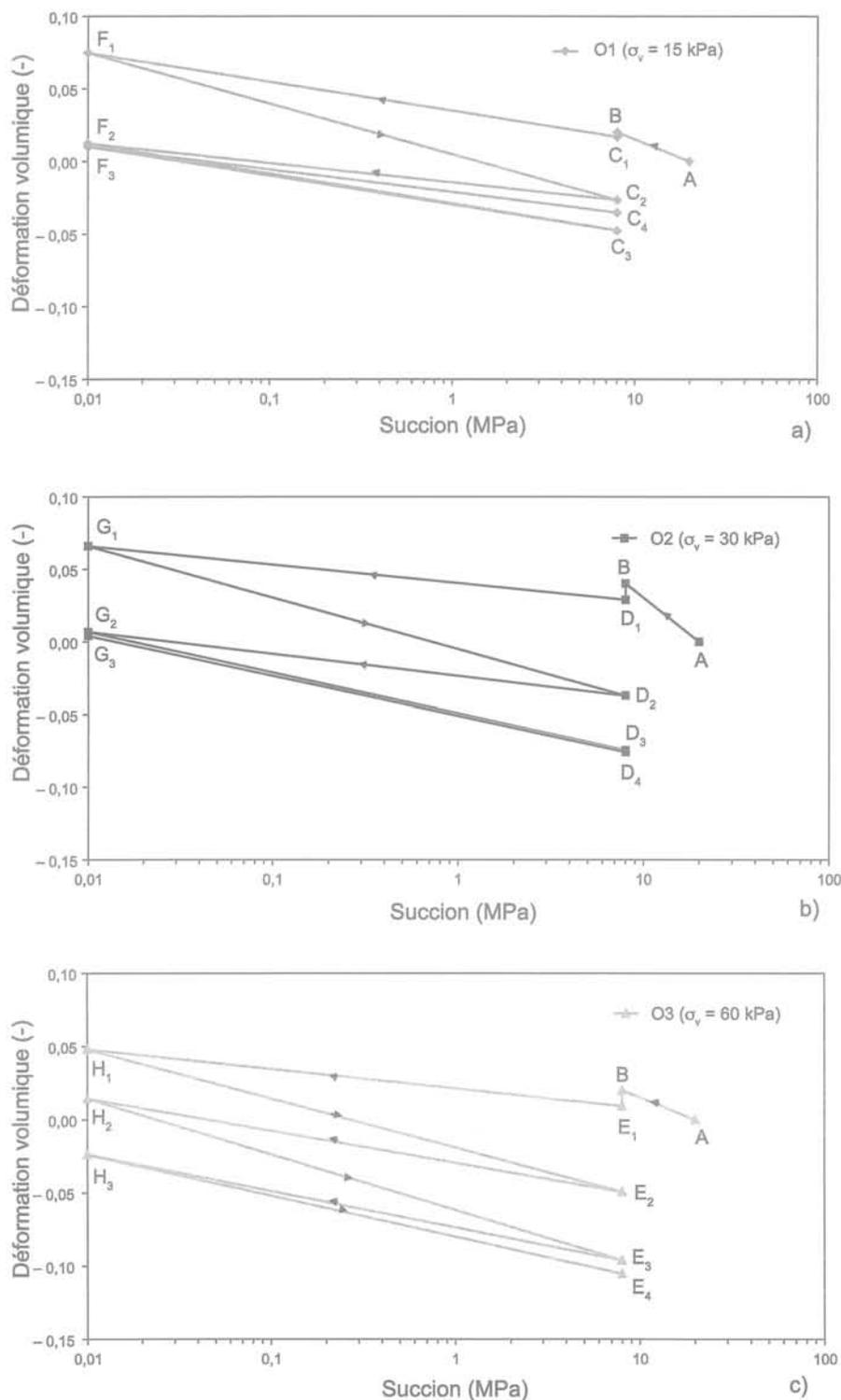


FIG. 5 Déformations volumiques des éprouvettes soumises à des cycles de suction sous différentes contraintes verticales a) 15 kPa, b) 30 kPa et c) 60 kPa pour le sol compacté.
Volumetric deformations in cyclic controlled-suction paths under the vertical stresses a) 15 kPa, b) 30 kPa and c) 60 kPa for the molded soil.

Pour observer le comportement réversible du sol, les déformations volumiques de gonflement ou de retrait dues à chaque cycle de succion ont été présentées en fonction du nombre de cycle sur la figure 6 pour l'essai O2. Quand le nombre de cycle augmente, la différence entre le retrait et le gonflement volumique de deux cycles consécutifs d'humidification/séchage tend vers zéro, et un état stable élastique du matériau est atteint au dernier cycle de succion appliquée.

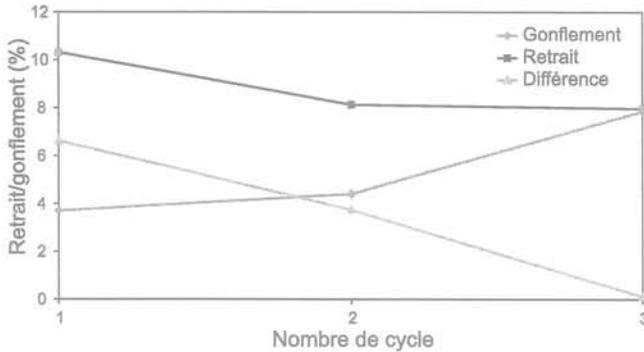


FIG. 6 Évolutions de retrait/gonflement sous des cycles de suctions ($\sigma_v = 30$ kPa) pour le sol compacté.
Evolution of swelling and shrinkage with the number of suction cycles ($\sigma_v = 30$ kPa) for the molded soil.

3.2

Sol du site du Deffend

Le site étudié se trouve sur la commune de Mignaloux-Beauvoir (Vienne), au lieu-dit du Deffend, à envi-

ron 4 km au sud-est de Poitiers. Un carottage de 7 m à cet endroit a fait l'objet d'une étude géologique et géotechnique dans le cadre du projet ANR ARGIC (Vincent *et al.*, 2006). Le sol fortement argileux se trouve entre 6,10 m et 6,40 m de profondeur. La densité sèche du sol varie entre 1,15 et 1,25 et sa teneur en eau massive initiale est entre 41 et 45 %. La succion totale initiale a été mesurée par la technique du papier filtre (ASTM 1995a), elle est comprise entre 400 et 700 kPa pour ces profondeurs. Les différentes caractéristiques géotechniques de ces matériaux sont présentées dans le tableau III. La mesure du potentiel de gonflement et de la pression de gonflement à la profondeur de 6,25 m a été réalisée en utilisant la méthode de gonflement libre (ASTM, 1995b). L'éprouvette présente une masse volumique sèche initiale de 1,20 Mg/m³ et une teneur en eau initiale de 41 % environ. Le potentiel de gonflement et la pression de gonflement sont respectivement de 7 % et de 225 kPa.

Un essai de porosimétrie au mercure a été réalisé pour approcher la distribution de la dimension de pores du matériau naturel avec une densité sèche de 1,15 (Fig. 7). La limite entre la micro- et la macrostructure est de 0,65 μ m, elle correspond à une succion d'environ 0,5 MPa. La microstructure a un diamètre de 0,015 μ m et le diamètre correspondant aux pores macroscopiques est de 60 μ m.

TABEAU III Caractéristiques géotechniques du matériau étudié du site du Deffend.

Properties of the natural soil in the experimental site of Le Deffend.

Limite de liquidité (%)	85,6
Indice de plasticité (%)	31,9
Densité des grains solides	2,60
Pourcentage de passant au tamis de 80 μ m	99 %
Fraction argileuse (<0,002 mm)	72 %

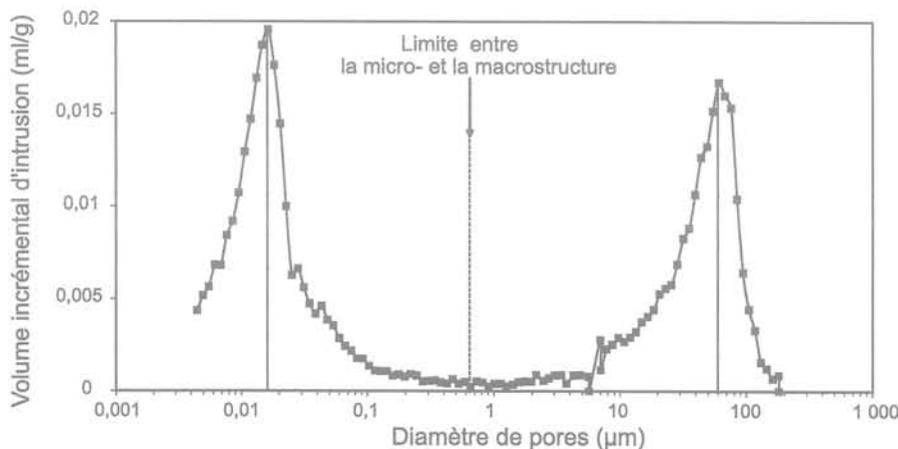


FIG. 7 Volume incrémental d'intrusion du mercure en fonction du diamètre des pores pour le sol naturel du Deffend, essai de porosimétrie au mercure.
Distribution of incremental pore volume for the natural soil of Le Deffend, mercury intrusion porosimeter test.

Les essais œdométriques (D1, D2 et D3) ont été conduits sur ce sol à la profondeur entre 6,25 m et 6,35 m. L'état initial du sol est représenté par le point A sur la figure 8 pour les trois essais. Ce point correspond à une masse volumique sèche initiale de 1,22 Mg/m³ et à une teneur en eau initiale de 43 % environ. La hauteur initiale des éprouvettes est de 11,6 mm et leur diamètre est de 70 mm. La succion initiale du sol est 0,5 MPa. La pression verticale initiale appliquée est de l'ordre de 10 kPa. Trois différentes charges ont été appliquées

aux trois éprouvettes : 20 kPa (point B) pour l'essai D1, 40 kPa (point C) pour l'essai D2 et 60 kPa (point D) pour l'essai D3. Puis, trois cycles successifs d'humidification (s = 0) et de dessiccation (s = 2 MPa) ont été appliqués, ces cycles influencent aussi bien la micro que la macrostructure de ce sol. Les chemins de contrainte suivis de trois essais (D1, D2 et D3) sont indiqués sur la figure 8 et dans le tableau IV. Ces essais (D1, D2 et D3) avec l'imposition de succion par la méthode osmotique ont duré dix semaines.

TABEAU IV Description des chemins suivis pour le sol naturel du site du Deffend.
Description of the followed stress paths for the natural soil of Le Deffend.

D1	D2	D3
A-B-E ₁ -H ₁ -E ₂ -H ₂ -E ₃ -H ₃ -E ₄ -H ₄ -E ₅	A-C-F ₁ -I ₁ -F ₂ -I ₂ -F ₃ -I ₃ -F ₄ -I ₄	A-D-G ₁ -J ₁ -G ₂ -J ₂ -G ₃ -J ₃ -G ₄ -J ₄

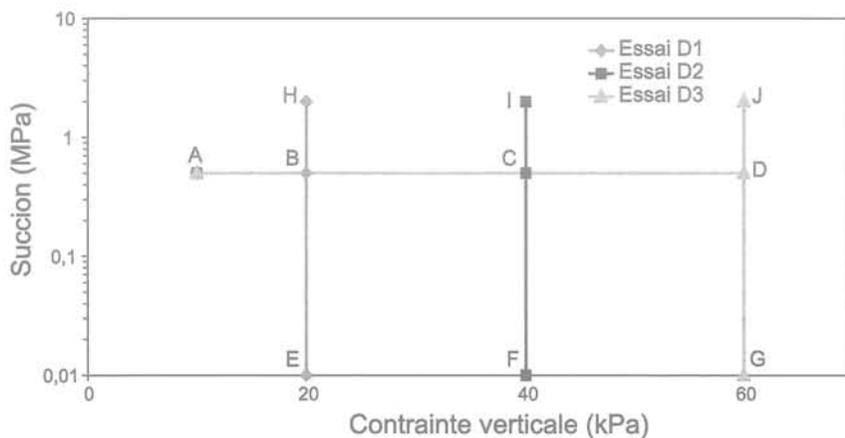


FIG. 8 Chemins de contrainte dans le plan ($\sigma_v - \log s$) pour le sol naturel du site du Deffend.
Description of ($\sigma_v - \log s$) plan for the natural soil of Le Deffend.

Les déformations volumiques des trois éprouvettes sont présentées sur les figures 9a à 9c où les déformations dues au retrait sont considérées négativement. Contrairement à ce qui a été observé pour le sol compacté, les éprouvettes manifestent un gonflement cumulé lors des cycles successifs et les déformations volumiques convergent vers un état d'équilibre. Un comportement totalement réversible est atteint pour l'essai D3, alors qu'un ou deux cycles supplémentaires auraient été nécessaires pour les essais D1 et D2 afin d'atteindre complètement cet état élastique.

4

QUELQUES TRAITS DU MODÈLE BExM

Différents modèles élastoplastiques ont été développés pour décrire le comportement des sols non saturés (Alonso *et al.*, 1987 ; Karube et Kato, 1989 ; Kohgo *et al.*, 1991 ; Gallipoli *et al.*, 2003 ; Wheeler *et al.*, 2003...). Alonso *et al.* (1987, 1990) ont proposé un modèle élastoplastique pour les sols non saturés non gonflants BBM (*Barcelona Basic Model*). Ce modèle est une extension du modèle de Cam-Clay modifié (Roscoe et Burland, 1968) dans le domaine des sols non saturés, il a été révisé pour les sols gonflants sous l'appellation BExM (*Barcelona Expansive Model*) (Gens et Alonso, 1992 ; Alonso *et al.*, 1999).

Ce modèle considère deux niveaux structuraux dans le milieu : micro- et macrostructure. La microstructure est supposée saturée et ses déformations sont engendrées par les variations de contrainte effective. Cette hypothèse permet de construire dans le plan ($p_0 - s$) une ligne NL (*Neutral Line*) d'équation $p_0 + s = \text{const.}$ qui représente les états pour lesquels il n'y a aucune déformation microstructurale (Fig. 10). Cette ligne est orientée à 45° par rapport à l'axe de la succion, elle sépare pour la microstructure, la zone de gonflement de la zone de retrait.

L'ensemble des surfaces de charge de ce modèle est représenté sur la figure 10. En première approximation, deux surfaces SI (*Suction Increase*) le seuil d'un retrait irréversible et SD (*Suction Decrease*) le seuil d'un gonflement irréversible sont prises parallèles à la NL. La courbe LC permet de décrire l'augmentation de la pression moyenne nette de préconsolidation (p_0) en fonction de la succion appliquée :

$$\frac{p_0}{p_c} = \left(\frac{p_0}{p_c} \right)^{\frac{\lambda(0) - \kappa}{\lambda(s) - \kappa}} \text{ avec } \lambda(s) = \lambda(0)[r + (1+r)\exp(-\beta s)] \quad (1)$$

où p_0^* est la pression moyenne nette de préconsolidation sous une succion nulle, p_c est une pression de référence, κ est le coefficient de compressibilité élastique, $\lambda(s)$ est la pente de compression vierge à succion constante, $\lambda(0)$ est la pente de compression vierge à succion nulle, r est un paramètre lié à la rigidité du sol et β un paramètre contrôlant le taux d'augmentation de la rigidité avec la succion.

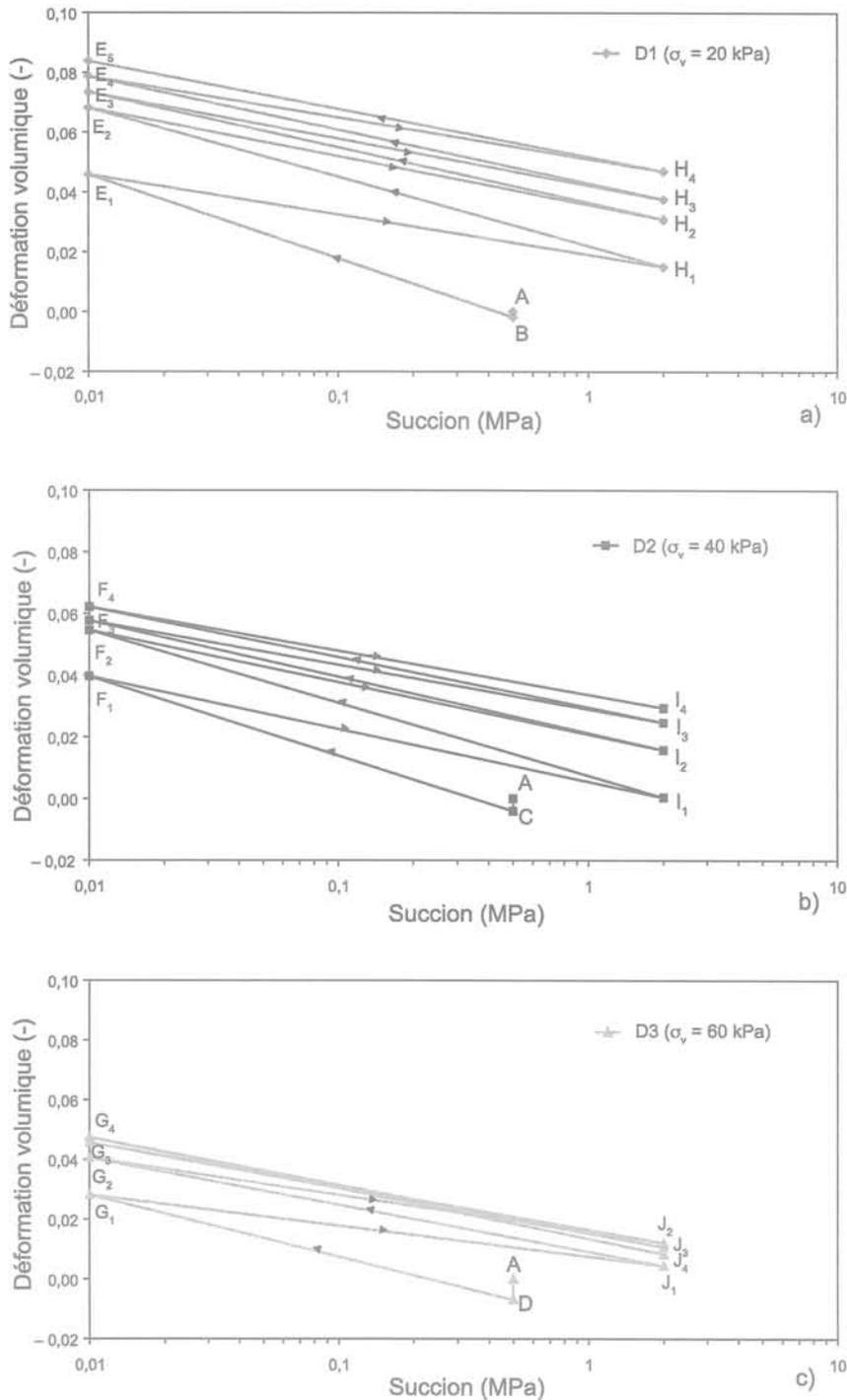


FIG. 9

Déformations volumiques des éprouvettes soumises à des cycles de succion sous différentes contraintes : a) 20 kPa, b) 40 kPa et c) 60 kPa pour le sol naturel du Deffend.

Volumetric deformations in cyclic controlled-suction paths under the vertical stresses: a) 20 kPa, b) 40 kPa and c) 60 kPa for the natural soil of Le Deffend.

Déformations élastiques : dans ce modèle, les déformations élastiques engendrées par les cycles de succion sont issues seulement de la microstructure, *i.e.* les déformations macrostructurales élastiques induites par ces cycles ont été considérées comme étant négligeables. Les déformations élastiques volumiques (microstructurales) induites par la variation de succion de la valeur initiale s_i à la valeur finale s_f sont déterminées à partir de l'équation suivante :

$$d\varepsilon_v^e = \frac{\kappa_m}{1 + e_0} \ln\left(\frac{p + s_f}{p + s_i}\right) \quad (2)$$

où (κ_m) est l'indice de compressibilité élastique de la microstructure et e_0 est l'indice des vides initial du sol. L'indice (κ_m) est la pente élastique de l'état d'équilibre atteint après plusieurs cycles de succion.

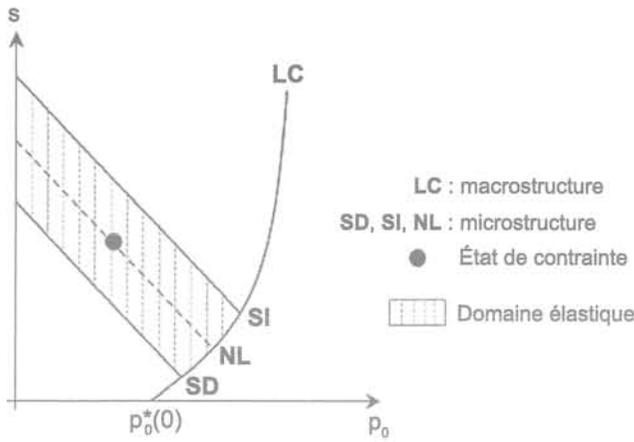


FIG. 10 Surface de charge du modèle BExM (Alonso et al., 1999).
Yield surface of BExM model (Alonso et al., 1999).

Déformations plastiques : d'après le modèle élastoplastique, les déformations plastiques macrostructurales sont produites par les déformations élastiques microstructurales (couplage micro/macrostructure) lors des cycles de succion. La déformation plastique

($d\epsilon_v^p$) induite par la variation de succion imposée peut être calculée par la différence entre la déformation totale mesurée et la déformation élastique obtenue par l'équation 2.

Dans ce modèle pour les essais œdométriques, la pression moyenne nette (p_0) est remplacée par la contrainte verticale nette appliquée (σ_{v0}). Par ailleurs, les valeurs de σ_{v0} à des succions différentes sont représentées par la contrainte verticale de préconsolidation saturée (σ_{v0}^*), autrement dit, la courbe de LC est considérée comme étant une droite verticale ($\sigma_{v0} = \sigma_{v0}^*$).

L'activation des surfaces de charge SI et SD, provoque l'activation de la courbe LC, l'inverse n'étant pas vrai. Le changement des valeurs de σ_{v0}^* dû à l'activation de LC pourrait être estimé à partir de la déformation plastique mesurée :

$$\frac{\Delta \sigma_{v0}^*}{\sigma_{v0}^*} = (1 + e) \frac{\Delta \epsilon_v^p}{(\lambda(0) - \kappa)} \quad (3)$$

La figure 11 présente de manière schématique ($d\epsilon_v^p/d\epsilon_v^e$) en fonction de ($\sigma_{v0}/\sigma_{v0}^*$). Elle montre l'accumulation des déformations lors de l'application de différents cycles de séchage/humidification. La valeur de ($\sigma_{v0}/\sigma_{v0}^*_{\text{éq}}$) correspond à l'état d'équilibre et à la déformation plastique nulle.

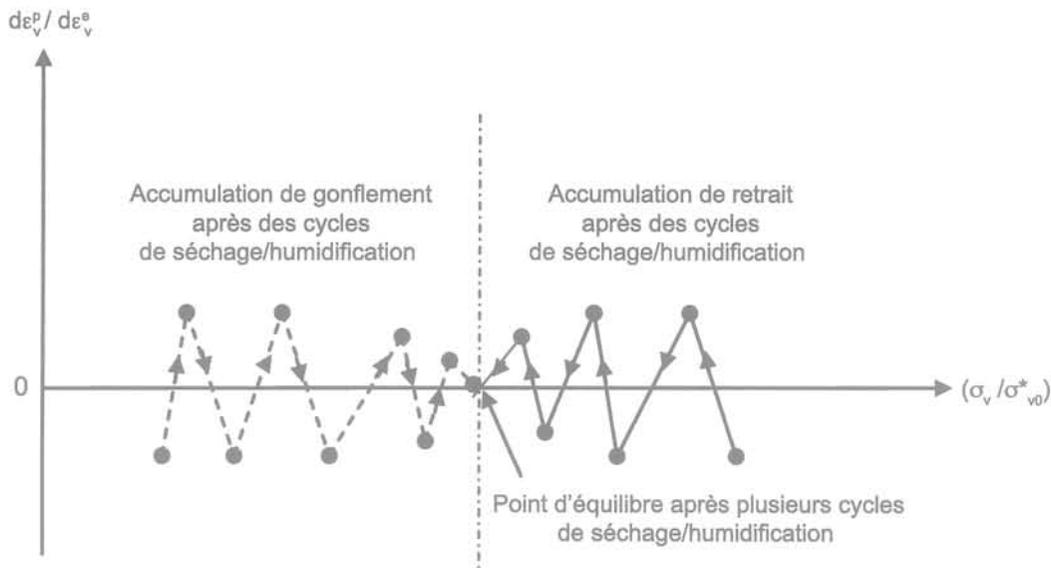


FIG. 11 Évolution des déformations plastiques lors des cycles de séchage/humidification.
Evolution of the plastics strains during the wetting/drying cycles.

Pour les rapports de (σ_v/σ_{v0}^*) inférieurs à ($\sigma_v/\sigma_{v0}^*_{\text{éq}}$), les déformations plastiques de l'humidification prédominent les déformations plastiques du séchage, ce qui aboutit à un gonflement global à la fin des cycles de succion. Dans ce cas, le radoucissement du matériau diminue la pression de préconsolidation (σ_{v0}^*) et en conséquence le rapport (σ_v/σ_{v0}^*) augmente.

Pour les valeurs de (σ_v/σ_{v0}^*) supérieures à ($\sigma_v/\sigma_{v0}^*_{\text{éq}}$), les déformations plastiques durant le séchage prédominent celles issues de l'humidification et produisent un retrait global à la fin des cycles de séchage/humidification. Ce retrait rigidifie le sol et augmente la

valeur de σ_{v0}^* en produisant la diminution de la valeur de (σ_v/σ_{v0}^*).

5

Interprétation des résultats

L'indice de compressibilité élastique κ_m qui est fonction de la charge appliquée a été défini pour les deux matériaux (Fig. 12).

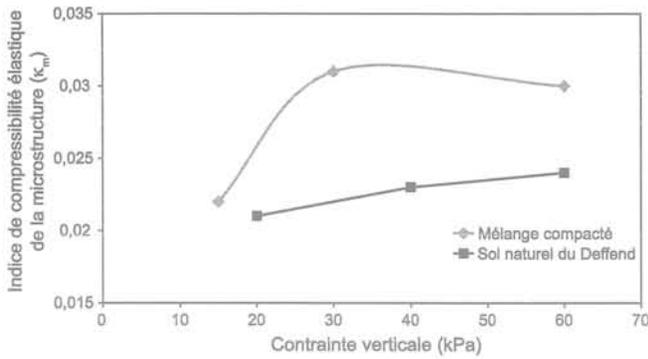


FIG. 12 Indice de compressibilité élastique pour les matériaux étudiés.
Elastic compression index for the studied soils.

Les courbes de compressibilité obtenues par la méthode de gonflement libre (suction nulle) pour les deux matériaux étudiés permettent d'obtenir la

penne de compression vierge sous une suction nulle $\lambda(0)$, la contrainte verticale de préconsolidation sous une suction nulle σ_{v0}^* et la pente de déchargement κ (tableau V). Les valeurs mesurées de $((de_v^*/de_v^*))$ sont présentées en fonctions de (σ_v/σ_{v0}^*) sur la figure 13 pour les trois essais O1, O2 et O3 correspondant au sol compacté. Ces courbes montrent que les déformations plastiques convergent vers un état d'équilibre représenté par le point M avec le rapport $(\sigma_v/\sigma_{v0}^*)_{\text{éq}} = 0,14$. Une structure plus rigide du sol est engendrée par le retrait volumique cumulé lors des cycles de suction.

TABLEAU V Paramètres de la surface de charge (LC) pour les matériaux étudiés.

Parameters of the (LC) yield surface for the studied soils.

Paramètre	σ_{v0}^* (kPa)	κ	$\lambda(0)$
Mélange compacté	60	0,04	0,19
Matériau naturel du Deffend	220	0,03	0,12

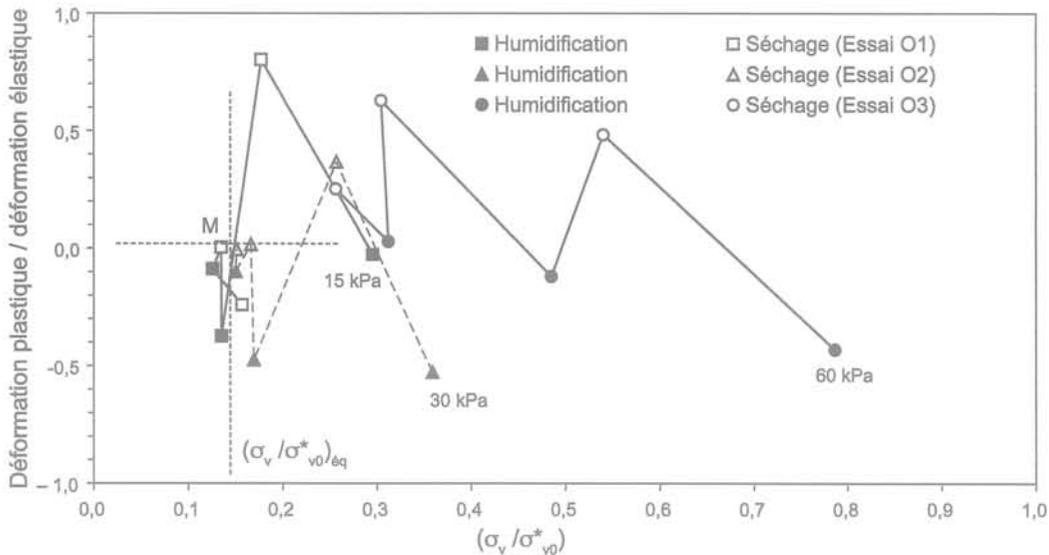


FIG. 13 Évolution des déformations plastiques lors des cycles de séchage/humidification pour le sol compacté.
Evolution of the plastics strains during the wetting and drying cycles for the molded soil.

En ce qui concerne le sol du Deffend, les éprouvettes présentent un gonflement cumulé lors des essais D1, D2 et D3. L'état initial du sol se trouve côté gauche du point d'équilibre sur la figure 14 représenté par le point N avec le rapport $(\sigma_v/\sigma_{v0}^*)_{\text{éq}} = 0,50$. Les cycles de suction ramollissent le sol et la valeur de σ_{v0}^* diminue lors des cycles de séchage/humidification.

L'ensemble des résultats montre que la macro- et la microstructure initiale du sol, la densité et la teneur en eau initiales du matériau, ainsi que sa pression de préconsolidation sont des facteurs importants qui influencent fortement les déformations volumiques d'un sol soumis à des cycles hydriques. Le point d'équilibre du matériau obtenu en général après quatre ou cinq cycles hydriques est dépendant également de la gamme de variation de suction. L'intensité de la charge appliquée influence le nombre de cycles nécessaires pour atteindre le point d'équilibre.

En ce qui concerne le sol compacté, les variations de suction influencent la microstructure du sol qui produit le retrait cumulé plastique de la macrostructure lors des cycles de séchage/humidification. En état d'équilibre, le volume macrostructural atteint sa valeur minimale. L'augmentation de la charge appliquée influence l'intensité du retrait du premier cycle de séchage/humidification.

Sous l'influence des cycles hydriques, le sol naturel qui présentait une microstructure dominante cumule un gonflement macrostructural. Lorsque la charge appliquée augmente, l'intensité du gonflement final obtenue après plusieurs cycles hydriques diminue.

En pratique, pour un sol gonflant chargé par les différentes parties des bâtis individuels, les variations climatiques induisant des sollicitations hydriques dans un intervalle de suction qui influence à la fois la micro- et la macrostructure, créent des retraites et gonflements différentiels nuisibles pour ce type de construction.

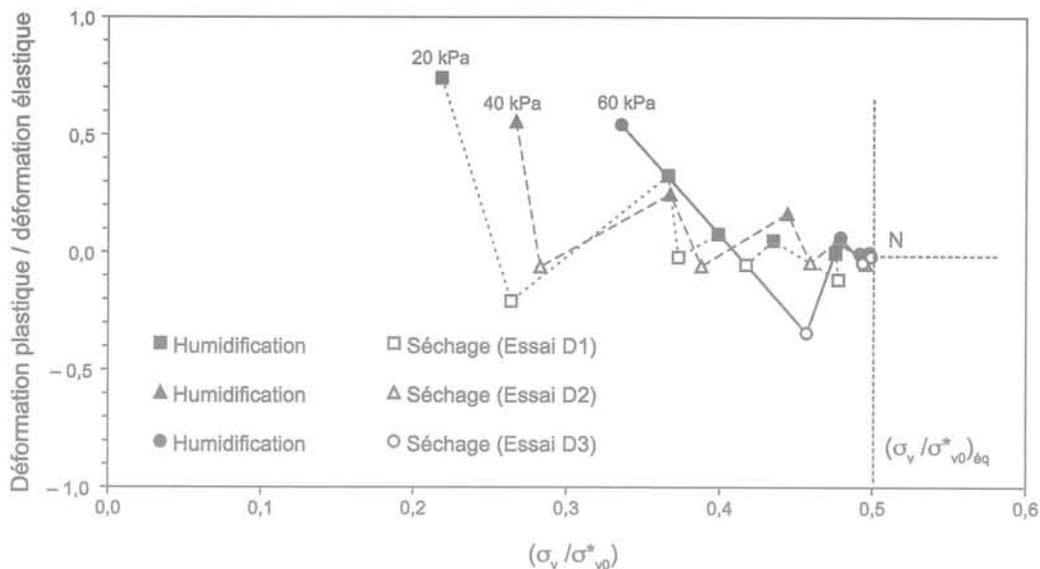


FIG. 14 Évolution des déformations plastiques lors des cycles de séchage/humidification pour le sol naturel du Deffend.

Evolution of the plastics strains during the wetting and drying cycles for the natural soil of Le Deffend. Evolution of the plastics strains during the wetting and drying cycles for the natural soil of Le Deffend.

6

Conclusion

Dans cet article sont présentés les résultats d'une campagne d'essais réalisée dans des œdomètres osmotiques sur deux matériaux compacté et naturel.

Dans un premier temps, l'influence des cycles d'humidification/séchage sur le comportement hydromécanique d'un mélange de bentonite-limon compacté a été étudiée. L'application de plusieurs cycles hydriques sur ce sol gonflant à l'état non saturé, en induisant un retrait cumulé, permet de le rigidifier et de lui attribuer un comportement élastique.

Dans un second temps, les cycles de d'imbibition dessiccation appliqués sur le sol argileux du site du

Deffend ont induit un gonflement cumulé, ce qui a ramolli ce matériau tout en le mettant dans un état élastique réversible.

Il est difficile de prévoir *a priori* si les cycles de succion vont engendrer un retrait ou un gonflement cumulé dans un matériau. En revanche, le modèle BExM permet d'analyser le comportement du sol lors de ce type de sollicitation et d'expliquer l'existence d'un état d'équilibre au terme d'un ensemble de cycles appliqués.

REMERCIEMENTS

Une partie de ces travaux a été réalisée dans le cadre du projet de recherche national : Analyse du retrait-gonflement et de ses incidences sur les constructions (ARGIC) financé par l'Agence nationale de la recherche (ANR).

- Al-Homoud A.S., Basma A.A., Husein Malkawi A.I., Al Bashabsheh M.A. - Cyclic swelling behavior of clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 121, 1995, p. 562-565.
- Alonso E.E., Gens A., Hight D.W. - General report. Special problem soils. *Proceedings of the 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Dublin, vol. 3, 1987, p. 1087-1146.
- Alonso E.E., Gens A., Josa A. - A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique*, vol. 40, 1990, p. 405-430.
- Alonso E.E., Vaunat J., Gens A. - Modeling the mechanical behaviour of expansive clays. *Engineering Geology*, vol. 54, 1999, p. 173-183.
- Alonso E.E., Romero E., Hoffmann C., García-Escudero E. - Expansive bentonite/sand mixtures in cyclic controlled suction drying and wetting. *Engineering Geology*, vol. 81, 2005, p. 213-226.
- ASTM D 5298-94 - Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper, vol. 4.09, 1995 a, p. 154-159.
- ASTM D 4546-90 - One-dimensional swell or settlement potential of cohesive soils, vol. 4.08, 1995 b, p. 693-699.
- Atabek R.B., Felix B., Robinet J.-C., Lahlou R. - *Rheological behaviour of saturated expansive clay materials*. Workshop on stress partitioning in engineered clay barriers, Duke University, Durham, NC, 1991.
- Chu T.Y., Mou C.H. - Volume change characteristics of expansive soils determined by controlled suction tests. *Proc. 3rd Int. Conf. Expansive Soils*, Haifa, vol. 2, 1973, p. 177-185.
- Cui Y.J., Yahia-Aissa M., Delage P. - A model for the volume change behavior of heavily compacted swelling clays. *Engineering Geology*, vol. 64, 2002, p. 233-250.
- Cuisinier O., Masroufi F. - Hydromechanical behavior of a compacted swelling soil over a wide suction range. *Engineering Geology*, vol. 81, 2005, p. 204-212.
- Day R.W. - Swell-shrink behavior of compacted clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 120, 1994, p. 618-623.
- Dif A.E., Bluemel W.F. - Expansive soils under cyclic drying and wetting. *Geotechnical Testing Journal*, vol. 14, 1991, p. 96-102.
- Delage P., Lefebvre G. - Study of the structure of a sensitive Champlain clay and of its evolution during consolidation. *Revue canadienne de géotechnique*, vol. 21, 1984, p. 21-35.
- Delage P., Suraj Da Silva G.P.R., De Laune E. - Suction controlled testing of non-saturated soils with an osmotic consolidometer. *Proc. of the 7th Int. Conf. on Expansive Soils*, Dallas, 1992, p. 206-211.
- Delage P., Howat M.D., Cui Y.J. - The relationship between suction and the swelling properties in a heavily compacted swelling clay. *Engineering Geology*, vol. 50, 1998, p. 31-48.
- Gallipoli D., Gens A., Sharma R., Vaunat J. - An elasto-plastic model for unsaturated soil incorporating the effects of suction and degree of saturation on mechanical behaviour. *Géotechnique*, vol. 53, n° 1, 2003, p. 123-135.
- Gens A., Alonso E.E. - A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays. *Revue canadienne de géotechnique*, vol. 29, 1992, p. 1013-1032.
- Kassif G., Ben Shalom A. 1971. Experimental relationship between swell pressure and suction. *Géotechnique*, vol. 21, 1971, p. 245-255.
- Karube D., Kato S. - Yield functions of unsaturated soils. *Proc. of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol. 1, 1989, p. 615-618.
- Kohgo Y., Nakano M., Miyazaki T. - Elastoplastic constitutive modelling for unsaturated soils. *Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Balkema, 1991, p. 631-636.
- Pousada E. - *Deformabilidad de arcillas expansivas bajo succión controlada*. Doctoral Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, Espagne, 1984.
- Push R. - Mineral-water interactions and their influence on the physical behaviour of highly compacted Na-bentonite. *Revue canadienne de géotechnique*, vol. 19, 1982, p. 381-387.
- Roscoe K.H., Burland J.B. - On the generalized stress-strain behaviour of the wet clay. Heyman J., Leckie F.A. (Eds), *Engineering Plasticity*, Cambridge University Press, Cambridge, 1968, p. 535-609.
- Romero E., Lloret A., Gens A. - Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated Boom clay. *Engineering Geology*, vol. 54, 1999, p. 117-127.
- Subba Rao K.S., Rao S.M., Gangadhara S. - Swelling behaviour of a desiccated clay. *Geotechnical Testing Journal*, vol. 23, n° 2, 2000, p. 193-198.
- Tripathy S., Subba Rao K.S., Fredlund D.G. - Water content - Void ratio swell-shrink paths of compacted expansive soils. *Revue canadienne de géotechnique*, vol. 39, n° 4, 2002, p. 938-959.
- Vincent M., Bouchut J., Fleureau J.-M., Masroufi F., Oppenheim E., Heck J.V., Ruaux N., Le Roy S., Dubus I., Surdyk N. - *Étude des mécanismes de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux et de ses interactions avec le bâti*. Rapport final du projet RGC&U, BRGM/RP-54862-FR, octobre, 2006.
- Wheeler S.J., Sharma R.S., Buisson M.S.R. - Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behaviour in unsaturated soils. *Géotechnique*, vol. 53, n° 1, 2003, p. 41-54.

Pathologie des fondations superficielles sur sols argileux retour d'expérience en Midi-Pyrénées

C. JACQUARD

FONDASOL
BP 767

84035 Avignon CEDEX 3

catherine.jacquard@fondasol.fr

Résumé

Indépendamment des phénomènes de déformation des sols argileux liés aux variations de contraintes dues aux constructions d'ouvrages, le retrait et/ou le gonflement de certains sols argileux sont directement liés aux variations de leur teneur en eau.

L'amplitude de ces variations sera fonction de la nature de l'argile, de sa proportion dans le squelette des sols, de la structure de ce sol, de son épaisseur et bien entendu des gradients de succion ou d'hydratation qui lui seront imposés.

A partir d'une importante base de données sur les sols argileux de Midi-Pyrénées, ce document fait la synthèse des connaissances de ces problèmes.

Mots-clés : retrait-gonflement- argiles gonflantes- pathologie des fondations superficielles- Région Midi-Pyrénées.

Shallow foundations on clayey soils pathology out of experience in Midi-Pyrenees area

Abstract

Independently of movements due to building and associated pressures on soil, most of clayey soils are susceptible to shrinkage or swelling, which depend of moisture content variations.

The oscillation of these variations depends on the type of clay minerals, of its proportion contained in the soil, of the structure of the soil, of the thickness of its layer, and of course of the gradients of suction or moisture imposed to it.

From a huge series of data on clayey soils in Midi-Pyrenees area, this article is a synthesis of knowledge.

Key words: Shrinkage-swelling-swelling clays- shallow foundations pathology- Midi-Pyrenees area

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 30 avril 2008.

Ce document concerne spécifiquement la pathologie des fondations sur les formations molassiques en région Midi-Pyrénées, par retrait et gonflement.

155

Cet article présente les moyens de caractériser le potentiel de retrait et de gonflement des sols argileux, établi à partir des données d'études de diagnostic géotechnique sur des maisons individuelles, effectuées par la société SORES entre 1992 et 1996 en région Midi-Pyrénées et dont les résultats nous ont été communiqués par André Bedin, alors directeur de la SORES, que je tiens ici à remercier tout particulièrement.

1

Reconnaître les sols gonflants

1.1

Étude minéralogique

La connaissance de la minéralogie des argiles constitutives d'un sol peut se faire à partir du diffractomètre à rayon X et du microscope à balayage électronique (MEB). L'acquisition de ces matériels est coûteuse, et les bureaux d'étude géotechnique n'en sont généralement pas équipés. Ces identifications permettent néanmoins de caractériser la nature, la structure, et l'état de porosité de l'argile, et donc d'avoir une idée du potentiel de retrait et de gonflement du sol, mais sans aucune indication sur l'amplitude et la quantification du phénomène.

1.2

Analyses granulométrique et sédimentométrique

Ces mesures de la répartition pondérale de la dimension des grains du sol sont nécessaires pour quantifier la proportion d'argile : % passant au tamis de 2µm (également appelé C_2), obtenue par la sédimentométrie.

1.3

Limites d'Atterberg

Ces mesures donnent la limite de plasticité W_p , la limite de liquidité W_L , et l'indice de plasticité $I_p = W_L - W_p$.

Toutes les recherches effectuées montrent que les sols gonflants se trouvent classés au-dessus de la droite A dans le diagramme de Casagrande, ce qui apporte peu d'information sur le risque potentiel d'une argile : on indique sur la figure 1 les limites d'Atterberg en regard des coefficients de gonflement C_g (voir § 1.5) mesurés en région Midi-Pyrénées. Les sols peuvent présenter un fort risque de gonflement dès lors que $W_L > 35$ pour les points au-dessus de la droite de Casagrande. Sur les sols courants, D. Lautrin (1987) montre que, dès lors que le sol présente moins de 25 à 30 % d'argile, les limites d'Atterberg ne sont pas significatives de la composition minéralogique des argiles du sol, ni de la sensibilité à l'eau de ce sol.

1.4

Surface spécifique et valeur au bleu de méthylène VBS

La surface spécifique est la surface cumulée des plaquettes dans une certaine quantité de sol ; elle s'exprime en m^2/g . La surface spécifique externe correspond au niveau interparticulaire, tandis que la surface spécifique interne correspond au niveau interfoliaire.

Illite	70 à 140 m^2/g	interparticulaire (filler calcaire ~ 1 m^2/g)
Montmorillonite	800 m^2/g	interfoliaire+ interparticulaire

L'essai le plus courant, et le plus simple pour mesurer cette surface est actuellement l'essai d'absorption au bleu de méthylène qui représente le mieux la surface active des argiles :

$S_a = 20,93$ VBS (20,93 = surface correspondant à 1 cm^3 de bleu de méthylène).

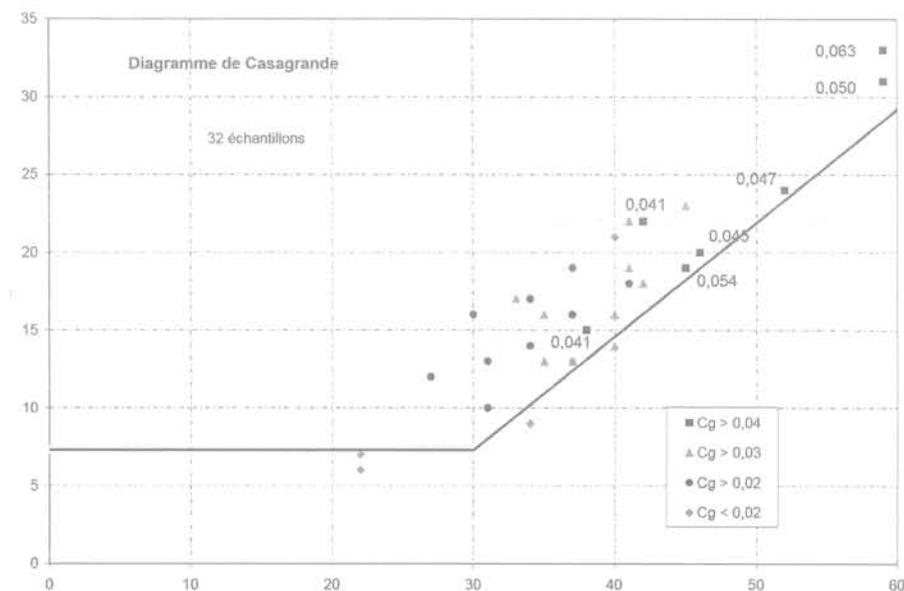


FIG. 1 Limites d'Atterberg et coefficient de gonflement C_g pour les sols d'origine molassique, région Midi-Pyrénées.

Cette mesure donne ainsi la quantité et l'activité de la fraction argileuse. Les recherches et études de D. Lautrin (1989) l'ont conduit à une classification à partir du pourcentage de passant à 2 μm (C_2) et la valeur au bleu (VBS) sur le matériau 0/D (voir tableau I) :

$$A_{CB} = 100 \text{ VBS}/C_2 \quad (1)$$

TABLEAU I Activité des argiles (d'après D. Lautrin).

A_{CB}	Activité des argiles
> 18	Nocives
13 à 18	Très actives
8 à 13	Actives
5 à 8	Normales
3 à 5	Peu actives
1 à 3	Inactives
< 1	Sols non argileux

Cette classification permet également d'avoir une indication sur la nature de l'argile constitutive du sol.

On rappelle qu'il y a lieu de distinguer la valeur au bleu VB mesurée sur la fraction fine du sol (passant à 80 μm), et la valeur de bleu VBS mesurée par les géotechniciens (NFP 94-068) correspondant à la valeur de bleu de la fraction 0/50mm du sol. Ces deux mesures sont identiques pour des sols purement limoneux et argileux (sols fins).

1.5

Mesure de la pression et du coefficient de gonflement C_g

La pression de gonflement est la mesure de la pression exercée par le matériau mis en présence d'eau, lorsque tout déplacement est empêché. Cette pression dépend de l'état hydrique du sol au moment de l'essai. Il existe d'autres modes opératoires que nous ne

développerons pas ici. En laboratoire, on réalise l'essai à l'oedomètre sur échantillon intact, par mesure de la variation du volume des vides en fonction du logarithme de la contrainte appliquée.

On sait, depuis G. Philipponnat (1978), relativement bien corréler le risque pathologique, à la pente de retour lors du déchargement C_g (voir tableau II).

TABLEAU II Risque de gonflement (d'après G. Philipponnat).

Coefficient de gonflement C_g	Risque de gonflement
> 0,05	Certain
0,05- 0,04	Très grand
0,03-0,04	Grand
0,02-0,03	Possible
< 0,02	Peu probable

L'essai oedométrique révèle également la surconsolidation liée à l'évaporation et à l'évapotranspiration, par le rapport de la contrainte de préconsolidation $\sigma'_{p'}$ à la contrainte à la profondeur de prélèvement σ'_{vo} (voir figure 2).

La pression de gonflement doit être comparée à la contrainte de service au sol sous fondation (et dallage) ; les sols de la région toulousaine ont des pressions de gonflement de l'ordre de 100 à 150 kPa pour une dessiccation correspondant à un degré de saturation de 85 à 90 %.

Il a été établi pour des argiles d'altération molassique une bonne corrélation entre ce coefficient de gonflement C_g et la valeur de bleu (voir figure 3), ainsi qu'entre C_g et le produit $\text{VBS} \times C_2$ (voir figure 4, établie par Bedin, 1999 sur le graphique de classification de Magnan, 1989). On pourra ainsi retenir que, sans dispositif de protection adapté, dès lors que $\text{VBS} \times C_2 > 100$, le risque de désordre est certain et, lorsque $\text{VBS} \times C_2 < 50$, le risque est peu probable.

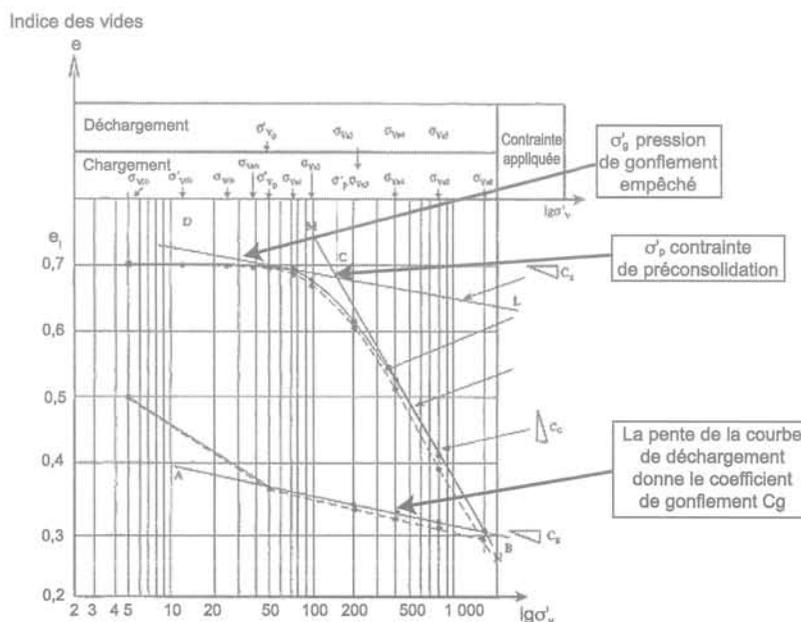


FIG. 2 Procès-verbal d'essai oedométrique sur sol gonflant.

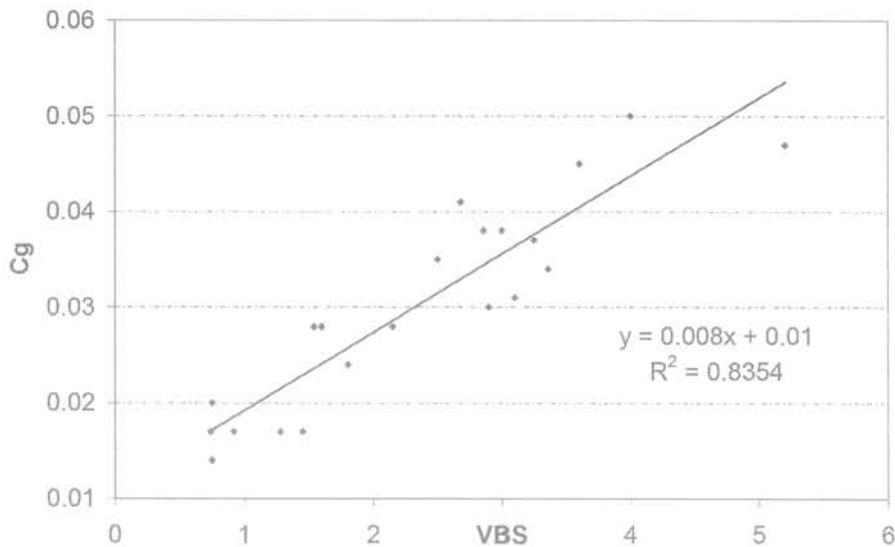


FIG. 3 Sols de la région Midi-Pyrénées : corrélation VBS/Cg.

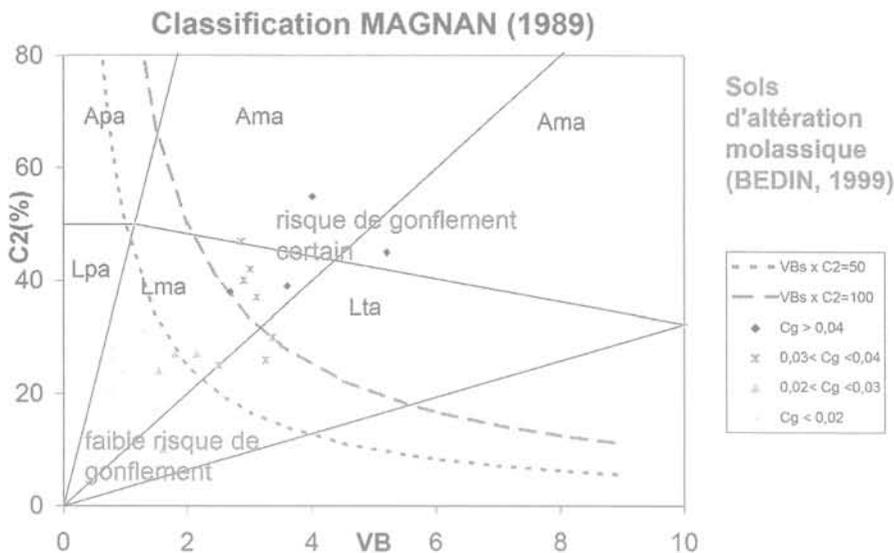


FIG. 4 Sols de la région Midi-Pyrénées : classification Magnan (VB-C₂) et corrélation Bedin (VBs x C₂)

1.6

Mesure du retrait

Cet essai, réalisé sur un échantillon intact (XP P94-060-2), permet de déterminer la limite de retrait effective du sol (W_{re}), c'est à dire la limite en deçà de laquelle la perte d'eau n'entraîne plus de rétractance, et où la matrice argileuse du sol se désature. La pente de la droite permet aussi de quantifier les variations dimensionnelles entre l'état de teneur en eau naturelle W_{nat} et un état de dessiccation donné, cette pente s'appelle le retrait linéaire : RI (voir figure 5).

Le seuil de risque est avéré lorsque $RI > 0,3$ associée à une large plage de retrait potentiel ($W_{nat} - W_{re} > 10$).

Cet essai permet d'estimer le tassement des fondations, dû à la rétractance par dessiccation.

Sur les sols d'altération d'origine molassique, les corrélations du retrait linéaire avec la valeur de bleu (VBS) ou l'activité de l'argile (A_{CB}) ne sont pas signifi-

catives. En revanche, on a pu indiquer le potentiel de retrait, en fonction du poids volumique sec et de l'état de teneur en eau (voir ci-après).

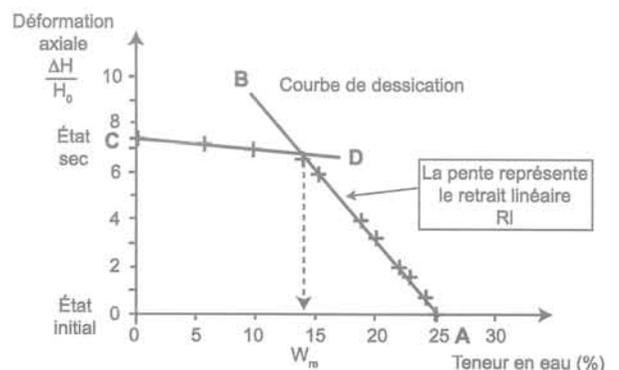


FIG. 5 Procès-verbal d'essai de retrait.

Mesure de la masse volumique du sol et de sa teneur en eau

C'est un essai de laboratoire des plus simples, mais qui nécessite le prélèvement d'un échantillon intact ; il donne :

- le poids volumique du sol sec γ_d , et la teneur en eau du sol W ;
- l'état de dessiccation des sols par le calcul du degré de saturation S_r déduit de ces deux mesures. Sa valeur normale à partir de 50 à 70 cm de profondeur est de 92 à 98 %, et naturellement 100 % à proximité et sous la nappe. Des valeurs inférieures à 80 % reflètent une dessiccation importante.

Sur les sols d'origine molassique étudiés, le diagramme $W-\gamma_d$ permet de caractériser la zone des sols à risque (voir figure 6).

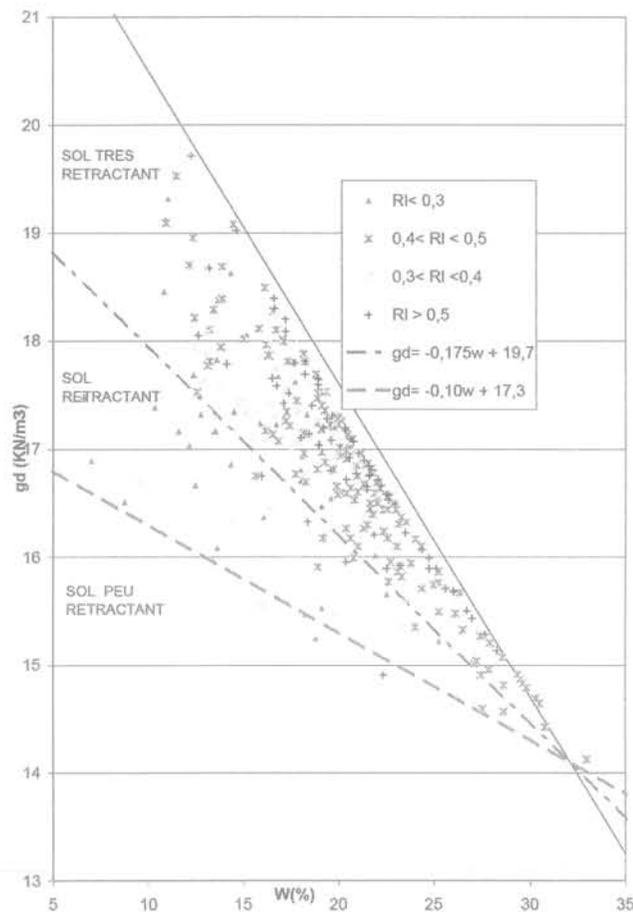


FIG. 6 Diagramme $w-\gamma_d$ pour les sols d'origine molassique, région Midi-Pyrénées.

Les analyses statistiques effectuées en région toulousaine ont par ailleurs permis de tenter une approche de la sensibilité à partir d'un coefficient de dessiccation C_d caractérisant la variation de poids volumique sec pour une variation de teneur en eau imposée à un échantillon intact (Bedin, 1999) :

$$C_d = \Delta\gamma_d / \Delta W \quad (2)$$

On peut ainsi indiquer en fonction de la valeur :

- $C_d > 0,185$: sols très sensibles ;
- $C_d < 0,12$: sols peu sensibles.

Cet essai nécessite plusieurs mesures de poids volumique en laissant baisser la teneur en eau ; mode opératoire qui se rapproche de celui de l'essai de dessiccation.

Essais *in situ*

En aucune manière les essais *in situ* ne permettent de qualifier ou quantifier ces phénomènes d'argiles actives, tout au plus peuvent-ils renseigner sur l'homogénéité de dessiccation autour d'une construction et la profondeur d'action de cette dessiccation.

Deux appareils sont couramment utilisés : le pénétromètre et le pressiomètre.

Les essais de pénétration dynamique sont des essais simples et peu onéreux pour connaître la profondeur de dessiccation (Fig. 7a et 7b), mais ce sont des essais aveugles vis-à-vis de la nature des sols traversés, et significatifs jusqu'à une profondeur limitée, du fait des frottements parasites sur le train de tiges. Le pénétromètre statique donne des résultats équivalents, mais les camions lourds généralement utilisés les rendent peu pratiques pour caractériser la pathologie des maisons individuelles. Ces essais doivent être réalisés en parallèle à des sondages permettant de connaître la nature des sols ainsi traversés.

Les essais pressiométriques donnent la pression limite Pl du sol, et son module pressiométrique E_M . La pression limite est peu affectée par la dessiccation, en revanche celle-ci va faire augmenter le module : lorsque le rapport E_M/Pl est, dans des argiles, supérieur à 14 ou 16, il y a surconsolidation du sol liée à la dessiccation. C'est par ailleurs le seul essai qui permette de déterminer le frottement latéral q_s à prendre en compte pour le dimensionnement des micropieux, lorsqu'une reprise en sous-œuvre s'avère nécessaire.

Profil hydrique d'un sol et perturbations créées par les constructions

Sous une construction il y aura perturbation du profil hydrique du centre vers le bord. Au centre de la construction, le degré de saturation aura tendance à croître, et la nappe à remonter si elle est proche. En l'absence de nappe, l'eau aura tendance à migrer de la périphérie vers le centre après chaque période pluvieuse, et au centre les sols se satureront progressivement.

En périphérie, les sols vont subir les variations climatiques, les angles étant les plus exposés.

C'est ainsi que, sur un sol gonflant, on obtient à moyen terme (5 à 7 ans) :

- un maximum de gonflement au centre (mouvement lent et continu) ;
- un gonflement minimum dans les angles ;
- un gonflement intermédiaire le long des murs.

Au départ la situation peut être inverse en fonction de l'époque de construction. En particulier si la construction est faite en saison sèche, c'est la périphérie qui aura tendance à gonfler au départ, alors que le centre ne bougera pas.

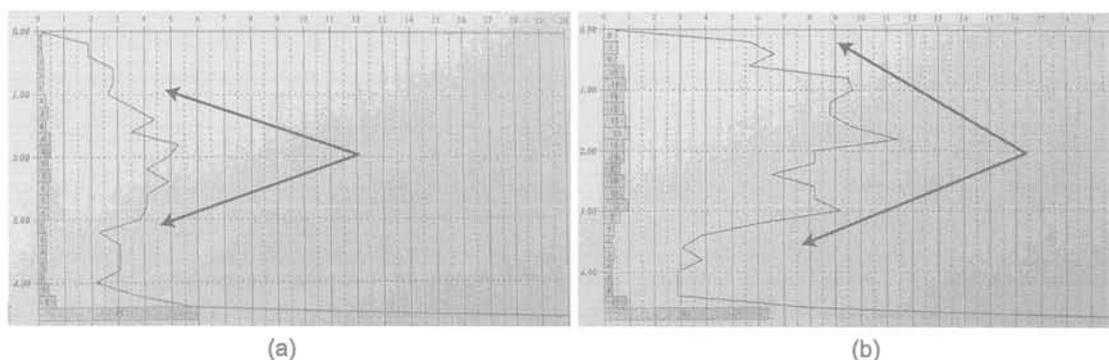


FIG. 7 Essais au pénétromètre dynamique.
a) Faible dessiccation entre 1 m et 3 m ; b) Forte dessiccation de 0,5 m à 3 m.

Les constructions sur sol argileux sensibles à l'eau seront donc soumises à des mouvements différentiels à court terme et à long terme. La forme des fissures dépendra de la rigidité de la structure et pourra évoluer avec le temps.

3

Désordres liés aux sols sensibles

3.1

Directions principales des fissures

Les deux formes principales de fissuration sont des déformations de flexion et de cisaillement.

Les fissures de cisaillement vont se rencontrer sur les structures type portique, les fissures de flexion sur les murs insuffisamment rigides au sommet ou à la base (fissure en queue de billard).

En général, s'il s'agit de sols gonflants, le mouvement est alternatif avec une évolution progressive générale. Ces mouvements sont très néfastes pour les constructions ; elles produisent à long terme une extension du réseau des fissures, contribuant au démantèlement de la structure dont la rigidité et la capacité de résistance au tassement différentiel diminue au cours du temps.

La dessiccation se traduit souvent par une ouverture au niveau de l'arase sanitaire.

Il n'est pas possible pour le spécialiste de confondre les désordres dus aux phénomènes de retrait/gonflement avec ceux provenant de tassements de consolidation ou de mouvements de grande ampleur comme les glissements ou les fluages.

Cependant, certaines fissures de structure (retrait thermique) peuvent se confondre avec des fissures de fondation ; de même sur les carrelages il est souvent difficile de visu, de distinguer les fissures inhérentes aux mouvements des fondations de celles propres à un défaut de pose (effet d'étau ou déformation de l'isolant).

Contrairement aux tassements de consolidation, les mouvements provenant de sols gonflants ne se stabilisent pas.

3.2

Valeurs admissibles des déformations différentielles

Les constructions modernes élancées et rigides s'accorderont mal aux tassements différentiels et la valeur maximale du 1/1 000 de la portée devrait être respectée pour la pérennité des structures.

En ce qui concerne une maison individuelle classique, avec un ou pas de plancher, des chaînages verticaux d'angle et un chaînage horizontal sous charpente, sa rigidité est quasi nulle vis-à-vis des tassements différentiels. Les dénivellations doivent être limitées à 1/500 de la portée, avec un seuil maximum de 1 cm pour éviter les désordres sur les cloisonnements.

Sur sol gonflant, cette valeur est extrêmement difficile à respecter en raison des variations d'humidité sous la construction et des variations cycliques sur les bords, et des faibles contraintes apportées au sol.

3.3

Déformation des dallages

Il s'agit d'une fondation superficielle peu chargée et qui par conséquent souffrira le plus des problèmes, d'autant qu'il se cumule le problème d'exécution (nature de la forme, compactage sur les bords, ferrailage, épaisseur du béton, et problème des isolants).

La pathologie sera d'autant plus importante que le dallage est dissocié des murs ; dans certains cas, seul l'intérieur de la construction est sinistré, alors que la coque extérieure est intacte.

4

Étude statistique de la pathologie en Midi-Pyrénées

Cette étude statistique a été menée entre 1997 et 1999 par SORES sur environ 400 cas pathologiques en région Midi-Pyrénées.

Paramètres concernant la construction

4.1.1

Age de la construction

Les sinistres concernent les constructions relativement récentes (10 à 30 ans) mais environ 16 % concernent les constructions anciennes (> 100 ans) dont les murs se prolongent en fondation sans élargissement (voir figure 8).

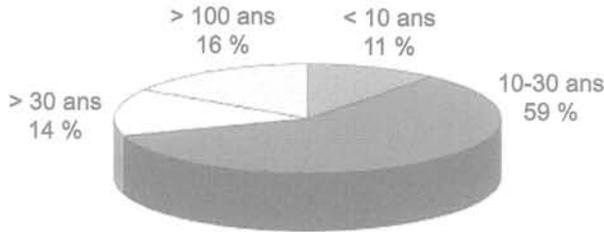


FIG. 8 Répartition de l'âge des constructions affectées.

4.1.2

Type de constructions (nombre de niveaux)

Pratiquement, seuls les bâtiments R + 0 et R + 1 sont affectés (Fig. 9), ceci pour deux raisons :

- la transmission des charges au sol est faible et la dissipation des contraintes est très rapide en profondeur ;
- la rigidité des bâtiments à plusieurs niveaux est généralement plus grande, avec possibilité de report de charge en cas de tassement différentiel.

4.1.3

La rigidité de la structure

Aucune construction traditionnelle de maison individuelle n'est dimensionnée avec possibilité de dénivellations d'appuis, tels que tassements différentiels. En revanche, une construction en R + 0 comportant deux planchers aura moins à souffrir et développera des fissures (fissures horizontales) beaucoup moins pénalisantes qu'une maison sur dallage dissocié des murs, et plafond suspendu.

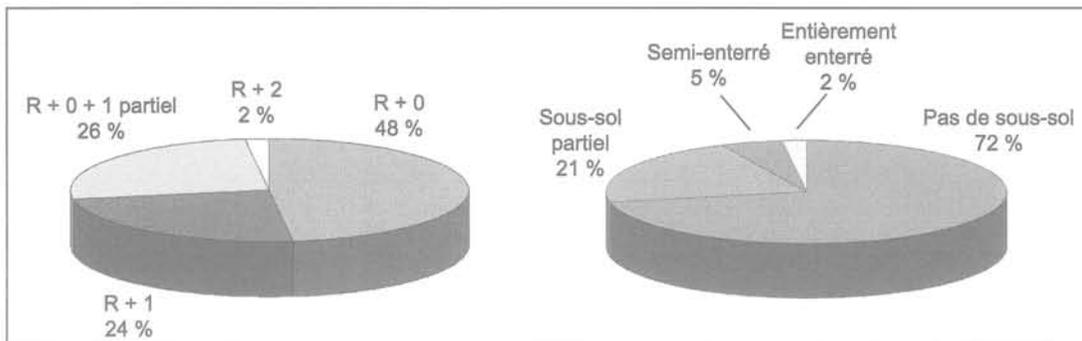


FIG. 9 Types de bâtiments concernés par la pathologie.

4.1.4

Les sous-sols

Les désordres affectent principalement les bâtiments sans sous-sols et ceux avec un sous-sol partiel, qu'il s'agisse de terrain horizontal ou en pente, le sous-sol atteint des niveaux hors perturbation hydrique, ce qui n'est pas le cas pour les autres fondations.

Les désordres très classiques se retrouvent dans le cas de sous-sol partiel au raccordement de la partie en sous-sol avec une partie en rez-de-chaussée, dans la zone traversant la fouille du sous-sol.

Dans la hauteur du sous-sol la pression de gonflement peut s'additionner à la poussée des terres, et aussi créer des efforts dissymétriques sur les voiles enterrés.

4.1.5

Encastrement des fondations

Sur l'étude statistique menée dans la région Midi-Pyrénées (Fig. 10), il apparaît que la pathologie concerne

pour plus de 50 % des cas des fondations comprises entre 0,5 et 0,9 m : une profondeur d'encastrement de 1 m ne paraît donc pas suffisante pour rester à l'abri des variations hydriques.

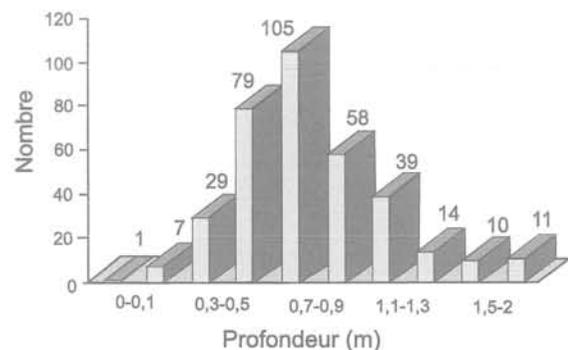


FIG. 10 Profondeur des fondations des maisons sinistrées.

Dans environ 10 % des cas, la profondeur hors-gel n'est pas respectée : il s'agit essentiellement de maisons

anciennes pour lesquelles le mur se prolonge de quelques dizaines de centimètres dans le sol.

Dans 10 % des cas – encastrement inférieur à 50 cm –, la malfaçon est le paramètre déterminant : la sécheresse vient révéler le problème.

Actuellement on constate un approfondissement graduel de la dessiccation qui sur un même site est passée de 0,80 m après la sécheresse de 1989-1991, à 1,3 m après la canicule de 2003.

L'encastrement minimal, dit de fond de cave (ou sous le niveau du vide sanitaire), sur des sols argileux ne devrait donc pas être inférieur à 1,30 m, avec de plus une bonne protection périphérique (trottoir et chenaux), et sur un terrain correctement assaini.

En présence d'arbres, cet encastrement doit être beaucoup plus important.

L'excentrement de la maçonnerie sur la fondation peut être le paramètre déterminant du sinistre, associé à un mur haut non contreventé.

Par ailleurs, et même s'il n'y a pas de règles formelles, on considère qu'une fondation béton de $H < 60$ cm et/ou $B < 50$ cm ne peut jouer son rôle de répartition des efforts, en fonction de l'hétérogénéité de portance du sol d'assise. Si les risques existent, le ferrailage doit être supérieur au minimum prescrit par les règles du béton armé.

4.1.6

Période de construction

Il est constaté que si la construction est faite en période très humide ou très sèche, les déformations des angles les plus exposés peuvent se produire rapidement (année suivante).

A une période intermédiaire, l'évolution est très lente, elle entraîne dans la structure des contraintes parasites qui se développent peu à peu jusqu'à la limite de rupture.

4.2

Paramètres statistiques concernant le sol

4.2.1

Identification des sols

A partir des essais classiques d'identification des sols à savoir granulométrie et sédimentométrie donnant le pourcentage d'argile C_2 , et la valeur au bleu de méthylène VBS, il a été mis en évidence les corrélations suivantes sur les argiles du Midi-Pyrénées :

- suivant la classification proposée par Magnan, les sols étudiés sont essentiellement des limons argileux ; l'identification (VBS, C_2) donne une bonne indication sur la sensibilité des sols au phénomène de gonflement (Fig. 4), mais ne permet de quantifier le risque : pour le faire il faut réaliser des essais spécifiques : mesure de la pression et du coefficient de gonflement à l'oedomètre par exemple ;

- il n'a pu être mis en évidence une corrélation nette entre VBS, IP, C_2 et retrait linéaire ; en revanche on peut indiquer la sensibilité à la dessiccation à partir de γ_d et W ; l'essai de retrait sur échantillon intact demeure cependant la mesure la plus précise.

4.2.2

Risque de gonflement

Sur l'ensemble des cas étudiés, la répartition des coefficients de gonflement est une gaussienne centrée sur : $C_g = 0,03-0,04$ (Fig. 11). Majoritairement, la pression de gonflement P_g est faible (Fig. 11) et souvent même, inférieure à la contrainte de service, ce qui implique dans ces cas, la non réversibilité du phénomène de retrait, et conditionne la méthode de réparation.

4.2.3

Retrait linéaire

Sur l'ensemble des cas étudiés, la répartition du retrait linéaire indique plus de 86 % de valeurs supérieures à 0,3 (voir figure 12), ce qui confirme le risque avéré au-delà de ce seuil, mais doit être tempéré par la plage de variation hydrique potentiel.

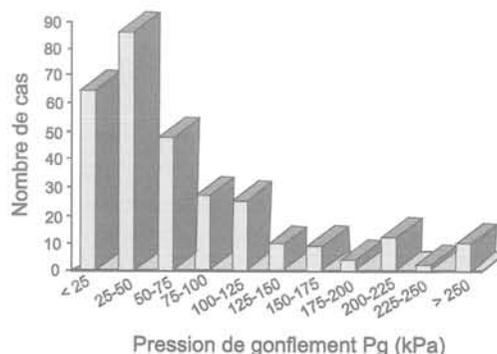
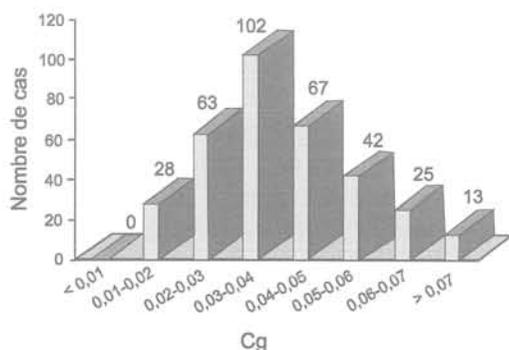


FIG. 11 Sols de la région Midi-Pyrénées : coefficients de gonflement C_g et pressions de gonflement P_g mesurés.

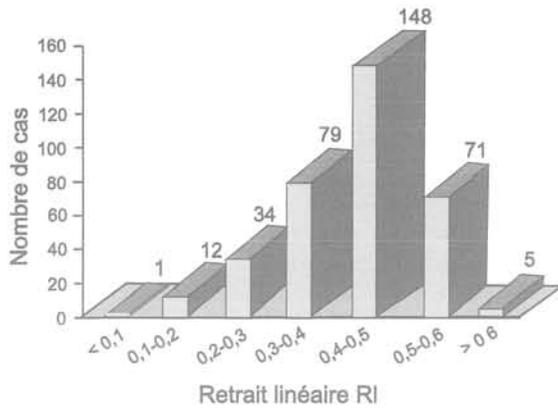


FIG. 12 Sols de la région Midi-Pyrénées : retrait linéaire mesuré.

4.2.4

Lithologie et dessiccation

Plus les sols argileux de couverture sont épais, plus les risques liés à la dessiccation sont importants, surtout en présence de végétation. Si les essais de pénétration détectent bien les zones surconsolidées subissant la dessiccation, ils doivent être combinés avec un sondage permettant l'établissement d'un profil lithologique (tarière ou carottage), voire d'un profil hydrique.

4.2.5

Portance des sols, compressibilité

La contrainte de service sous les fondations des maisons individuelles est toujours faible, puisqu'en général une contrainte admissible de 100 à 120 kPa est suffisante. L'indice de compression C_c mesuré à l'oedomètre est dans une majorité des cas compris entre 0,1 et 0,2 ce qui correspond à des sols faiblement à moyennement compressibles, de plus généralement dans un état plutôt surconsolidé. Il n'y a donc pas de problème de compressibilité sur ce type de sols.

4.2.6

Homogénéité de l'assise des fondations

Il est rare d'avoir d'importantes variations lithologiques sous une construction sur terrain plat et horizontal ; en revanche, sur terrain en pente, le modelage des terres va créer l'hétérogénéité : les fondations aval doivent être approfondies pour le respect de l'homogénéité des fondations. De même, avec un sous-sol partiel, les terrassements peuvent découvrir des sols de nature hétérogène.

4.2.7

Pente du terrain

Le cycle retrait/gonflement participe sur la pente au phénomène de reptation, celui-ci est considérablement accéléré en période d'accidents climatiques par approfondissement de la fissuration de retrait.

4.3

Les actions extérieures

4.3.1

Les variations hydriques

Elles peuvent être provoquées par :

- l'assainissement général en périphérie vis à vis des eaux météoriques et des eaux de nappe (topographie générale du site) ;
- la protection des fondations (trottoir-chenaux) ;
- l'urbanisation qui peut provoquer dans certains cas, le gonflement des argiles surconsolidées si la nappe est proche ; dans d'autres, au contraire, un retrait par dessiccation des eaux évacuées au pluvial, ou un rabattement général de la nappe.

On peut également rencontrer des actions accidentelles provoquant des variations de teneur en eau, génératrices de désordres : fuites de conduites, pertes d'eau des fosses, chauffage.

4.3.2

La végétation

La végétation va considérablement approfondir le profil hydrique du terrain vierge et donc amplifier le phénomène de retrait.

Par ailleurs, l'action de succion des racines est saisonnière. De plus, les racines se dirigent dans les zones humides, c'est-à-dire sous la construction : leur action est ainsi géométriquement limitée sous la construction et va contribuer au tassement différentiel.

Les arbres sont classés par leur coefficient d'agressivité, le plus agressif étant le chêne également en Midi-Pyrénées (voir tableau III), avec des racines ou radicelles susceptibles de descendre parfois à 10 m de profondeur ! En fait, tout arbre situé à moins de 1 à 1,5 fois sa hauteur adulte est agressif vis-à-vis des fondations superficielles sur sols argileux. Les haies même de faible hauteur sont également très nocives.

Sur les cas étudiés en Midi Pyrénées, la répartition des espèces végétales ayant provoqué ou aggravé le

TABLEAU III Espèces d'arbres agressives (suivant Cutler, *Tree roots and buildings*, 1989).

Espèce	Hauteur moyenne (m)	Distance des désordres	Coefficient d'agressivité
Chêne	20	30	5,5
Peuplier et frêne	18 à 25	20 à 30	2,7
Acacia, marronnier, tilleul, saule	20	20	1,4
Aubépine, hêtre, platane	10 à 25	15	1,0
Pommier, poirier	10	10	0,8
Cerisier, prunier, bouleau, cyprès, orne	10 à 20	10 à 20	0,4

sinistre, présenté figure 13 correspond aux espèces habituellement agressives.

Les fondations neuves, tout comme les reprises en sous-œuvre devront descendre en dessous du système racinaire, et prendre en compte les effets parasites générés par leur action cyclique. On peut également limiter leur effet par interposition d'écrans anti-racines, qui doivent descendre également sous la base du système racinaire, ce qui rend parfois difficile et onéreuse leur mise en œuvre.

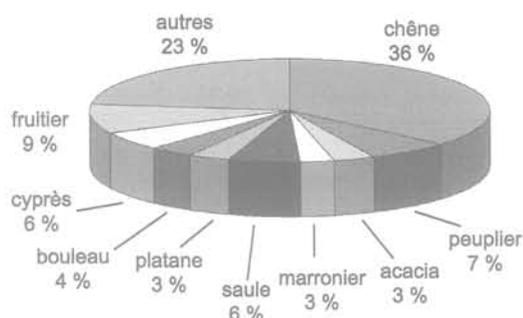


FIG. 13 Répartition des espèces végétales, causes de pathologie en Midi-Pyrénées.

Bien souvent la proximité des arbres est l'élément déterminant des désordres, la sécheresse n'étant plus qu'un paramètre aggravant ; ce phénomène est caractéristique lorsque les mouvements sont limités aux façades exposées aux arbres, alors que la sécheresse généralise les désordres sur l'ensemble de la construction.

4.4

Récapitulatif des causes déterminantes

Les causes déterminantes retenues pour expliquer la pathologie sont résumées dans le tableau IV. Globalement sur 389 cas pathologiques étudiés, la sensibilité

des sols d'assise au phénomène de retrait par dessiccation est un des paramètres déterminants dans 92 % des cas, mais l'influence d'une végétation proche des constructions est un phénomène aggravant considérable (70 % des cas). Dans 50 % des cas, on observe que les fondations ont une profondeur d'encastrement de moins de 90 cm, dont 27 % sont néanmoins supérieures à 70 cm, c'est-à-dire hors gel, ce qui indique clairement qu'en dehors d'une protection efficace contre les variations hydriques une profondeur d'assise plus importante est nécessaire pour éviter des désordres.

TABLEAU IV Causes d'apparition de désordres (données, région toulousaine).

Causes déterminantes du désordre	Nombre de cas
Rétractance des sols par dessiccation	358
Végétation néfaste	271
Protection insuffisante des fondations	196
Pente du terrain	165
Manque de rigidité des structures	138
Fondation trop légère	101
Présence d'un sous-sol partiel	79
Construction par étapes	58
Vétusté	55

On constate qu'il y a rarement une cause unique à l'origine d'une pathologie ; la sécheresse est souvent le phénomène déclenchant, mais fréquemment amplifié par des causes secondaires concomitantes : dispositions constructives non adaptées sur un terrain en pente (42 % des désordres), manque de rigidité des structures (35 %).

Bibliographie

Bigot G., Zehrouni M.I. - Retrait-gonflement et tassement des sols fins. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées* n° 229, novembre-décembre 2000.

Lautrin D. - Une procédure rapide d'identification des argiles. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées* n° 152, novembre-décembre 1987.

Lautrin D. - Utilisation pratique des paramètres dérivés de l'essai au bleu de méthylène dans les problèmes de génie civil. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées* n° 160, février-mars 1989.

Magnan J.-P., Youssefian G - Essai au bleu de méthylène et classification géotechnique des sols- *Bulletin de liaison des labo-*

ratoires des ponts et chaussées n° 159, janvier-février 1989.

Philipponnat G. - Désordres dus à la présence de sols gonflants dans la Région parisienne. *Annales de l'ITBTP* n° 364, septembre 1978.

Philipponnat G. - Retrait-gonflement des argiles, proposition de méthodologie- *Revue française de géotechnique* n° 57, 1991.

Influence du retrait et de la variabilité naturelle des sols argileux sur le comportement des fondations de maisons individuelles

A. DENIS,

S. M. ELACHACHI, H. NI-
ANDOU,
M. CHRÉTIEN

Université Bordeaux I,
CDGA-GHYMAC
Avenue des Facultés
33605 Talence
a.denis@cdga.u-bordeaux1.fr

Résumé

Les maisons individuelles sont particulièrement sensibles aux tassements différentiels provoqués par les phénomènes de retrait-gonflement des sols argileux. La reconnaissance sur les sites de construction de la présence de sols argileux est donc primordiale. La méthode VLF-R (Very Low Frequency) en mode résistivité (R), testée sur un site de 25 000 m², s'avère être un outil performant pour atteindre cet objectif mais également pour mettre en évidence la variabilité lithologique des sols sur un site. De telles informations sont ensuite utilisées dans un modèle simple de comportement de semelle filante sur sol élastique (modèle de Winkler) développé en éléments finis. Ce modèle permet d'évaluer l'amplitude des tassements différentiels et des moments fléchissants dans une semelle filante en fonction de la variabilité longitudinale des propriétés du sol et d'un retrait du sol sous la fondation. Il apparaît que la variabilité des propriétés mécaniques des sols, tout comme un retrait, entraînent des déplacements et des efforts internes dans la fondation qui peuvent être dommageables pour la structure.

Mots-clés : interaction sol-structure, variabilité spatiale, retrait, argile, Very Low Frequency (VLF), résistivité.

Effects of shrinkage and longitudinal variability of clayey soil on wall foundations of residential constructions

Abstract

Differential movements of wall foundations are a common problem in lot of areas, where residential constructions rest on sensitive clay soils. Young as older structures, without any history of minimal differential movement before, can develop foundations problems in a very short time due to changing soil moisture during an extended dry period. Wall footings for residential construction are usually of dimensions to satisfy local buildings code, nevertheless in many cases, soil investigations are not performed and action due to sensitive clay soil and longitudinal variability of soil properties are not considered in the wall footing design. First, we show the ability of the VLF-R (Very Low Frequency - Resistivity mode) method to provide qualitative resistivity information on the soil variability and the presence of clay soil on a test site. Then, a simple model, based on a beam on an elastic soil foundation, describes the soil-structure interaction. This model is developed through a finite element model in which a 1D structure (wall footing) rests on a spatially varying soil, described with Winkler-type springs. This model is used to study induced effects of soil variations (described by the means of a spatial correlation function), shrinkage, differential settlements and critical bending moment values that cannot be predicted if the soil is assumed homogeneous or shrinkage left out under the wall footing. These different results give some tracks to revise the wall foundation design accordingly.

Key words: Soil-structure interaction, spatial variability, shrinkage, clay soil, Very Low Frequency (VLF), resistivity.

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 30 avril 2008.

Introduction

Les phénomènes de retrait-gonflement des sols argileux induisent des mouvements différentiels susceptibles de provoquer des désordres importants aux maisons individuelles et constituent, après les inondations, le deuxième poste indemnisé dans le cadre du régime des catastrophes naturelles. Ces constructions, légères et de faible rigidité structurale, se caractérisent par des fondations de type filante avec un faible encastrement (D) entre 0,5 et 1 m, une largeur (B) comprise entre 0,40 et 0,50 m pour une hauteur (H) de 0,30 m. Leur taille réduite et leur encastrement (relativement important par rapport à leur dimension : $D/B \geq 1$) sortent des normes usuelles de calcul des fondations superficielles pour les bâtiments. Dans les cas les plus courants, elles ne sont pas dimensionnées et laissées à l'appréciation du savoir faire du constructeur ; dans l'hypothèse d'un sol homogène, même de caractéristiques mécaniques médiocres, la capacité portante est souvent suffisante et les tassements faibles.

Dans cet article, on s'intéresse, à la répartition spatiale des sols qu'il est possible d'obtenir à partir d'une méthode de reconnaissance géophysique, puis à l'influence de la variabilité naturelle des propriétés mécaniques des sols et, dans le cas d'un sol argileux, à l'influence du retrait du sol de fondation sur les efforts internes engendrés dans une semelle de fondation. Il ne s'agit pas de revenir sur le dimensionnement des fondations superficielles pour les maisons individuelles, mais bien d'identifier l'importance de la variabilité spatiale des propriétés des sols et d'un retrait du sol sur le comportement des fondations superficielles. Une première partie illustre la forte hétérogénéité des sols de fondation sur un site qui a fait l'objet d'une reconnaissance géophysique par une méthode électromagnétique de type VLF-R (Very Low Frequency en mode Résistivité), de forages tarières, d'essais pressiométriques et d'essais en laboratoire. Dans une seconde partie, les informations recueillies sur la variabilité des sols et la présence de sol argileux susceptibles de présenter un retrait ont permis de calculer les déplacements et les moments fléchissants de semelles filantes de maisons individuelles. Ces calculs seront conduits en représentant le sol par un modèle de Winkler qui, développé en éléments finis, présente l'avantage d'être un modèle simple d'utilisation et de pouvoir prendre en compte la variabilité spatiale des propriétés des sols.

Reconnaissance géotechnique du site d'étude

Le site d'étude, d'une superficie de 25 000 m², se situe sur la commune de Pessac (33). Une telle superficie a motivé la réalisation préalable, aux sondages tarières et pressiométriques, d'une campagne de reconnaissance géophysique, de type VLF-R, dont l'objectif était de qualifier l'homogénéité du site afin d'en déduire les zones les plus aptes à accueillir des constructions.

Contexte géologique

La commune de Pessac a été classée plusieurs fois en commune sinistrée entre les années 1989 et 2005. Le site d'étude est dans une zone de raccordement entre une terrasse supérieure et une terrasse moyenne. Ces formations superficielles sont bien connues dans le secteur comme présentant une forte hétérogénéité provenant à la fois des variations d'épaisseurs des alluvions et des variations latérales de faciès très brutales entre des alluvions sablo-graveleuses et des sols argileux. La carte d'aléa au phénomène de retrait-gonflement à l'échelle départementale et éditée par le BRGM situe cette zone d'étude en aléa moyen tel que le montre la figure 1.



FIG. 1 Carte d'aléa au phénomène de retrait-gonflement (source : BRGM) et localisation du site d'étude.
Shrinkage and swelling clay hazard map (BRGM) and localisation of the studied area.

Reconnaissance VLF-R

Une reconnaissance d'un site de grande surface par une méthode électromagnétique de type VLF (Very Low Frequency) en mode R (résistivité) est une alternative intéressante aux méthodes plus classiques telles que les méthodes électriques en courant continu (Benson *et al.*, 1997 ; Oskooi et Pedersen, 2005). Si ces dernières donnent des informations importantes sur la nature et la répartition des sols en surface et en profondeur (Spies, 1996 ; Denis *et al.*, 2002), elles présentent l'inconvénient d'une mise en œuvre nécessitant beaucoup de temps pour de telles surfaces. La méthode VLF utilise la puissance d'émetteurs radio dont les fréquences varient de 15 à 25 kHz. Les ondes émises, d'une grande puissance, induisent des courants électriques, dans les zones les plus conductrices du sol, qui génèrent à leur tour un champ magnétique secondaire qui peut être détecté à la surface du sol par la mesure de la déviation du champ normal. La profondeur d'inves-

tigation dépend de la fréquence de l'émetteur utilisé et de la résistivité des sols (Spies, 1989). Dans le cas de sols de résistivité entre 20 et 30 Ohm.m, la profondeur d'investigation est estimée entre 8 et 12 m. La présence de sols argileux de plus faible résistivité peut conduire à des profondeurs d'investigation plus faibles. Dans cette étude, où l'on a cherché plutôt à mettre en évidence la présence de sols conducteurs sur des profondeurs entre 0 et 6 m, cette limitation inhérente à la méthode d'investigation choisie n'est pas rédhibitoire.

Les points de mesures sont répartis sur des profils réguliers avec des espacements moyens de 10 m entre points de mesure. Les profils sont dans la direction est-ouest d'une longueur d'environ 150 m. L'ensemble de la campagne de reconnaissance comporte au total

272 points de mesure de la résistivité du sol (Fig. 2). La fréquence des ondes électromagnétiques de l'émetteur utilisé lors de ces mesures est de 16 kHz. La carte de résistivité des sols sur le site d'étude est présentée sur la figure 3. La résistivité s'étend d'un pôle argileux pour des valeurs entre 4 et 10 Ω .m à un pôle sableux pour des valeurs de résistivité supérieures à 50 Ω .m. La répartition spatiale des valeurs de résistivité illustre l'hétérogénéité des formations superficielles sur ce site où dans sa partie nord l'on peut passer, en une trentaine de mètres, d'un sable à un sol argileux. Les zones de plus faible résistivité se situent essentiellement en parties ouest et est et semblent souligner un couloir de sol plus résistant pouvant correspondre à un comblement d'un paléochenal de direction nord-sud.

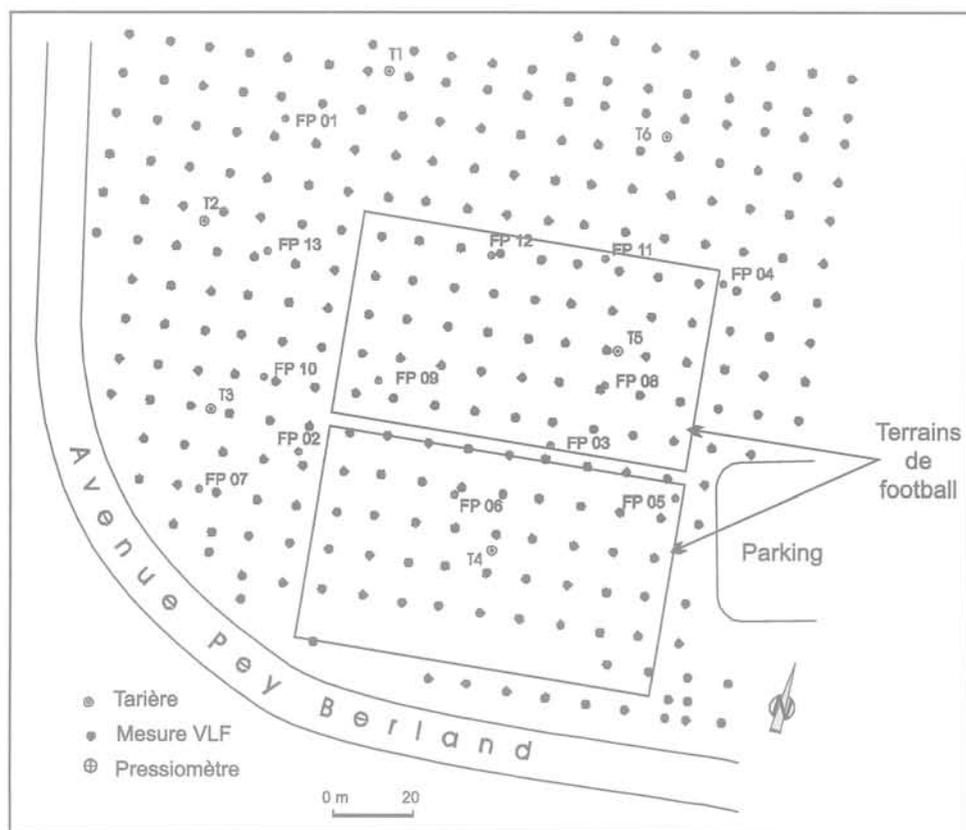


FIG. 2 Schéma d'implantation des points de mesure VLF, des tarières et des pressiomètres.
 Localisation of VLF point measurements, auger drillings and pressuremeter tests on the studied area.

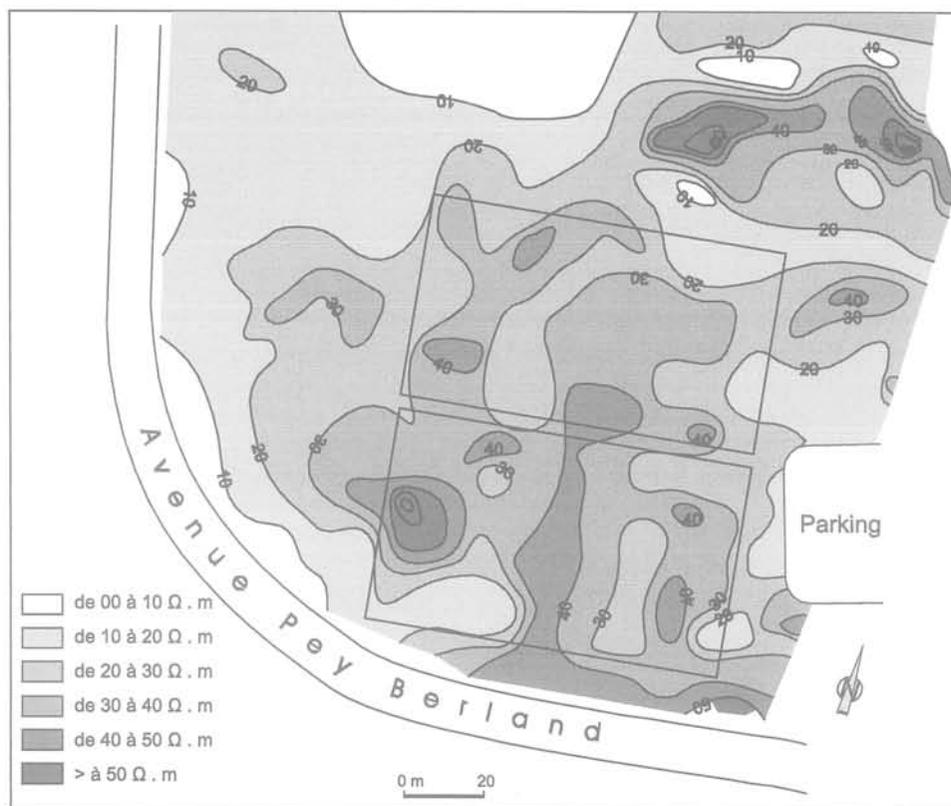


FIG. 3 Carte de la répartition de la résistivité sur le site d'étude. Méthode VLF-R (16 kHz).
Electrical resistivity subsurface imaging from VLF-R (16 kHz) measurements.

2.3

Reconnaissance géotechnique

Les sondages de reconnaissance (6 tarières à 8 m de profondeur) et essais *in situ* (13 pressiomètres entre 8 et 12 m de profondeur) ont permis de confirmer la répartition des formations superficielles reconnues par la méthodes VLF-R. Les tarières T1 et T2 forées dans les zones de résistivités entre 0-10 $\Omega.m$ et 10-20 $\Omega.m$ montrent des sols argileux jusqu'à 7 m de profondeur, ce que confirme un classement en A3h obtenu avec les essais de laboratoires réalisés sur ces sols. La tarière T3 (zone entre 20-30 $\Omega.m$) met en évidence une argile sableuse entre 1,20 et 8 m de profondeur tandis que la tarière T5 (zone de résistivité comprise entre 30 et 40 $\Omega.m$) montre une argile sableuse avec lits de graviers. Pour les zones de résistivités supérieures, les tarières T4 (40-50 $\Omega.m$) et T5 (résistivité > 50 $\Omega.m$) montrent la présence d'un sable blanc et d'un sable à graviers. Les sondages pressiométriques, avec un essai tous les mètres, confirment également la répartition des formations argile, argile sableuse et sable de la carte de résistivité.

2.4

Estimation de la variabilité des propriétés des sols

Les différentes reconnaissances réalisées sur ce site d'étude mettent en évidence la variabilité de la nature

des formations superficielles sur une superficie de 25 000 m² et confirment, par la présence de sols argileux, le classement de cette zone en aléa moyen pour le retrait-gonflement. Si une telle zone venait à être urbanisée, sous la forme d'une zone pavillonnaire avec des parcelles de 1 000 m², on retrouverait sur chaque parcelle, mais à une autre échelle, une forte variabilité des sols. Nous aurions des parcelles avec un sol de même nature mais susceptible de présenter des phénomènes de retrait-gonflement, des parcelles à cheval sur des formations plus sableuses et des formations argileuses et, enfin, des parcelles où la présence d'un sol sableux sur toute la surface serait très favorable pour supporter n'importe quel type de construction. Cette variabilité lithologique des formations superficielles en milieu alluvionnaire est très classique et explique pourquoi, dans une même zone pavillonnaire, deux maisons voisines ne vont pas présenter les mêmes dommages suite à une période de déficit hydrique.

Le nombre de données disponibles ne permet pas d'entreprendre une étude fine de la variabilité des propriétés mécaniques des sols à l'échelle d'une parcelle de 1 000 m². A l'échelle du site, on dispose par contre de 13 essais pressiométriques Ménard dont l'interprétation donne les valeurs moyennes de module pressiométrique E_M entre 1 et 5 m de profondeur et de la pression limite Pl_M entre 1 et 2 m de profondeur (tableau I). Pour l'ensemble des sondages, on peut considérer que les sols sont homogènes jusqu'à 5 m de profondeur.

TABEAU I Valeurs moyennes du module pressiométrique E_M et de pression limite P_{LM} .

	FP1	FP2	FP3	FP4	FP5	FP6	FP7	FP8	FP9	FP10	FP11	FP12	FP13
E_M (MPa)	3,71	3,21	5,1	3,55	4,41	6,5	3,88	4,38	4,46	3,58	3,65	4,9	5,01
P_{LM} (MPa)	0,73	0,64	0,8	0,5	0,81	1,05	0,69	0,87	0,88	0,7	0,45	0,7	0,78
E_M/P_{LM}	5,08	5,02	6,38	7,1	5,44	6,19	5,62	5,03	5,07	5,11	8,11	7	6,42

Toutes lithologies confondues, les valeurs moyennes du module pressiométrique et de la pression limite, sont respectivement de 4,3 MPa et de 0,73 MPa avec un coefficient de variation pour ces deux variables d'environ 0,2. Le rapport E_M/P_{LM} est en moyenne de 6. La carte des résistivités ayant apporté une information de qualité sur la répartition spatiale de formations superficielles, il est tentant de rapprocher les valeurs de résistivité des valeurs de modules pressiométriques. La figure 4 présente la corrélation qu'il est possible d'établir entre ces deux variables. On obtient un coefficient de corrélation de 0,85 lorsque les sondages pressiométriques FP2 et FP 6 sont retirés ; ils présentent l'un comme l'autre une couche de nature différente en profondeur pouvant expliquer les valeurs de résistivités fortes pour FP2 et faibles pour FP6. Une carte de la répartition spatiale du module pressiométrique pourrait alors être déduite d'une telle relation entre ces deux variables.

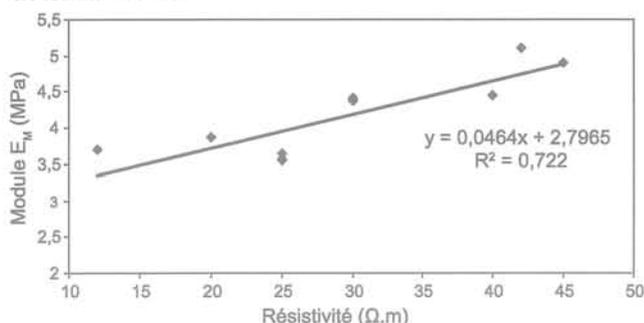


FIG. 4 Représentation de la relation entre le module pressiométrique E_M et la résistivité du sol. Modulus E_M from pressuremeter test versus Resistivity from VLF-R.

Les calculs de portance et de tassements menés selon la méthode pressiométrique sont conduits avec les hypothèses suivantes : une semelle filante d'une longueur de 10 m, un encastrement $D = 1$ m, une largeur $B = 0,50$ m et une sollicitation du sol $F = 20$ kN/ml. Dans le cas le plus favorable d'un sol sableux, on obtient une contrainte de calcul $q = 0,65$ MPa et un tassement de 1,5 mm. Dans le cas d'une semelle filante reposant sur un sol argileux, on déduit une contrainte de calcul $q = 0,42$ MPa et un tassement de 3 mm. Par rapport aux charges transmises au sol, les semelles filantes ont les bonnes dimensions. Il est d'usage courant d'appliquer une méthode simple dites « méthode des bielles » pour le calcul des aciers dans les semelles filantes sous murs. Cette méthode s'intéresse uniquement à la section transversale de la semelle et suppose que les charges appliquées sont transmises au sol par des bielles obliques qui déterminent les efforts de traction devant être équilibrés par des armatures transversales. Le calcul des aciers menés par cette méthode avec les charges en pied de maçonnerie conduit à des quantités minimales

d'aciers transversaux et longitudinaux. Les aciers des fondations pour les maisons individuelles répondent, dans la plupart du temps, à un minimum requis pour assurer l'intégrité de la fondation sur le long terme.

Les calculs précédents pour déterminer la contrainte de calcul, le tassement ou la quantité d'acier dans une semelle filante, sont tous menés avec l'hypothèse d'un comportement homogène dans le sens longitudinal de la fondation. Dans la seconde partie de cet article, on étudie l'influence de la variabilité longitudinale des propriétés des sols et d'un retrait, dans le cas d'un sol argileux, sur le comportement longitudinal des semelles filantes des maisons individuelles.

3

Comportement des fondations superficielles

3.1

Le modèle de calcul

Dans les calculs usuels de dimensionnement des fondations superficielles, le comportement n'est modélisé que dans une section droite pour représenter le comportement transversal de l'élément de fondation. Dans le cas d'une semelle filante et tout particulièrement lorsque la variabilité longitudinale des propriétés mécaniques du sol est prise en compte, le comportement longitudinal de la semelle doit être étudié. L'interaction sol-semelle qui intervient alors amène un nouveau degré de complexité. L'Eurocode 2 (EN 1992 -1 -1) dans son annexe relative à l'interaction sol-structure précise les niveaux d'analyse à considérer selon la rigidité de la structure et propose d'évaluer la rigidité relative du système structural à partir de la relation suivante :

$$K_R = \frac{(EJ)_s}{E.l^3} \quad (1)$$

où $(EJ)_s$ est la valeur approchée de la rigidité en flexion par unité de largeur de la structure étudiée, E le module de déformation du sol et l la longueur de la fondation. On fait l'hypothèse, dans cette première approche, que le seul système structural rigide est la fondation elle-même. La rigidité des murs en maçonnerie est négligée en raison de la liaison fragile entre la base des murs et la fondation. La figure 5 présente l'évolution de la rigidité relative en fonction de la longueur d'une semelle filante. Les valeurs obtenues pour la rigidité relative avec une hauteur de fondation de 0,30 m, un module de béton de 30 GPa et pour deux valeurs bien distinctes de module pressiométrique montrent, comme attendu, qu'un tel système de fondation est souple ($K_R < 0,5$) ; les pressions sont uniformes sous la semelle quel que soit

le type de sol tandis que le profil de déplacement va dépendre de la rigidité sol-ouvrage et du type de sol. Les valeurs de modules de déformation du sol introduites dans l'équation de K_R ont été calculées à partir de valeurs de modules pressiométriques (1 et 5 MPa) avec la relation :

$$E = a \cdot \frac{E_M}{\alpha} \quad (2)$$

avec E_M le module pressiométrique de Ménard, α le coefficient de structure (Cassan, 1978) et a un coefficient pouvant varier de 2 à 4 (Combarieu, 2006).

Un module de béton de 30 GPa correspond au module instantané pour un béton de la classe C20/25, un béton d'une classe supérieure conduirait à la même conclusion quant à la souplesse relative de la fondation.

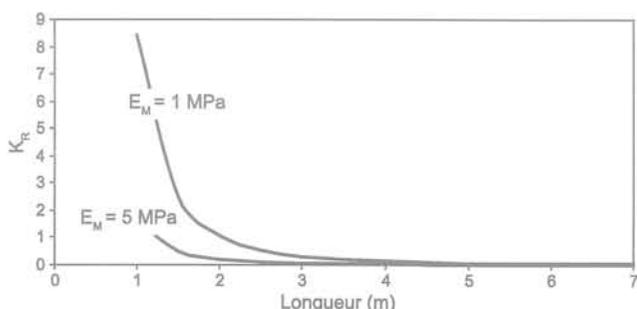


FIG. 5 Évolution de la rigidité relative K_R d'une semelle filante en fonction de sa longueur avec une hauteur de semelle de 0,30 m, de largeur 0,50 m et un module de déformation du béton de 30 GPa.

Relative coefficient of subgrade reaction versus the length of a wall footing with a height $H = 0.30$ m, a width $l = 0.50$ m and a deformation modulus $E = 30$ GPa.

De nombreux modèles ont été développés pour tenir compte de l'interaction sol-structure. Ils associent, généralement dans le cas d'un chargement statique, l'efficacité de la méthode des éléments finis (Zhang et Ellingwood, 1995 ; Fenton et Griffiths, 2002) ou une approche analytique (Frantzikonis et Breysse, 2003) et les possibilités d'une approche probabiliste avec des simulations de Monte-carlo. A l'origine, on peut citer le modèle classique de Winkler (1867) et les améliorations successives qui lui ont été apportées par différents auteurs comme par exemple Kerr (1965) et Horvarth (1993). Le modèle de Winkler s'appuie sur une idéalisation mathématique qui ne peut être justifiée physiquement. Cependant, l'expérience montre qu'un tel modèle permet d'obtenir une estimation raisonnable des sollicitations et déformations des structures.

Le modèle de Winkler semble bien adapté à l'étude de l'interaction sol-semelle de fondation dans le cas de structures légères telles qu'une maison individuelle. Ce modèle combine deux avantages qui sont, d'une part, une simplicité d'utilisation et de mise en œuvre par rapport à d'autres modèles de comportement et, d'autre part, sa capacité à prendre en compte la variabilité des caractéristiques du sol de fondation. Le modèle de Winkler s'exprime par une relation linéaire de la forme :

$$\sigma(x) = k \cdot w(x) \quad (3)$$

où k est le coefficient de réaction du sol (ou constante de proportionnalité de Winkler) de dimension $[F/L^3]$,

$w(x)$ le déplacement vertical (tassement) et $\sigma(x)$ la contrainte exercée par le sol en réaction à ce déplacement. Ce modèle de comportement n'utilise qu'un seul paramètre et néglige, en considérant des ressorts indépendants, la rigidité du sol en cisaillement (Avramidis et Morfidis 2006). Cette simplification est cohérente compte tenu de la variabilité naturelle des sols et des incertitudes liées à la détermination des propriétés mécaniques des sols de fondations à faible profondeur. Une évolution de ce modèle serait d'utiliser un modèle de poutre où la rigidité du sol en cisaillement est prise en compte, tel que le modèle de Kerr à trois paramètres (Morfidis, 2007).

Dans de tels modèles, un comportement évolutif du sol et de la structure pourrait être introduits simplement en adoptant des lois $k(t)$ ou $k(w)$ selon que l'on souhaite décrire une dégradation progressive des propriétés du sol ou du matériau.

Le coefficient de réaction k n'est pas un paramètre intrinsèque du sol. Il dépend d'autres facteurs tels que la charge appliquée, la géométrie de la fondation et sa rigidité ; il est d'autant plus élevé que la fondation est souple et le sol rigide. De nombreux auteurs en ont donné des expressions particulières, tels que Vlassov et Leontiev (1956), Vesic (1963), avec une synthèse dans Elachachi *et al.* (2004).

On retient pour cette étude une estimation du coefficient de réaction k à partir des résultats des essais pressiométriques (Cassan 1978) et des relations permettant le calcul du tassement des fondations superficielles sur un sol homogène :

$$\frac{1}{k} = \frac{\alpha \cdot B}{9 \cdot E_M} \cdot \lambda_c + \frac{2 \cdot B_0}{9 \cdot E_M} \cdot \left(\lambda_d \cdot \frac{B}{B_0} \right)^p \quad (4)$$

où B est la largeur de la fondation, B_0 la largeur de référence (0,60 m), α le coefficient de structure ou rhéologique, λ_c et λ_d les coefficients de forme et E_M le module pressiométrique.

D'un point de vue numérique, le modèle de Winkler se prête parfaitement à une résolution par la méthode des éléments finis. La semelle filante de longueur finie est alors décomposée en un ensemble d'éléments de poutre (répondant à l'hypothèse cinématique de Bernoulli) de rigidité flexionnelle EI et soumis à un chargement uniforme q (Fig. 6). La semelle filante repose sur un sol modélisé par une succession de ressorts indépendants de coefficient de réaction k (Fig. 6). Ainsi chaque élément de poutre de longueur L^e repose sur un ressort de raideur constante k^e dont la valeur peut être variable. A partir de l'énergie de déformation de la structure et du sol d'assise, la matrice de rigidité et le vecteur de charge sont calculés afin d'obtenir les déplacements nodaux après résolution numérique du système linéaire classique. Les efforts internes pour chaque élément de poutre sont ensuite calculés. Le décollement de la semelle par rapport au sol n'est pas traité.

3.2

Influence de la variabilité naturelle

A partir des conclusions tirées de la carte de résistivité et de la campagne de sondage sur le site d'étude, la variabilité spatiale d'une propriété mécanique du sol sur le comportement d'une semelle de fondation peut être simulée selon au moins deux cas de figure.

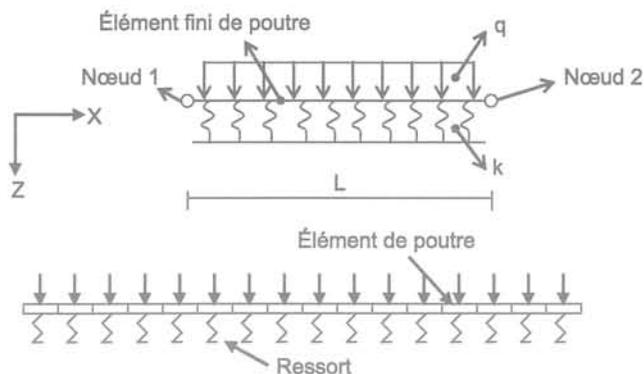


FIG. 6 Représentation schématique du modèle de poutre et de la discrétisation en éléments de poutre de la semelle filante. Schematic illustration of the beam model for wall footings with discrete beam elements.

Dans un premier cas, on considère une fondation dont une plus ou moins grande longueur se trouve sur un sol argileux de coefficient de réaction k_A , le reste de la fondation reposant sur un sol sableux de coefficient k_S . Les coefficients k_A et k_S sont calculés à partir de la relation 4 avec comme hypothèse les modules pressiométriques donnés dans le tableau I par les sondages FP2 et FP6, une semelle filante ($L = 10$ m, $B = 0,5$ m, $H = 0,3$ m), une valeur $\alpha = 0,5$ et des coefficients de forme λ_c et λ_d égaux respectivement à 1,50 et 2,65 et déterminés en fonction du rapport entre la longueur et la largeur de la fondation.

On obtient une valeur de $27\,000$ kN/m³ pour k_S et une valeur de $13\,000$ kN/m³ pour k_A . A partir de ces valeurs, on peut simuler le comportement de la semelle filante pour différentes hypothèses de répartition du coefficient de réaction sur la longueur de la semelle et une valeur de charge q de 20 kN/ml. La figure 7 donne, pour deux répartitions du coefficient de réaction sous la fondation, le tassement et le moment fléchissant (par convention, les moments sont positifs pour une fibre inférieure tendue). Les tassements de la fondation restent contenus dans l'intervalle calculé précédemment, mais avec des évolutions de la déformée le long de la semelle qui peuvent être très différentes et peuvent donc s'accompagner d'efforts internes diamétralement opposés. Les moments fléchissants sont en effets compris entre $-4,5$ et 4 kN.m et restent faibles pour des éléments de structure. Toutefois, selon la qualité du béton de la semelle, un moment fléchissant négatif peut nécessiter la mise en place d'aciers longitudinaux en fibre supérieure. Dans ce cas, les calculs des quantités d'aciers ne peuvent plus s'appuyer sur la méthode des bielles ou des moments, mais doivent être effectués en considérant la semelle comme une poutre.

Le deuxième cas de figure correspond à la prise en compte de la variabilité spatiale des propriétés du sol sous la forme d'un champ aléatoire (Vanmarcke, 1983). Le processus stochastique stationnaire de la variable k , qu'il convient alors de générer dans la direction longitudinale, requiert d'estimer la valeur moyenne ($m_k = \text{constante}$), la variance ($\text{Var}_k = \text{constante}$) et la fonction d'autocorrélation caractérisée par une longueur de corrélation. Cette dernière est définie comme la distance entre deux points de mesures au-delà de laquelle les propriétés ne sont plus corrélées.

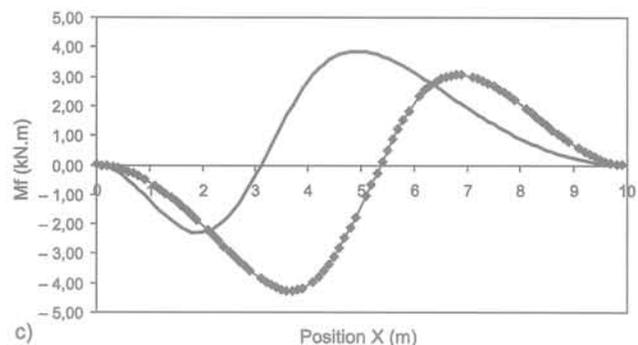
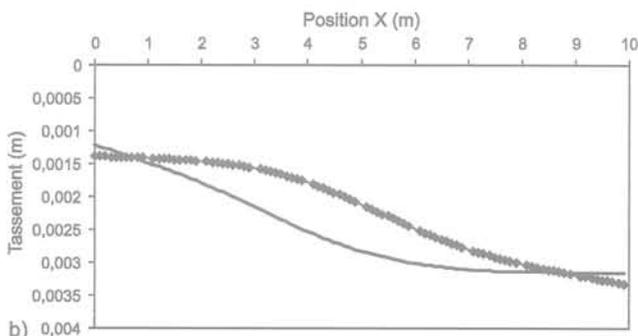
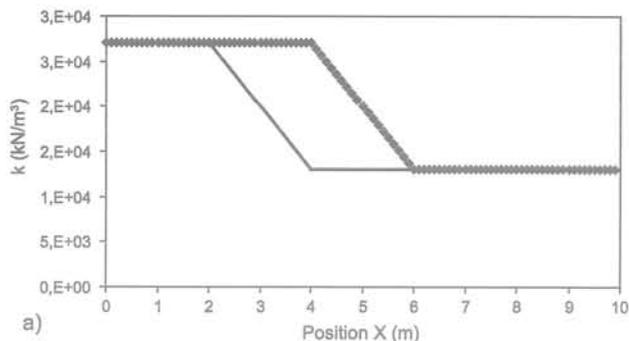


FIG. 7 Influence d'une variation du coefficient de réaction sur la longueur d'une semelle filante : a) coefficients de réaction sous la semelle filante, b) tassements, c) moments fléchissants.

Effect of the variation of the coefficient of subgrade reaction along the wall footing: a) coefficients of subgrade reaction, b) vertical displacement, c) bending moment.

Le sol de fondation est divisé en différentes zones de longueur D_i où l'on définit, par rapport à la moyenne m_k et la variance de la variable k , la moyenne et la variance sur la zone D_i par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} E[k_{D_i}] &= m_k \\ \text{var}[k_{D_i}] &= \sigma_k^2 \gamma(D_i) \end{aligned} \quad (5)$$

Si la moyenne de la variable k est identique quelle que soit la longueur de la zone D_i , la variance est fonction de la longueur D_i selon une loi de réduction de variance $\gamma(D_i)$ (Vanmarcke, 1983) dont l'influence dépend de la fonction de corrélation et de la longueur de corrélation.

La génération du coefficient de réaction k s'effectue en deux temps. Dans un premier temps, la variable aléatoire de distribution normale centrée réduite est générée selon un algorithme proposé par Fenton et Vanmarcke (1990), pour ensuite être transformée, dans un deuxième temps, en une distribution lognormale

jugée souvent plus adaptée pour les propriétés mécaniques des sols (Elachachi *et al.*, 2004).

Pour déterminer les paramètres de distribution du coefficient de réaction sur notre site d'étude on prend l'hypothèse que les valeurs de k suivent une distribution lognormale de valeur moyenne $20\,000\text{ kN/m}^3$ et de coefficient de variation C_v égal à $0,2$. La fonction d'autocorrélation choisie est de forme exponentielle avec une longueur de corrélation égale à la longueur de la semelle filante. De nombreuses études ont montré que la longueur de corrélation la plus influente sur le comportement d'un ouvrage varie, selon le paramètre étudié (tassement, renversement, moment fléchissant, ...), entre $0,5$ et $1,5$ fois la longueur de l'ouvrage (Fenton et Griffiths, 2002 ; Houy *et al.*, 2005 ; Breyse *et al.*, 2005 ; Niandou et Breyse, 2007, pour les plus récentes). La figure 8 illustre la génération de deux champs de valeurs de k de moyenne $20\,000\text{ kN/m}^3$, de coefficient de variation de $0,2$ et de longueur de corrélation l_c de 10 m .

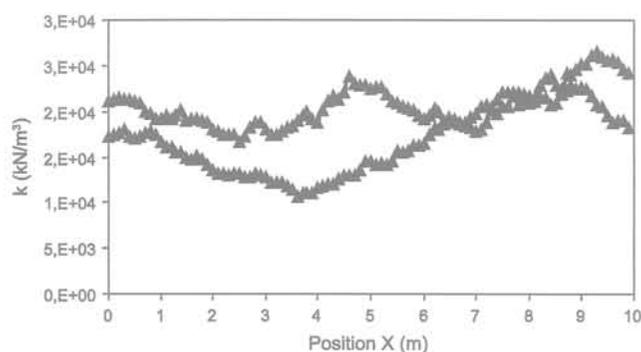


FIG. 8 Exemples de deux simulations de champs de valeurs de coefficient de réaction sous une semelle filante avec $mk = 20\,000\text{ kN/m}^3$, $C_v = 0,2$ et $l_c = 10\text{ m}$.

Examples of two random fields simulations of the coefficient of subgrade reaction along the wall footing where $mk = 20,000\text{ kN/m}^3$, $C_v = 0,2$ and $l_c = 10\text{ m}$.

La figure 9 présente les allures de la déformée d'une semelle filante pour une répartition des coefficients de réaction qui donne le plus grand moment positif et le plus petit moment négatif. Ces résultats sont extraits de 200 simulations. Par rapport aux résultats précédents, le moment positif est un peu plus important ($M_f = 6\text{ kN.m}$) alors que le moment négatif ne dépasse pas $-3,5\text{ kN.m}$. Ces valeurs sont faibles mais doivent, bien sûr, être mises en relation avec les valeurs de modules pressiométriques relativement élevées pour un sol argileux.

Les deux approches utilisées, pour mettre en évidence l'influence de la variation des propriétés de sol sous une semelle filante, conduisent à des résultats comparables et donc à des conclusions similaires quant à la nécessité de vérifier le comportement longitudinal d'une semelle filante si une variabilité lithologique est reconnue sur le site d'étude. Toutefois, la deuxième approche, plus réaliste, ouvre également la voie à une approche probabiliste et fiable.

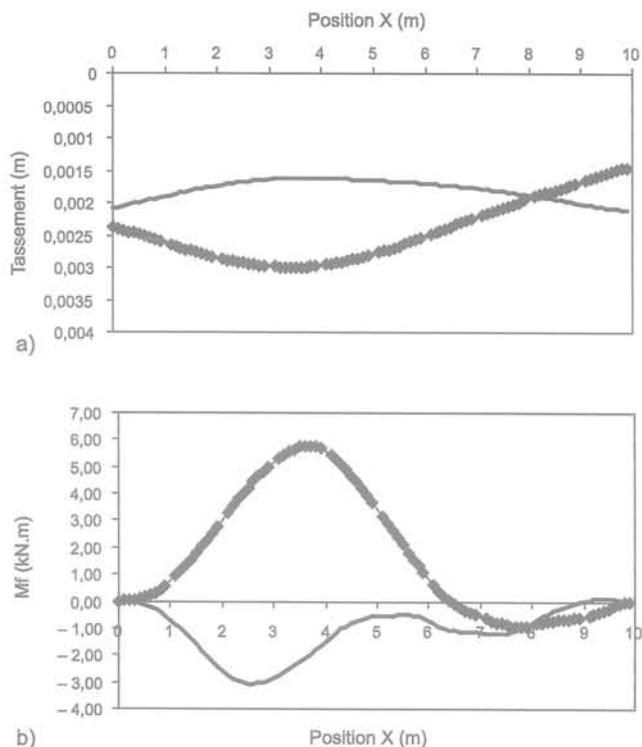


FIG. 9 Évolution du tassement (a) et du moment fléchissant (b) de la semelle filante pour différents champs aléatoires de la variable k avec $l_c = 10\text{ m}$.

Vertical displacements (a) and bending moments (b) of the wall footing for various random fields of k with $l_c = 10\text{ m}$.

3.3

Influence du retrait des sols argileux

Le retrait d'un sol argileux sous une fondation peut être simulé, dans une première approche, par une perte de contact entre la base de la semelle et le sol. D'un point de vue numérique, on supprime les « ressorts » aux nœuds des éléments de poutre où le retrait du sol est supposé se produire. Le retrait peut affecter la semelle de fondation en différents endroits. Deux cas sont traités : un retrait sur une longueur de 2 m , entre 6 et 8 m , d'une semelle filante de 10 m de longueur et le cas d'un retrait sur une longueur de 2 m à l'une des extrémités de la semelle. Les résultats sont présentés sur la figure 10 où il apparaît des comportements bien contrastés entre les deux cas étudiés.

Un retrait du sol, entre 6 et 8 m (Fig. 10), entraîne une augmentation sensible du déplacement vertical de la semelle, il en résulte des efforts internes plus importants dans cette zone et, en particulier, une augmentation importante du moment fléchissant ($M_f = 23\text{ kN.m}$). Cette valeur de moment fléchissant se rapproche, selon la qualité du béton et donc de sa résistance à la traction, des moments maximum admissibles (élastique et plastique).

Dans le cas d'un retrait en bout de semelle (Fig. 10), ce qui est une situation très classique, l'extrémité de la semelle se déplace d'environ 6 mm . Les murs maçonnés, rigides et fragiles, subiront un déplacement ver-

tical différentiel calculé entre l'extrémité et le milieu de la fondation d'au moins 4 mm qu'ils seront généralement incapables de supporter sans fissurer. Au niveau de la semelle, la fibre supérieure est tendue et le moment fléchissant se rapproche également des moments maximum admissibles.

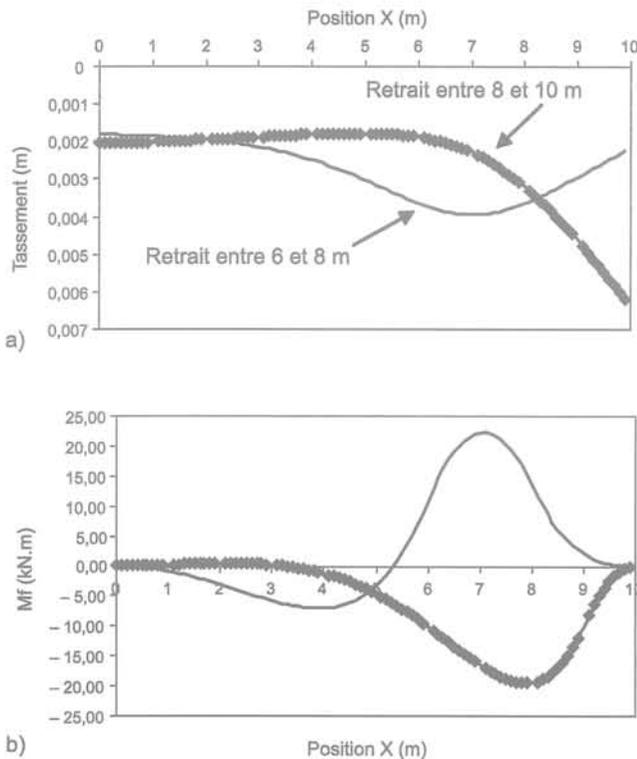


FIG. 10 Influence d'un retrait du sol entre 6 et 8 m et entre 9 et 10 m sur le comportement d'une semelle filante, $k = 20\,000 \text{ kN/m}^3$
 a) tassements, b) moments fléchissants.
 Effect of shrinkage (between 6 and 8 m and between 9 and 10 m) on the wall footing $k = 20,000 \text{ kN/m}^3$, a) vertical displacements, b) bending moments.

Le dimensionnement de cette fondation doit être réalisé comme une poutre en appui ou en console, ce qui entraîne une augmentation importante de la section d'acier en fibres supérieure et inférieure.

Le module de déformation du béton est un paramètre important dans le dimensionnement des fondations superficielles. Des bétons réalisés sur chantier, de moins bonne qualité que prévue initialement, entraînent une diminution des moments fléchissants et une augmentation considérable des déplacements auxquels doivent ensuite répondre les murs maçonnés (Fig. 11). Un contrôle de la qualité du béton utilisé lors de la réalisation des fondations pour des maisons individuelles n'est donc pas à négliger. De plus, une prise en compte du fluage du béton dans le cas d'une période de sécheresse prolongée, et qui reviendrait à diviser par trois le module de déformation initial, peut avoir également des effets importants sur le comportement de la semelle.

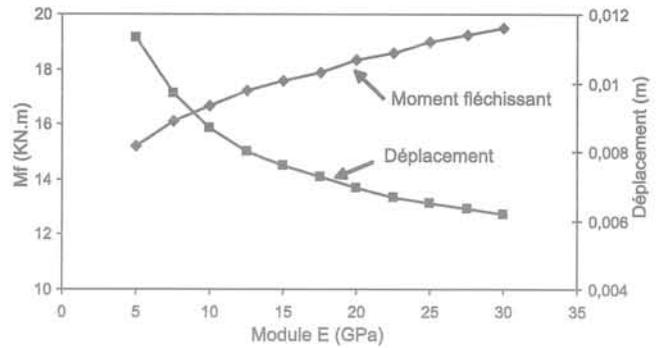


FIG. 11 Influence du module de déformation sur le moment fléchissant (moment négatif) et le déplacement en bout de la semelle pour un retrait entre 8 et 10 m.
 Bending moment and vertical displacement versus Young's modulus of the wall footing with a shrinkage between 8 and 10 m.

4

Conclusion

L'utilisation d'une méthode géophysique de reconnaissance telle que la méthode VLF-R, préalable à une campagne de reconnaissance par forages et essais in situ, a mis en évidence sur le site étudié la présence de sols argileux et la forte hétérogénéité dans la nature des sols. Les sondages tarières et pressiométriques ont permis de confirmer l'apport important de cette méthode de prospection pour une détection des zones les plus argileuses sur un site. L'hétérogénéité lithologique se retrouve inmanquablement sur les propriétés mécaniques des sols et il serait intéressant de confirmer et d'améliorer une telle relation entre un paramètre physique tel que la résistivité des sols et des mesures pressiométriques. D'un point de vue pratique, cette méthode peut être utilisée sur des petites parcelles où quelques profils permettent rapidement de se rendre compte de la présence de sols argileux et de variations lithologiques importantes.

Le développement d'un modèle simple de Winkler par éléments finis a permis de montrer l'importance de la variabilité longitudinale du sol et d'un retrait sur les déplacements et les moments fléchissants d'une semelle filante. Il apparaît ainsi, comme le précisent les Eurocodes pour les fondations de bâtiments, que les semelles filantes de maisons individuelles doivent être dimensionnées, sur certaines sections, comme des poutres en appuis ou en console. Le modèle de Winkler ne peut être justifié du point de vue théorique, car la continuité fait qu'il n'y a pas de facteur de proportionnalité dépendant des seules caractéristiques du sol, entre les incréments de pression et de déplacement. Cependant, l'expérience montre qu'il est possible, avec une telle approche, d'obtenir une estimation raisonnable des sollicitations et déformations des structures. Ceci reste à confirmer dans le cas des semelles filantes des maisons individuelles.

Diverses améliorations peuvent être apportées au modèle, telles que l'évolution dans le temps du coefficient de réaction, une variation de la rigidité flexionnelle le long de la semelle ou encore la prise en compte de poteaux aux extrémités des semelles filantes et des

linteaux qui forment avec la semelle un cadre rigide rempli par les éléments de maçonnerie. Le recours à des simulations de Monte-Carlo permettra de quantifier les risques de dépasser certaines valeurs caractéristiques de déplacements et d'efforts internes pour se rapprocher d'une analyse fiabiliste du comportement d'une fondation superficielle.

Dans le cas de la construction d'une maison individuelle, une reconnaissance sur la variabilité des sols et

leur aptitude au retrait-gonflement associé à un véritable dimensionnement des fondations superficielles permettraient d'éviter, dans beaucoup de cas, un recours à un système de fondation sur micropieux qui devient systématique sans être pour autant le mieux adapté.

REMERCIEMENT

Cette étude est en partie financée par le projet ANR ARGIC (Argile, Retrait, Gonflement et Incidences aux Constructions) du RGCU.

Bibliographie

- Avramidis I.E., Morfidis K. - Bending of beams on three-parameter elastic foundation. *International Journal of Solids and Structures*, n° 43, 2006, p. 357-375.
- Benson A.K., Payne K.L., Stubben M.A. - Mapping groundwater contamination using dc resistivity and VLF geophysical method, a case study. *Geophysics*, n° 62, 1997, p. 80-86.
- Breysse D., Niandou H., Elachachi S.M., Houy L. - Generic approach of soil-structure interaction considering the effects of soil heterogeneity. *Geotechnique*, 55, n° 2, 2005, p. 143-150.
- Cassan M. - *Les essais in situ en mécanique des sols*, tome II, Éditions Eyrolles, 1978.
- Combarieu O. 2006. L'usage des modules de déformation en géotechnique. *Revue française de géotechnique*, n° 114, 2006, p. 3-32.
- Denis A., Marache A., Obéllianne T., Breysse D. - Electrical resistivity borehole measurements: application to an urban tunnel site. *J. Appl. Geophys.*, 55, 3, 2002, p. 69-81.
- Elachachi S.M., Breysse D., Houy L. - Longitudinal variability of soils and structural response of sewer networks. *Computers and Geotechnics*, n° 31, 2004, p. 365-641.
- Fenton G.A., Vanmarcke E.H. - Simulation of random fields via local average subdivision. *J. Eng. Mech.* ASCE, 116 (8), 1990, p. 1733-1749.
- Fenton G., Griffiths M. - Probabilistic foundation settlement on spatially random soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 128, n° 5, 2002, p. 381-390.
- Frantziskonis G., Breysse D. - Influence of soil variability on differential settlements of structures. *Computers and Geotechnics*, n° 30, 2003, p. 217-230.
- Houy L., Breysse D., Denis A. - Influence of soil heterogeneity on load redistribution and settlement of an hyperstatic 3-support frame. *Geotechnique*, 55, n° 2, 2005, p. 163-170.
- Horvath J.S. - Beam-column-analogy model for soil-structure interaction analysis. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119 (2), 1993, p. 358-364.
- Kerr A.D. - A study of a new foundation model. *Acta Mech.*, 1/2, 1965, p. 135-147.
- Morfidis K. - Exact matrices for beams on three-parameter elastic foundation. *Computers and Structure*, 2007.
- Niandou H., Breysse D. - Reliability analysis of a piled accounting for soil horizontal variability. *Computer Geotechnics*, n° 34, 2007, p. 71-78.
- Oskooi B., Pedersen L.B. - Comparaison between VLF and RMT methods. A combined tool for mapping conductivity changes in the sedimentary cover. *J. Appl. Geophys.*, n° 57, 2005, p. 227-241.
- Spies B.R. - Depth of investigation in electromagnetic sounding methods. *Geophysics*, n° 54, 1989, p. 872-888.
- Spies B.R. - Electrical and electromagnetic borehole measurements: a review. *Surv. Geophys.*, n° 17, 1996, p. 517-556.
- Vanmarcke E.H. - *Random Fields: Analysis & Synthesis*. MIT Press, Cambridge, 1983, 384 p.
- Vesic A.S. - Beams on elastic subgrade and the Winkler hypothesis. *5th int. conf. soil mech. Found. Engng*, Paris, vol. 1, 1963, p. 845-850.
- Vlassov V.L., Leontiev N.H. - *Beams plates and shells on elastic foundations*. Moscow, Fizmatgiz, 1956.
- Winkler E. - *Die Lehre von der Elasticitae und Festigkeit*. Prag, Dominicus, 1867.
- Zhang J., Ellingwood B. - Effects of uncertain material properties on structural properties. *Journal of structural Engineering ASCE*, 121 (4), 1995, p. 705-716.

Confortement des fondations de deux bâtiments sinistrés par la sécheresse à Palaiseau

Reprise-en sous-oeuvre des fondations par micropieux et longrines

D. COUSIN, S. FORTIER

ARCADIS ESG
18, rue Troyon
92316 Sèvres

Résumé

Les immeubles D et E du Parc d'Ardenay, implantés sur le flanc de la colline de Palaiseau, ont subi d'importants désordres à la suite de la sécheresse et de mouvements de terrains. ARCADIS a élaboré un dispositif de confortement consistant en une rigidification en béton armé de la structure par longrines, associée à une reprise en sous-œuvre des fondations par micropieux. L'article présente les aspects conception et réalisation de ce chantier de confortement qui doit s'achever en mai 2007.

Mots-clés : mouvement de terrains, sécheresse, confortement, reprise en sous-œuvre, micropieux, longrines.

Confortement of two buildings foundations' victim by the dryness at Palaiseau

Underpinning of the foundations by micropiles and footings

Abstract

Buildings D and E at Parc d'Ardenay, located on a hillside from Palaiseau, experienced significant deterioration as a result of dryness and land displacement. ARCADIS worked out a strengthening system consisting in stiffening the structure with reinforced concrete using footings associated with the underpinning of the foundations by micropiles. The article describes the design and execution aspects for this strengthening project scheduled for completion in May 2007.

Keywords: and displacement, dryness, strengthening, underpinning, micropile, footing.

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 30 avril 2008.

Les immeubles D et E, rue d'Ardenay à Palaiseau, sont situés sur le flanc de coteau sud-est du plateau de Palaiseau dominant toute la vallée de la Bièvre au nord et de l'Yvette au sud. Ces bâtiments font partie d'un ensemble de six bâtiments réalisés dans les années 1970 en périphérie du château d'Ardenay dans le parc d'Ardenay.

D'orientation principale E-O (Fig. 1), les bâtiments D et E, de type R+3/5 avec sous-sol semi enterré à usage de caves, sont bordés en façade nord par la rue d'Ardenay et en façade sud par le coteau de Palaiseau. Ils sont situés vers la cote de + 145 NGF, toutefois le bâtiment E suit la pente du talus pour atteindre, en partie aval, la cote de + 140 NGF.

Les dimensions des bâtiments D et E sont respectivement de 70 m et 130 m pour la longueur et de l'ordre de 8 m pour la largeur (Fig. 1 et 2).

A l'exception des façades de type voile, la structure des immeubles est constituée de poteaux et poutres en béton armé. Les fondations des immeubles sont superficielles, de type semelles isolées et filantes ; elles reposent vers 0,80 m de profondeur par rapport au niveau bas du sous-sol et vers 2 m de profondeur par rapport au niveau du terrain naturel, dans les argiles à meulière en place.

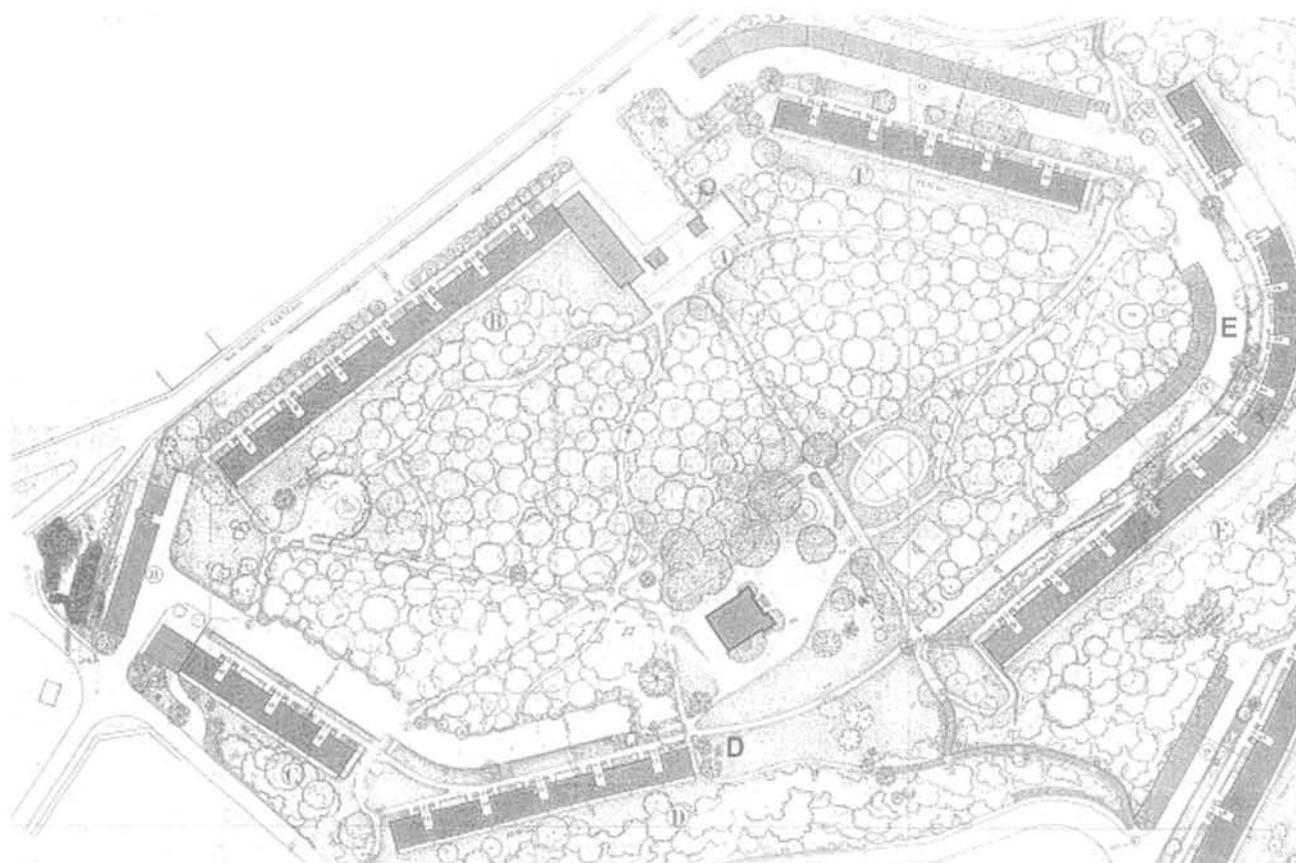


FIG. 1 Plan masse des bâtiments D et E.
Plan of buildings D and E.



FIG. 2 Vues des bâtiments E et D.
View of buildings E and D.

Géologie

Du point de vue géologique, on rencontre dans cette zone, d'après la carte géologique de Corbeil au 1/50 000, des résidus locaux de limons des plateaux, puis les argiles à meulière sur 3 à 4 m d'épaisseur surmontant les sables de Fontainebleau (Fig. 3). Une nappe d'eau superficielle alimentée par les eaux météoriques peut baigner les limons des plateaux, retenue par les argiles à meulière peu perméables. Très fluants, les argiles à meulière et les sables de Fontainebleau de nature argileuse recouvrent généralement les niveaux sous-jacents des marnes à huîtres et du marno-calcaire de Brie sur le pied de la colline.

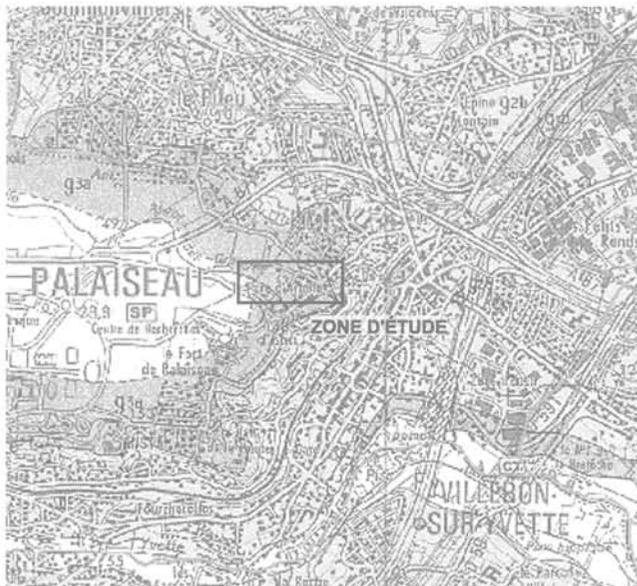


FIG. 3 Extrait de la carte géologique de Corbeil au 1/50 000 (BRGM, 1979).
Extract of the geological map of Corbeil.

Les désordres

Sur ces deux immeubles, les désordres se traduisent par l'apparition de fissures intérieures et traversantes au droit des planchers haut du rez-de-chaussée, prenant naissance à partir des poteaux ainsi que d'autres fissures localisées sur les murs cloisons accolés aux poteaux. Les poteaux intérieurs sont affectés par un cisaillement important aux liaisons avec les murs intérieurs. A l'extérieur, des fissures verticales (ouverture de l'ordre du centimètre) prolongent les joints de dilatation sur la hauteur des voiles des façades des immeubles. Dans les caves, le dallage est fortement fissuré et d'autres fissures affectent les murs cloisons des caves.

Ce sinistre a fait l'objet d'une expertise judiciaire durant laquelle ARCADIS ESG a réalisé un diagnostic géotechnique afin de déterminer l'origine des désordres et de proposer une solution de travaux confortatifs pour mettre en sécurité les deux bâtiments. En complément, une instrumentation a été mise en place sur les bâtiments sinistrés pour permettre de suivre au fil des saisons, l'évolution des désordres. Cette ins-

trumentation a comporté la pose d'extensomètres tri-directionnels (mesure de l'écartement, du rejet et du glissement) sur les fissures et les joints, et de nivelles sur les façades (mesure de l'inclinaison) (Fig. 4 et 5).



FIG. 4 Vue sur fissure oblique (rampe du sous-sol bâtiment E) avec capot de protection de l'instrumentation.
View of disorder and instrumentation.

Diagnostic

Pour établir le diagnostic, la reconnaissance a comporté la réalisation de huit sondages pressiométriques, de deux sondages de type *Standard Penetration Test*, ainsi que de quatre sondages carottés. Parallèlement, des puits de reconnaissance des fondations ont été exécutés pour caractériser leur nature et permettre le prélèvement et l'analyse en laboratoire des terrains d'assise. (Fig. 6).

Les sondages ont mis en évidence la présence de remblais sur 2 m. d'épaisseur maximum puis les argiles à meulière reconnues au maximum jusqu'à 8,50 m. de profondeur, peu à moyennement consistantes. Ces argiles, terrains d'assise des semelles de fondation (ancrage de 0,80 m par rapport au niveau du sous sol), ont montré par des essais en laboratoire, une teneur en eau naturelle sur les deux premiers mètres de l'ordre de 20 à 25 % et une augmentation de près de 10 points à 3 m de profondeur. Les teneurs en eau généralement constatées pour cette formation sont voisines de 35 %, ce qui montre indéniablement le dessèchement en surface des argiles (Fig. 7). La détermination des pressions de gonflement sur cette même formation a mis en évidence des terrains avec une forte propension au gonflement avec des valeurs de l'ordre de 0,2 MPa à 2 m de profondeur et de 0,5 MPa à 4 m de profondeur. Les sables de Fontainebleau ont été reconnus directement sous les argiles à meulière jusqu'à 15,50 m de profondeur. Les essais effectués dans cette formation caractérisent des terrains de très bonne compacité.

Résidence du Parc d'Ardenay 9, rue Bertaud - PALAISEAU

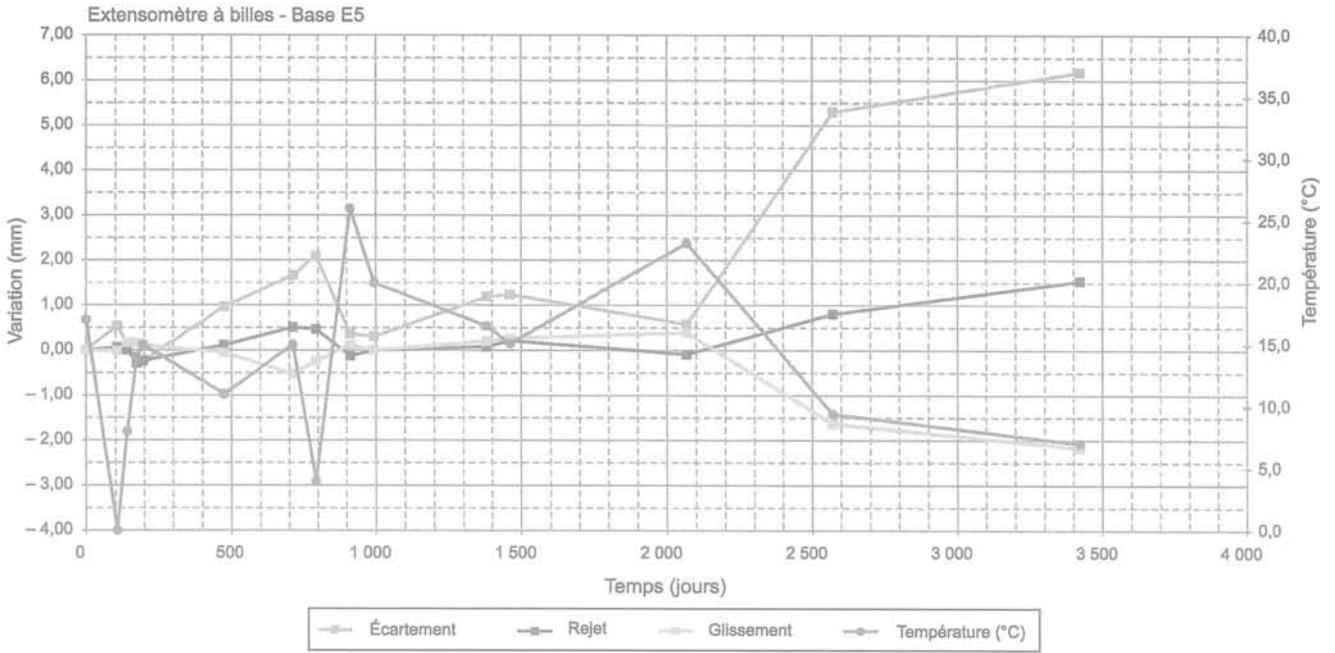


FIG. 5 Courbe de suivi des mesures d'une nivelle du bâtiment E.
Curve of measurements of instrumentation of the building E.

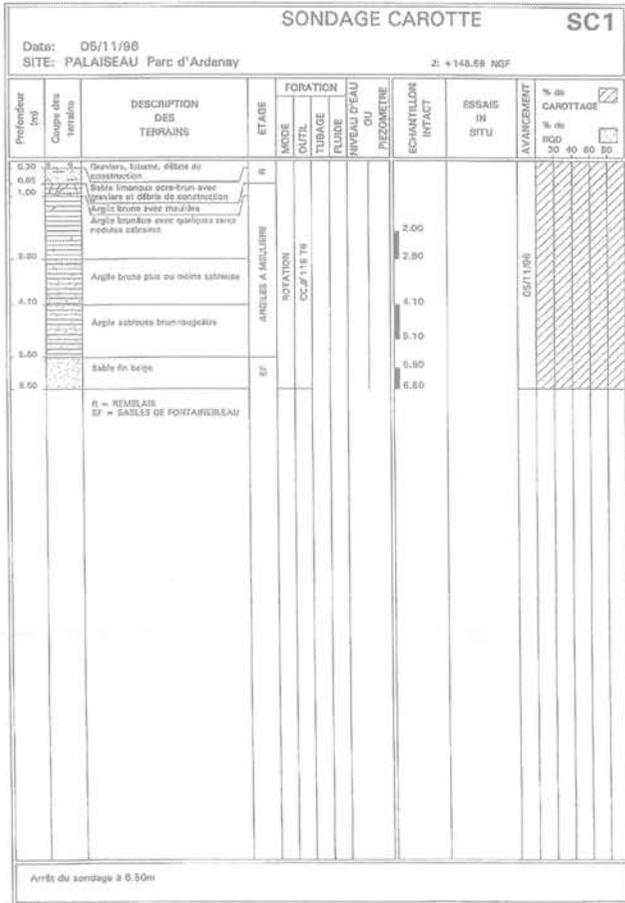


FIG. 6 Sondage carotté réalisé au droit du bâtiment D (doc. Arcadis).
Sounding core on building D..

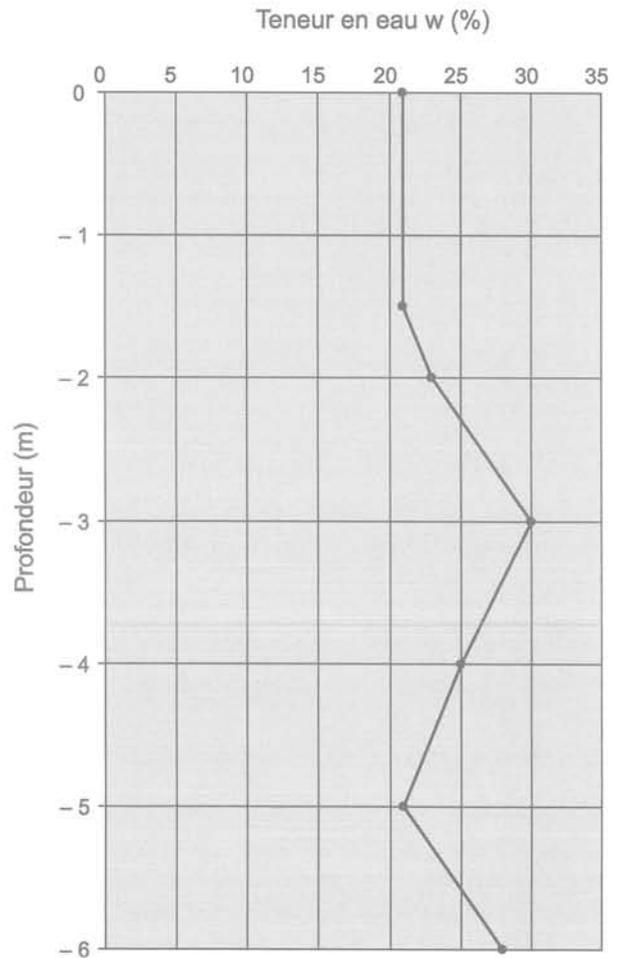


FIG. 7 Profil hydrique des matériaux (doc. Arcadis).
Material's hydro section..

L'auscultation des deux bâtiments a mis en évidence des mouvements cycliques, d'amplitude variable d'un point à un autre, liés aux variations thermiques saisonnières. Les fissures ont tendance à s'ouvrir au cours de l'été et se refermer en hiver, toutefois les mouvements n'apparaissent pas toujours entièrement réversibles. Ceci est caractéristique d'un sol d'assise avec une tendance à la dessiccation qui induit un tassement des fondations des deux bâtiments.

4

La conception générale du dispositif de confortement

4.1

Renforcement de la structure

Au vu des désordres qui affectent les deux immeubles et de leur évolution, il a été nécessaire de procéder au renforcement de la structure, celle-ci reposant en intérieur sur des appuis ponctuels de type poteaux et en périphérie sur des voiles ; ces structures étant fondées dans les argiles à meulière.

Le projet de confortement comprend un dispositif de longrines en béton armé liaisonnées aux fondations existantes et reposant sur des micropieux au droit des poteaux et des voiles périphériques. Ces longrines ont pour but de redonner une rigidité suffisante à l'immeuble, de manière à s'opposer à une nouvelle évolution localisée des tassements et/ou gonflement et à une évolution, de faible amplitude, de mouvements horizontaux.

Les reconnaissances géotechniques menées dans le cadre de l'expertise ont montré que le toit des formations insensibles aux variations de teneurs en eaux se situe vers 6 m de profondeur environ. Pour la pérennité du dispositif de longrines, il importe donc de reporter les charges amenées par les voiles et poteaux dans ces terrains, soit un ancrage entre 6 m et 14 m de profondeur, en fonction des descentes de charges, dans les sables de Fontainebleau.

Au total sont prévus 266 micropieux pour le bâtiment D et 460 micropieux pour le bâtiment E, dimensionnés pour reprendre une charge de 90 tonnes maximum, au droit des poteaux les plus chargés, et une charge maximale de 30 T/ml au droit des voiles béton. Ces charges importantes ont amené à la réalisation de micropieux de type III (avec injection sous pression) qui donnent un meilleur frottement latéral dans les terrains traversés et permettent ainsi une reprise de charge plus importante qu'un micropieu de type II.

4.2

Phasage

La chronologie prévue pour les travaux de chaque bâtiment (durée de l'ordre de 16 mois) est la suivante :

- démolition des dallages et des murs refends des caves ;
- réalisation des micropieux ;

- terrassement pour longrine et recépage des micropieux ;
- liaisonnement des micropieux par les longrines pour les voiles ou massifs au droit des poteaux ;
- remblaiement des fouilles et mise à niveau de la plateforme des sous-sols,
- réalisation du dallage ;
- réfection des murs de caves.

4.3

Micropieux

Les travaux de micropieux ont commencé après validation des hypothèses de dimensionnement au moyen d'essais de traction sur des micropieux réalisés en dehors de l'emprise des bâtiments. Les essais ont donc permis de valider la longueur de scellement des micropieux et de vérifier que les charges de rupture et de fluage ne sont pas atteintes dans les contraintes réelles du projet.

Les micropieux de type III ont été réalisés au moyen de deux ateliers par bâtiment, avec des machines équipées d'enregistrements en continu des paramètres de forage. Après traçage et implantation des micropieux, un carottage des fondations existantes a été effectué d'un diamètre de 175 mm pour les micropieux de diamètre 150, et de 220 mm pour les micropieux de diamètre 200. Le forage est effectué à l'aide d'un taillant perdu de diamètre 150 mm ou 200 mm avec mise en place en continu de barres métalliques autoforantes de diamètre extérieur de 73,5 mm pour les micropieux de 200 mm et de 49,3 mm pour les micropieux de diamètre 150 mm. Pendant le forage des micropieux, un coulis de ciment dosé à 1 200 kg/m³ est injecté en continu avec une pression de l'ordre de 10 bars. Le coulis est injecté à saturation et l'excédent est pompé, tamisé et recyclé dans la cuve d'injection. L'injection est maintenue à la profondeur prévue et jusqu'à la remontée de coulis propre. Après l'injection, les micropieux sont tubés sur toute la hauteur des argiles au moyen de tube PVC descendus à l'aide de la tête de forage afin de s'affranchir des frottements parasites induits par les éventuels gonflements et retraits de cette formation liés aux variations hydriques (Fig. 8).

4.4

Longrines

Les terrassements sont d'abord réalisés mécaniquement devant les voiles périphériques, jusqu'à l'assise des fondations. Au droit des micropieux des voiles, et par des passes de 1,5 m à 2 m, les terrassements sont réalisés sous la fondation existante. Le micropieu est recépié à la hauteur prévue pour être liaisonné aux armatures de la longrine. (Fig. 9). Au droit de chaque poteau isolé, les têtes de massifs sont scellées en contre-œuvre par l'intermédiaire d'armatures liaisonnées aux micropieux (Fig. 10 et 11).

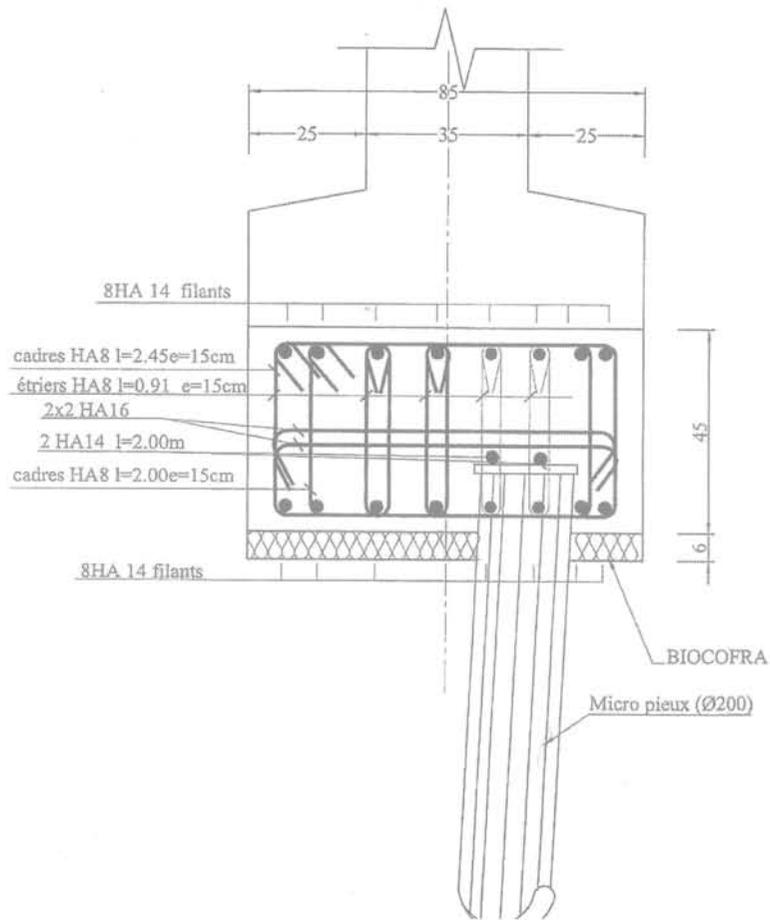


FIG. 8 Plan de principe de reprise des voiles par longrines au droit d'un micropieu (Cahier des clauses techniques et particulières, Cabinet Croué-Landaz, 2004).
Section on underpinning at level of micropile..

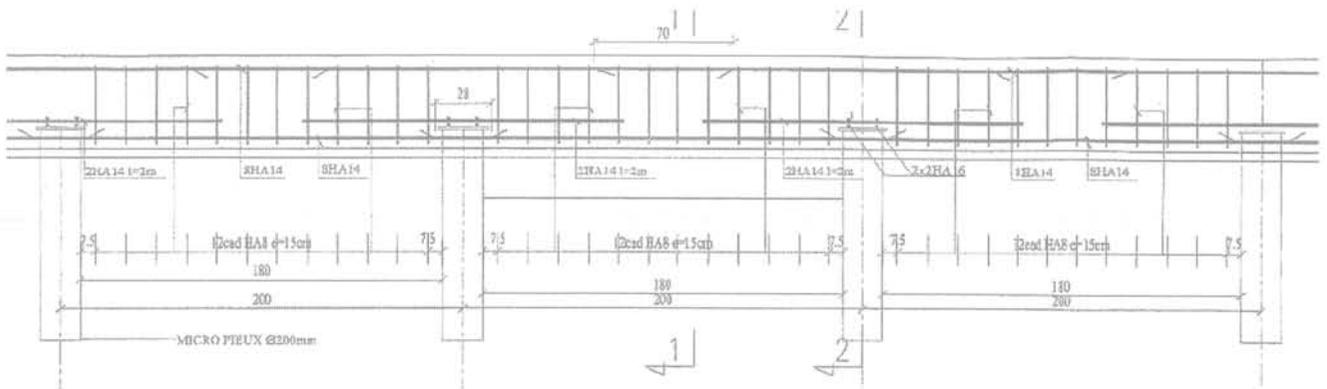


FIG. 9 Plan de principe de reprise par micropieux et longrine sous voile (Cahier des clauses techniques et particulières, Cabinet Croué-Landaz, 2004).
Section on underpinning by micropiles and footings.

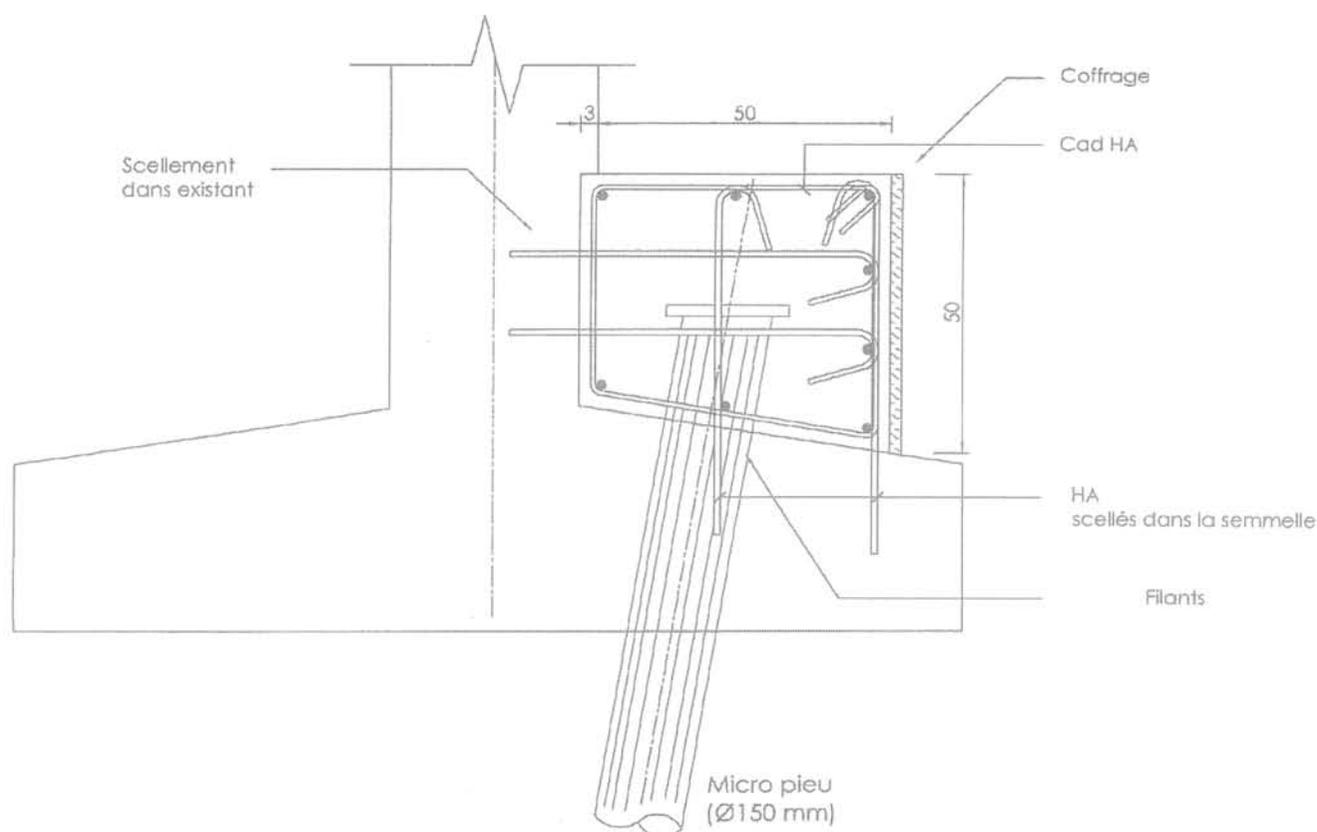


FIG. 10 Coupe de principe de coffrage et ferrailage sous poteau (Cahier des clauses techniques et particulières, Cabinet Croué-Landaz, 2004).
Section on shuttering and reinforcement under beam.

Les armatures, comprenant aciers filants et cadre de répartition sont de type HA18 et HA20 et sont réalisées directement dans la fouille sur un coffrage biodégradable. Ce coffrage permet grâce au vide créé sous la longrine après sa dégradation, de s'affranchir des possibles gonflements des argiles en surface qui affecteraient les nouvelles fondations. Après la mise en place d'un coffrage en bois, le béton, dosé à 350 kg/m³ est coulé pour englober les micropieux et les armatures et ainsi créer la nouvelle fondation.

4.5

Travaux de remblais et dallage

A la fin des travaux, les fouilles réalisées sont comblées par les matériaux extraits et soigneusement compactés. La plate-forme est réalisée après la purge, la mise à niveau et le compactage du terrain sur lequel sera disposé un dallage béton. Pour ce dallage, réalisé sur terre-plein et dissocié des voiles périphériques, des nappes de treillis soudés ont été disposées sur toute la superficie du sous-sol des bâtiments (Fig. 12). Le béton a été coulé pour atteindre une épaisseur de 15 cm environ avec l'exécution de joints de fractionnement, permettant en cas de gonflement des argiles sous-jacentes de prévenir l'apparition de fissures sur dallage.



FIG. 12 Treillis soudé avant coulage du béton de dallage.
Girder before casting of pavement.

5

Contrôle des exécutions

Pendant toute la durée des travaux, les contrôles ont été effectués par des visites régulières sur site avec la

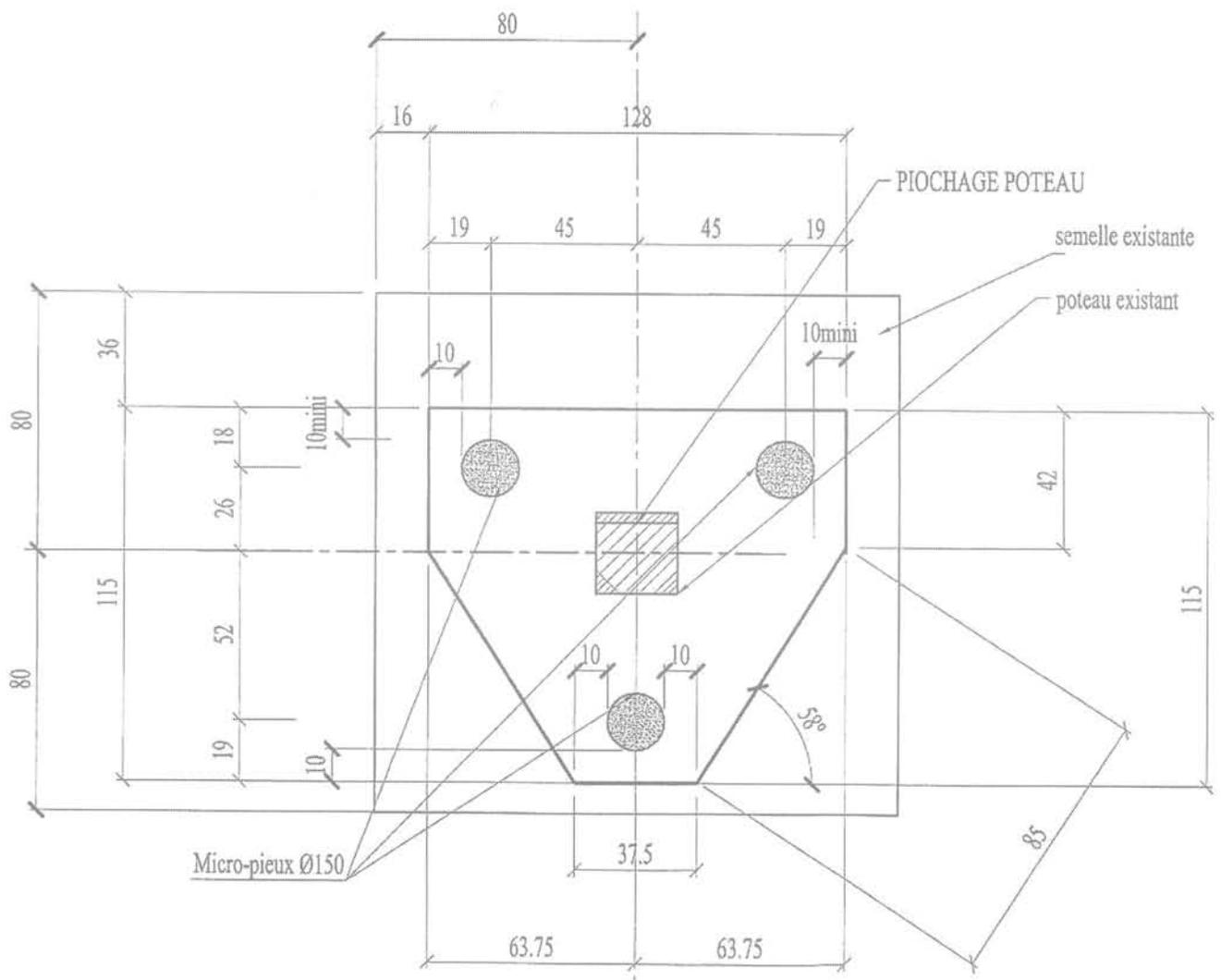


FIG. 11 Plan de principe de reprise des poteaux (Cahier des clauses techniques et particulières, Cabinet Croué-Landaz, 2004).
Cabinet Croué-Landaz, 2004).
Plan view of underpinning of beams.

vérification des matériaux utilisés et des méthodologies d'exécution mises en place. Ces contrôles ont notamment comporté, outre les essais de traction sur micropieux, des essais d'écrasement sur les coulis de micropieux.

Une fois les travaux de reprise en sous-œuvre complètement terminés, il est nécessaire de laisser un délai

entre la fin des travaux et la réparation des fissures. Une période d'une année entière sera donc adoptée, de manière à ce que les charges des bâtiments se transfèrent dans les micropieux ce qui entraîne de nouveaux mouvements. Cette période révolue, il sera donc possible de reprendre toute la superstructure endommagée du bâtiment.

Bibliographie

BRGM – Carte géologique de Corbeil à l'échelle de 1/50 000, 1979.

Cabinet Croué-Landaz, Arcadis ESG – Cahier des clauses techniques particulière

de la reprise en sous-œuvre des bâtiments B et D du parc d'Ardenay, 2004.

Phénomènes de gonflement/ retrait dans des marnes, ou « schistes cartons », du Toarcien

A. MONJOIE

Université de Liège
Sart Tilman B19, B-4000 Liège
A.Monjoie@ulg.ac.be

C. SCHROEDER

Université de Liège, départe-
ment ArGEnCo
Sart Tilman B52/3, B-4000
Liège
Christian.Schroeder@ulg.ac.be

Résumé

Les phénomènes de gonflement / retrait observés sur les marnes du Toarcien, appelées « schistes cartons », induisent des désordres importants au niveau des fondations des ouvrages chargés différenciellement. Sans être directement en relation avec la sécheresse, ils sont cependant essentiellement dus aux cycles d'hydratation / dessiccation auxquelles ces roches particulières sont soumises au fil des saisons, variations hydriques pouvant être accentuées par la présence d'ouvrages chauffants (fours). L'article présente les résultats d'une étude réalisée sur les matériaux du sous-sol d'une usine présentant des gonflements permanents d'amplitude parfois décimétrique. Les essais de gonflement en laboratoire et la caractérisation minéralogique des matériaux par diffraction X permettent de mettre les mécanismes en évidence et d'expliquer ceux-ci par les variations minéralogiques (gypse-anhydrite) liées à la présence de pyrite et de calcite au sein de ces marnes.

Mots-clés : Marnes, Toarcien, schistes-cartons, gonflement, retrait, anhydrite, pyrite, gypse, essais de laboratoire et *in situ*.

Swelling/shrinkage phenomenon in Toarcian marls, or "cardboard shales"

Abstract

The swelling / shrinkage phenomenon observed on the Toarcian marl, also called "cardboard shale", causes somewhat large damage to the foundations of differentially loaded buildings. If they are not directly linked to the drought, they are nevertheless due to the seasonal hydration / drying cycles supported by these specific materials. The moisture variations can be increased by the presence of some heating buildings (ovens). The paper presents the results of a study performed on the subsoil material of a plant subjected to some permanent decimetric swellings. The laboratory swelling tests and the mineralogical X-Ray diffraction analyses allow to point out the mechanisms and their relationships with the mineralogical modifications (gypsum-anhydrite) induced by the presence of calcite and pyrite in these marls.

Key words: Marls, Toarcian, cardboard shale, swelling, shrinkage, pyrite, anhydrite, gypsum, laboratory and *in situ* tests.

NDLR : Les discussions sur
cet article sont acceptées
jusqu'au 30 avril 2008.

Introduction

Sur les bords septentrionaux et méridionaux du Massif ardennais, les formations transgressives du Crétacé au nord et du Jurassique au sud contiennent plusieurs horizons marneux riches en minéraux argileux interstratifiés gonflants, l'horizon de smectite de Herve au nord et les marnes du Toarcien au sud. Ces horizons sont également riches en pyrite (Fourmarier, 1954).

C'est au droit des marnes du Toarcien que des soulèvements importants des radiers de grands halls industriels ont été mis en évidence. Outre leur grande ampleur, ils ne présentent pas les caractères classiques de réversibilité : gonflement/retrait en fonction des cycles d'humidification - séchage des phénomènes dus aux minéraux argileux du type bentonite, smectite, interstratifiés illite-smectite...

Le cas étudié est relatif à un grand hall industriel où de fortes productions périodiques de chaleur accompagnent des coulées de matières en fusion au départ de fours à très hautes températures (environ 1 500 °C).

Les soulèvements des dalles du hall sont pratiquement continus sans phase de retrait, et atteignent 38 à 78 mm en 14 mois après plusieurs sollicitations thermiques apportées par les coulées de matière en fusion. L'implantation relative des points de mesures et les évolutions des gonflements sont présentées respectivement aux figures 1 et 2.

Par contre, les pieds de colonnes du hall comme ceux des fours et machines lourdes restent stables, du fait des descentes de charge importantes en ces points par rapport à la contrainte de gonflement du sol de fondation.

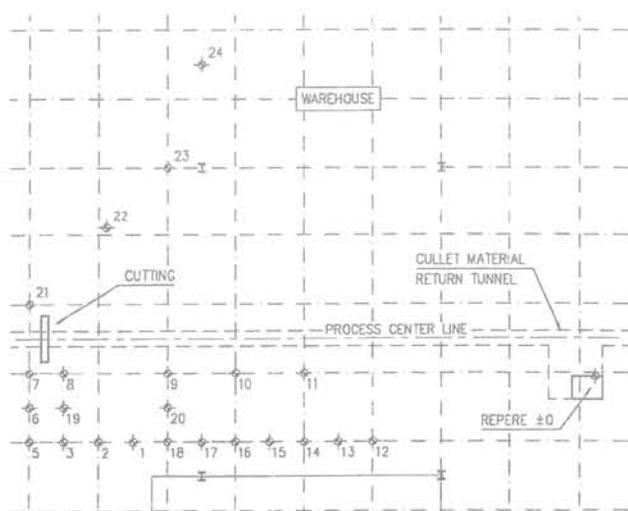


FIG. 1 Implantation relative des points de mesure des gonflements.
Relative location of measuring points of swelling.

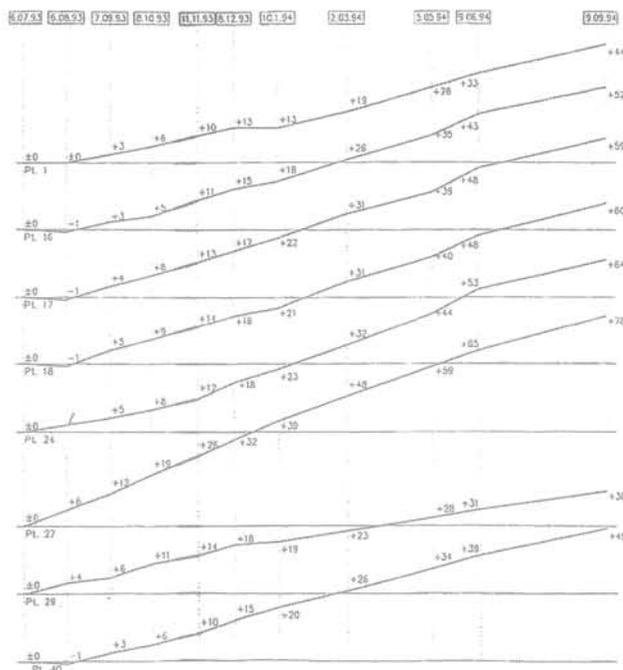


FIG. 2 Mesures de gonflement (durée : un an).
Swelling measurements (duration: one year).

Géologie régionale

Elle est caractérisée par des terrains mésozoïques (245 à 65 millions d'années) formant un paysage en cuestas. Ces terrains (Maubeuge, 1954) reposent en discordance sur un socle d'âge dévonien (400 à 360 millions d'années), qui affleure plus au nord. Les roches, au droit du site, appartiennent au Jurassique-Lias supérieur, et plus précisément à l'étage du Toarcien (187 millions d'années).

Pour reconnaître les terrains sur lesquels le hall est construit, un « tunnel » de 8 m de long et d'une section de 2 m sur 3 m a été réalisé sous le hall. Les roches présentes sont des marnes finement feuilletées, appelées « schistes cartons » dans la région en raison du faciès papyracé qu'elles présentent quand elles s'altèrent. Généralement riches en fossiles, elles contiennent de la matière organique disséminée et des sulfures, notamment de la pyrite (FeS_2), sous forme de veinettes dans les plans de stratification, de petites lentilles ou de nodules. On peut également observer de nombreuses veines de calcite (CaCO_3), d'une épaisseur comprise entre quelques millimètres et plusieurs centimètres. La plus grande partie de ces veines a cristallisé à la faveur de plans de diaclases perpendiculaires à la stratification qui est subhorizontale (pendage de 0 à 5° vers le sud-ouest). Les roches sont assez humides avec localement quelques suintements. La perméabilité des marnes est faible (10^{-7} à 10^{-8} m/s), ce qui implique que les réactions chimiques se passent en milieu pratiquement confiné.

Le lever géologique de cet affleurement artificiel est représenté à la figure 3. On y remarque la présence de bancs centimétriques à millimétriques de marnes, les filons de calcite (Ca) et les inclusions pyriteuses (Py).

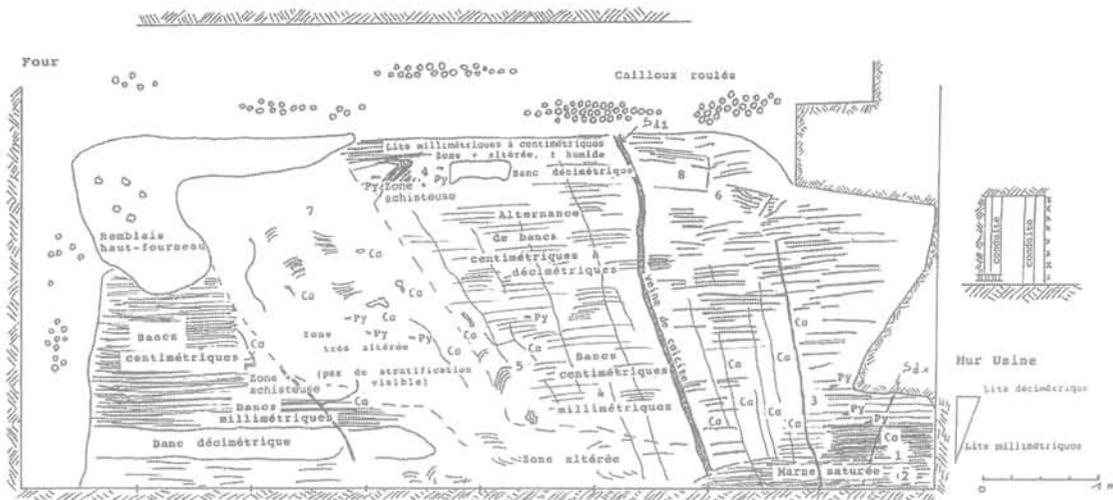


FIG. 3 Lever géologique du sous-sol de l'usine.
Geological survey of plant underground.
(Py : pyrites; Ca : calcite)

De nombreux échantillons ont été prélevés dans les différents faciès rencontrés : zones à bancs millimétriques, à bancs centimétriques, à bancs décimétriques, zones sans stratification, secteurs fissurés et altérés. Ils ont fait l'objet d'analyses minéralogiques et d'essais géotechniques.

3

Analyses minéralogiques

Les analyses ont été réalisées sur la roche totale par diffractométrie RX au moyen d'un appareil Philips PW2006 par techniques classiques sur poudre totale désorientée et sur la fraction argileuse (< 2µm) en agrégats orientés. La nature des minéraux présents a été déterminée ainsi qu'une estimation semi quantitative¹. Un examen en lames minces a complété l'étude. Six échantillons caractéristiques ont été analysés.

Dans l'ensemble, la composition des échantillons est assez similaire.

¹ La méthodologie est celle décrite par Thorez (1976). La méthode d'estimation semi-quantitative est celle définie par Cook *et al.* (1975), revue et complétée par Boski *et al.* (1998).

Du point de vue de la roche totale, dans les 6 échantillons (tableau I), la calcite et le quartz dominant, accompagnés de la kaolinite, d'une illite ouverte, de gypse, de pyrite et de marcasite, ainsi que des traces de feldspaths, de sidérite, de jarosite. La dolomite apparaît en proportion importante (15 à 26 %) dans trois échantillons.

En lames minces, on constate que la calcite est souvent présente en fines cristallisations suivant le litage et en petites veinettes transversales. Le quartz est généralement présent sous forme de veines.

Du point de vue de la fraction argileuse, les constituants sont par ordre décroissant (tableau II), la kaolinite, une illite ouverte par départ des ions K⁺ des espaces interfoliaires, un interstratifié irrégulier (10-(10-14Sm)) à feuillettes illitiques dominants et smectitiques, un interstratifié irrégulier (10-14C) à feuillettes illitiques et chloritiques et de la chlorite.

En résumé, les roches formant le sous-sol du site contiennent en moyenne 20 % de minéraux argileux, dont environ 10 % sont gonflants (représentant environ 2 % de la masse totale). Ces minéraux gonflants, même en faible quantité, provoquent un gonflement significatif (Monjoie *et al.*, 1992, Monjoie, 1997).

TABLEAU I Analyse de la roche totale.

Échantillon	1	2	3	5	6	9
Calcite	53 %	24	37	48	57	63
Quartz	30 %	49	30	34	20	9
Kaolinite	5 %	7	7	6	2	1
Illite ouverte	3 %	5	4	4	1	Traces
Pyrite	2,5 %	5	3	1	< 1	1
Marcasite	2,5 %	2	2			
Gypse	1 %	4	2	6	4	
Dolomite			15		15	26
Sidérite	3 %	1		Traces	?	?
Feldspath	Traces	1	Traces	1	Traces	Traces
Jarosite	?	?	?	Traces	?	?
Chlorite		1				

TABEAU II Analyses de la fraction argileuse.

Échantillon	1	2	3	5	6	9
Kaolinite	36	37	41	40	48	55
Illite ouverte	27	30	26	27	21	22
10-(10-14Sm)	24	20	20	20	15	12
10-14 C	7	6,5	5	6	9	5
Chlorite	6	6,5	8	7	7	6
Vermiculite	?	?	?	?	?	?

4

Essais classiques de gonflement (1^{re} phase)

Ces essais consistent en la réalisation en parallèle d'un essai de gonflement libre et d'une mesure de la pression de gonflement.

Pour la mesure du gonflement libre, l'échantillon (diamètre 50 mm, hauteur 20 mm) est posé sur un support et surmonté d'une plaque sur laquelle vient poser un capteur de déplacement permettant la mesure de la variation de hauteur de l'échantillon au cours du temps. L'essai comprend des cycles d'humidification (par aspersion en continu de l'échantillon) et de séchage « naturel » à l'air ambiant, avec un pas de temps de quelques heures (Fig. 4) au cours desquels on mesure l'amplitude du gonflement et l'amplitude du retrait.

La pression de gonflement est mesurée par un essai de gonflement empêché. Il consiste à placer l'échantillon dans un oedomètre standard, avec une contrainte initiale nulle. Ensuite, l'échantillon est humidifié par aspersion et la déformation axiale (changement de hauteur de l'échantillon) est surveillée. Sitôt qu'une déformation (1/100 mm) est détectée, la contrainte sur l'échantillon est augmentée, de manière à conserver une déformation nulle.

Sept échantillons ont été testés lors de plusieurs cycles d'humidification - séchage.

Globalement (tableau III), (à l'exception de l'échantillon n° 9, le moins riche en 10-(10-14Sm), qui gonfle peu), les échantillons ont un comportement similaire tel que présenté à la figure 4, relative à l'échantillon n° 2.

TABEAU III Valeurs de gonflement maximum et des contraintes de gonflement.

Échantillon	Gonflement maximal (%)	Contrainte de gonflement (kPa)
1	1.95	21
2	1.30	56
3	1.75	50
5	2.15	50
6	1.80	36
8	--	25
9	0.21	25

On constate que :

– le gonflement libre se manifeste dès le début de l'humidification. Il augmente assez rapidement (en quelques heures), et se stabilise ensuite ;

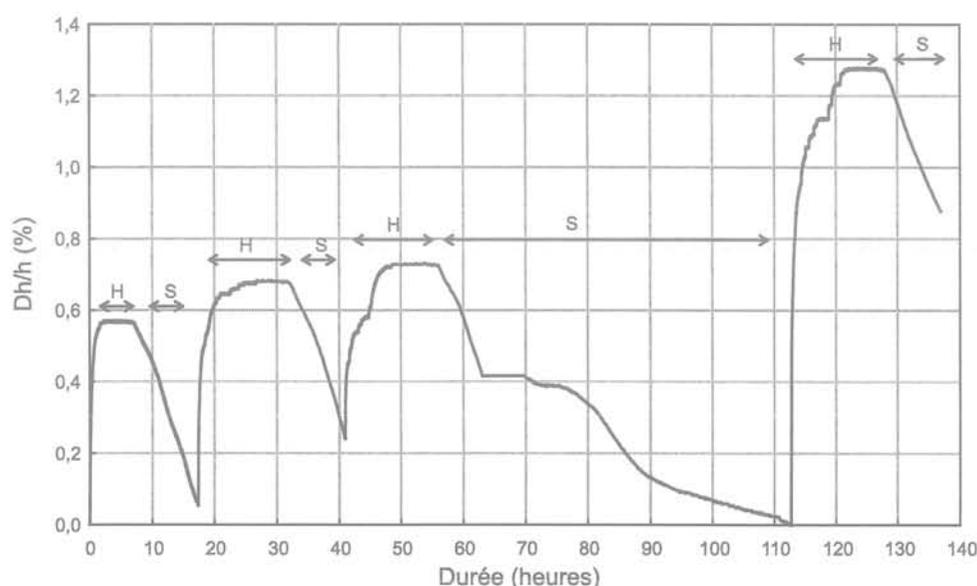


FIG. 4 Essai de gonflement - retrait sur marne pure; on remarque la réversibilité totale. H : phase d'humidification ; S : phase de séchage.

Swelling and shrinkage test on pure marl; note the complete reversibility. H: soaking phase; S: drying phase.

- le retrait en cours de séchage est pratiquement complet ;
- les valeurs de gonflement atteintes au cours de cycles ultérieurs de humidification/séchage ne dépassent pas ou peu la valeur atteinte au cours du premier gonflement et ne sont pas inférieures. Ceci indique que le matériau conserve son pouvoir gonflant ;
- après un essai de mesure de la contrainte de gonflement (essai à gonflement empêché), l'échantillon a gardé toutes ses capacités de gonflement et retrait.

Le gonflement maximal absolu est de 2,15 % et la contrainte de gonflement maximale absolue est de 56 kPa.

Cette première phase d'essais (Fig. 4) montre que le gonflement classique, dû aux seuls minéraux argileux gonflants du type 10-(10-14Sm), ne permet pas d'expliquer les soulèvements nettement plus importants et permanents constatés *in situ*.

Il est donc évident que d'autres processus entraînent en jeu.

5

Processus physico-chimiques en jeu

Le contenu minéralogique des roches prélevées dans le « tunnel » (tableau I) indique la présence de calcite (et parfois de dolomite), de pyrite et marcasite, de gypse, d'où l'hypothèse de réactions physico-chimiques affectant les pyrites et marcasites en présence d'H₂O et d'oxygène, avec formation d'H₂SO₄, qui attaque la calcite (et la dolomite), avec production d'anhydrite (CaSO₄) peu soluble mais, qui en présence d'eau, se transforme en gypse avec une augmentation volumique de plus de 60%.

Les réactions successives sont les suivantes:

- 1) $2\text{FeS}_2 + 7\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{FeSO}_4 + 2\text{H}_2\text{SO}_4$
- 2) $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{CaSO}_4 \text{ (anhydrite)} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$
- 3) $\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \text{ (gypse)}$ avec gonflement de plus de 60 %

Différentes autres réactions (Monjoie et Schroeder, 2001) peuvent produire de la sidérite (FeCO₂), de la jarosite KHF₆(SO₄) (OH), minéraux présents dans certains échantillons analysés (tableau I).

La réaction la plus importante est l'oxydation des sulfures de fer avec production d'acide sulfurique. Cette réaction est exothermique d'où une augmentation de température qui accélère la réaction.

Le séchage empêche la solubilisation du gypse, ce qui stabilise le gonflement acquis.

Dans ces conditions, les réactions sont quasi irréversibles d'où un gonflement permanent et l'absence de retrait.

6

Essai de longue durée et à long terme (2^e phase)

Des essais de longue durée, similaires à ceux qui ont été décrits au chapitre 4, ont été entrepris avec des périodes de plusieurs jours pour les humidifications et les séchages.

La figure 5 présente simultanément les résultats obtenus sur deux échantillons « compagnons » testés simultanément, l'un en gonflement libre, l'autre en gonflement empêché.

Après 1 300 heures (54 jours), le gonflement atteint environ 5 %. La contrainte de gonflement augmente en début d'essai puis se stabilise vers 80 à 90 kPa. Il est à noter que la contrainte de gonflement demeure inchangée au cours des cycles, ce qui est bien conforme avec le mécanisme suggéré.

Le gradient du gonflement augmente après 500 heures, puis 700 heures et ralentit légèrement après 960 heures.

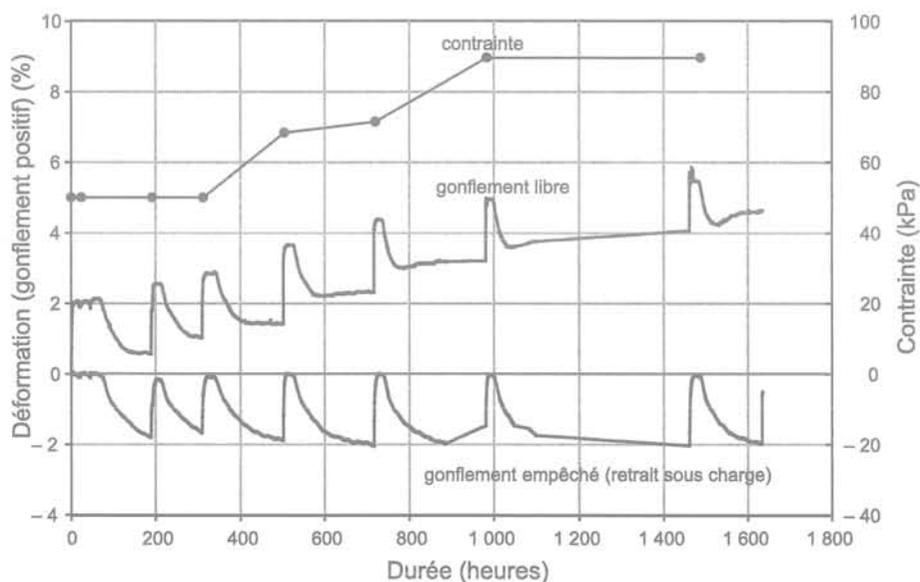


FIG. 5 Essai de longue durée sur une période de 54 jours ; mesure du gonflement libre et de la pression de gonflement.
 Long duration tests: 54 days period; measurement of free swelling and of swelling pressure.

Conclusion

Les résultats des essais de gonflement en laboratoire montrent le comportement très spécifique des « schistes cartons » testés.

Ces essais permettent d'expliquer les phénomènes observés *in situ* : gonflement des sols peu chargés tandis que les colonnes restent stables en raison des descentes de charges supérieures à la pression de gonflement.

Les analyses minéralogiques confirment la présence de gypse et anhydrite, la formation séquentielle de l'un et l'autre minéral au cours des cycles d'hydratation / séchage expliquant, lors de la dessiccation, la non réversibilité du gonflement provoqué par l'hydratation. Cette évolution pourrait être contrôlée par des analyses DRX à différents stades de l'essai avec quantification de certains minéraux, diminution de la teneur en pyrite, augmentation de la teneur en gypse... Le flux hydraulique faible dans les marnes joue un rôle important dans la pérennité du phénomène.

La partie inférieure de la figure 5 montre la compaction lors du cycle de séchage de l'échantillon à gonflement empêché. Cette compaction (retrait) est sensiblement constante au cours des cycles.

L'essai de gonflement libre a été poursuivi à long terme jusqu'à 206 jours (Fig. 6). Le gonflement atteint environ 25 %. Durant cette phase, le gradient du gonflement diminue légèrement après 50 jours, et de façon plus marquée après 105 jours.

Chaque dessiccation s'accompagne d'une déformation additionnelle permanente en fin de cycle, de sorte que, cycle après cycle, le gonflement total permanent augmente assez régulièrement. Ce phénomène est lié aux changements minéralogiques décrits ci-avant et, vraisemblablement, au piégeage d'éléments néoformés, empêchant l'échantillon de reprendre par retrait sa dimension originelle. Sur l'échantillon testé, le phénomène s'est poursuivi jusqu'à un gonflement total de l'ordre de 25 % qui aurait sans doute pu atteindre des valeurs plus élevées si l'échantillon ne s'était rompu par délitage, le phénomène pouvant théoriquement continuer jusqu'à la consommation totale de la calcite et de la pyrite présentes.

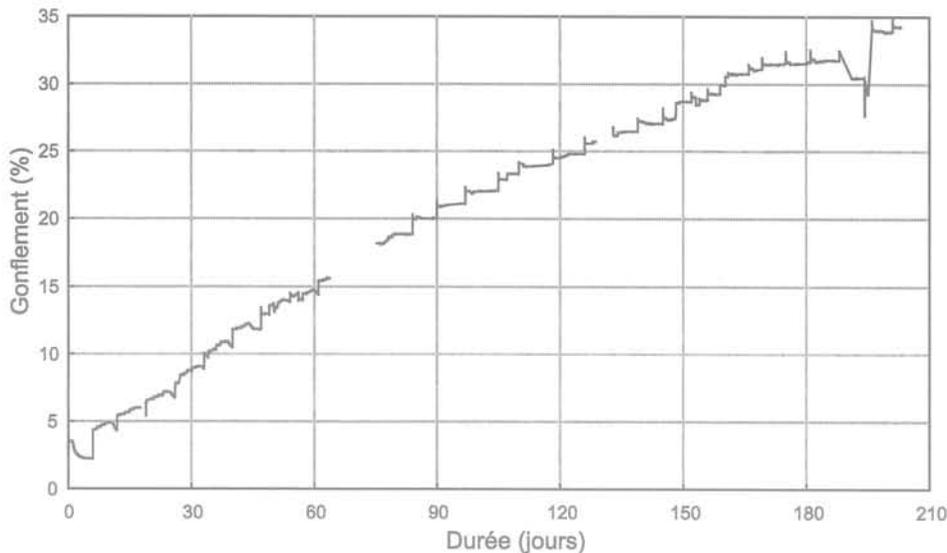


FIG. 6 Essai de longue durée sur une période de 150 jours.
Long duration tests: 150 days period.

Bibliographie

- Boski T., Pessoa J., Pedro P., Thorez J., Dias J.M.A., Hall I.R. - Factors governing abundance of hydrolysable amino acids in the sediments from the NW European Continental Margin (47-50°N). *Progressin Oceanography*, 42, 1998, p. 145-164.
- Cook H.E., Johnson P.D., Matti J.C., Zimmel J. - Methods of sample preparation and x-ray diffraction analysis in x-ray mineralogy laboratory. In Kaneps A.G. *et al.* (eds.), *Init. Repts DSDP XXVIII*, Print. Office, Washington DC, 1975, p. 997-1007.
- Maubeuge P. - Le Trias et le Jurassique du sud-est de la Belgique. *Prodrome d'une description géologique de la Belgique-Hommage à Paul Fourmarier*, Société Géologique de Belgique, Liège, 1954, 826 p.
- Monjoie A., Rigo J.-M., Polo-Chiapolini C. - *Vade-Mecum pour la réalisation des systèmes d'étanchéité-drainage artificiels pour les sites d'enfouissement technique en Wallonie*, Derouaux, 1992.
- Monjoie A. - Géologie de l'ingénieur et processus géomorphologiques. *Rapport général du thème 1 du Symposium Int. de Géologie de l'Ingénieur*. Athènes, Grèce, 1997, 9 p., 5 fig.
- Monjoie A., Schroeder Ch. - Instabilités de versants de terrils en relation avec l'autocombustion des schistes et charbons résiduels, *Revue française de géotechnique* n° 95-96, 2001, p. 91-102.
- Thorez J. - Practical identification of clay minerals, G. Lelotte ed., Dison, Belgique, 1976.

Cartographie de l'aléa retrait-gonflement et plans de prévention des risques

M. VINCENT,
E. PLAT,
S. LE ROY

BRGM
Service Aménagement et
risques naturels/Risques
mouvement de terrain
117, avenue de Luminy,
BP 167, 13276 Marseille
m.vincent@brgm.fr ;
e.plat@brgm.fr ;
s.leroy@brgm.fr

Résumé

Depuis 1989, les mouvements différentiels de sols liés au phénomène de retrait-gonflement des argiles ont engendré en France de très nombreux sinistres, principalement sur les maisons individuelles. Pourtant, une information préventive adaptée permettrait de limiter considérablement cette sinistralité, qui se manifeste principalement à l'occasion des périodes de sécheresse. C'est pourquoi le ministère en charge de l'environnement a confié au BRGM (service géologique national) la réalisation d'un programme pluriannuel de cartographie de l'aléa retrait-gonflement à l'échelle départementale, destiné à couvrir progressivement l'ensemble du territoire métropolitain d'ici 2010. La réalisation de ces cartes s'appuie sur la connaissance actuelle des formations argileuses superficielles, issue principalement des cartes géologiques éditées par le BRGM à l'échelle 1/50 000, formations qui sont caractérisées par leur susceptibilité au phénomène et par leur densité de sinistres ramenée à la surface d'affleurement urbanisée. Ces cartes, largement diffusées sur internet, constituent des supports utiles pour la sensibilisation des maîtres d'ouvrages, dans le cadre d'une politique de prévention du risque, et servent de base à l'élaboration, par les services de l'État et pour les communes les plus affectées, de plans de prévention des risques (PPR).

Mots-clés : risques naturels, prévention, cartographie, aléa, retrait-gonflement, argile, sécheresse.

Mapping of shrinkage and swelling hazard and elaborating of risk prevention plans

Abstract

Since 1989 differential ground movements due to swelling and shrinkage of clayey soil have damaged a great deal of light buildings. Nevertheless preventive information campaigns could considerably limit the number of disasters which occur during drought period. That is why the environment department have asked the BRGM (French geological survey) to map the swelling and shrinkage hazard at a regional scale (about 5000 km²) in order to cover France entirely from present day until 2010. These maps are based on the knowledge of superficial clayey soil derived from geological maps realised by BRGM at the scale of 1:50,000. These clayey soils are characterized by their swelling and shrinkage potential and the number of disasters per urbanised area which occurs on it. These maps, available on the web, should be used for prevention and to allow local authorities to elaborate land management plans in the most concerned cities.

Key words: Natural risk, prevention, cartography, GIS, swelling and shrinkage, clay, drought.

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 30 avril 2008.

Introduction

Les manifestations du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux, ont été mises en évidence en Angleterre dès les années 1950 (Skempton, 1954) et sont désormais bien connues des géotechniciens. En France, elles ont été observées lors de la sécheresse de 1976 qui est à l'origine de nombreux désordres concernant notamment des pavillons situés en région parisienne (Philipponnat, 1978). Durant l'été 2003, plusieurs dizaines de milliers de maisons individuelles construites sur des sols argileux se sont fissurées par suite de tassements différentiels dus au phénomène de retrait-gonflement de leur sol d'assise, conduisant plus d'une commune française sur cinq à introduire une demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle (Vincent, 2006). Ces sinistres constituent désormais en France le deuxième poste d'indemnisation au titre des catastrophes naturelles alors que de nombreux désordres pourraient être évités moyennant le respect de quelques règles préventives de construction. C'est pourquoi le ministère en charge de l'environnement a confié au BRGM (service géologique national) un programme de cartographie de l'aléa retrait-gonflement pour localiser les zones dans lesquelles la probabilité d'occurrence du phénomène est élevée et élaborer, dans les communes les plus touchées, des plans de prévention des risques (PPR) afin d'y imposer des règles constructives préventives. L'objectif de cette démarche est, d'une part, d'inciter les maîtres d'ouvrages et les constructeurs de maisons individuelles à prendre cet aléa en compte dès la conception des projets et, d'autre part, d'informer un public le plus large possible quant à l'intérêt d'adopter de telles mesures préventives.

La notion d'aléa se définit par la manifestation d'un phénomène naturel (débordements de rivières, glissements de terrains, séismes, avalanches, cyclones, éruptions volcaniques, etc.), caractérisée par sa probabilité d'occurrence et son intensité, en un lieu donné. Une carte d'aléa résulte de la combinaison d'un modèle (déterministe ou issu d'analyses multicritères) et d'un système d'information géographique (SIG) et permet d'intégrer de très nombreux paramètres de nature hétérogène, qu'ils soient ponctuels ou surfaciques (études géotechniques, cartes de sol, modèle numérique de terrain, etc.). Ce type de carte a été établi pour de très nombreux risques naturels (inondation, cavités souterraines, mouvements de terrain, séismes, etc.).

Le présent article a pour but de présenter la méthodologie retenue pour la cartographie de l'aléa retrait-gonflement et les principes de transcription de ces cartes d'aléa en propositions de zonages réglementaires pour l'élaboration de plans de prévention des risques.

Les paramètres de la susceptibilité au retrait-gonflement des argiles

En climat tempéré, où les sols de surface sont souvent proches de leur état de saturation et ont un pouvoir de gonflement limité, ce sont surtout les périodes de sécheresse qui sont à l'origine des mouvements de terrain les plus intenses occasionnés par le phénomène de retrait-gonflement des argiles : la dessicca-

tion des sols argileux se traduit parfois par l'apparition de fissures de retrait en surface mais surtout par des tassements verticaux, peu visibles mais qui sont à l'origine des désordres sur le bâti. En effet, ces mouvements verticaux du sol sont rarement uniformes car leur amplitude est très variable en fonction des hétérogénéités locales concernant tant la nature du sol que son degré de dessiccation. En période de sécheresse, il apparaît ainsi des gradients importants de teneur en eau et de pression interstitielle entre des zones imperméabilisées en surface (du fait notamment de la présence d'un bâtiment) et d'autres directement exposées à l'évaporation ou à une dessiccation encore plus profonde liée à la succion des racines d'arbres ou à un drainage par exemple. Ces gradients se traduisent par des tassements différentiels du sol qui peuvent s'avérer très dommageables pour les constructions lorsque celles-ci sont fondées de manière trop superficielle ou sont insuffisamment rigides pour résister à de telles sollicitations (Mouroux *et al.*, 1988 ; CEBTP, 1991).

La géologie : principal facteur de prédisposition

La nature géologique des terrains affleurant ou sub-affleurant constitue le principal facteur de prédisposition du phénomène. Ceci est clairement illustré par la carte montrant la répartition géographique, à l'échelle nationale, des communes ayant bénéficié d'au moins un arrêté de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle au cours des quinze dernières années (Fig. 1). Cette carte montre que la quasi-totalité du territoire métropolitain est concernée par ce phénomène qui a touché plus d'une commune française sur cinq, mais ses manifestations sont indéniablement concentrées dans certains secteurs géographiques (département du Nord, région Île-de-France, sud du Bassin parisien, Gironde, Dordogne, région toulousaine, plaine de la Limagne, Bouches-du-Rhône, etc.) caractérisés par la présence de quelques formations géologiques argileuses (argile des Flandres, argile verte de Romainville, marnes bleues d'Argenteuil, marnes et sables de l'Orléanais, marnes sableuses du Cénomaniens, molasses du Sud-Ouest, argiles vertes à smectites de Mormoiron, etc.).

Cette corrélation spatiale entre la sinistralité observée et la nature des formations géologiques affleurantes est manifeste lorsqu'on compare la carte des communes concernées avec une carte géologique même très simplifiée (Fig. 1). En particulier, les régions de socle sont très largement épargnées par le phénomène même si localement des sinistres peuvent se produire du fait de la présence d'altérites ou de placages sédimentaires résiduels. A l'échelle locale de la parcelle construite, les études géotechniques réalisées dans le cadre d'expertise post-sinistres confirment largement cette analyse et indiquent la présence de matériaux argileux ou marneux dans le sol d'assise, même si ces matériaux ne sont pas toujours identifiés sur les cartes géologiques disponibles car provenant de formations superficielles souvent remaniées et parfois mal cartographiées.

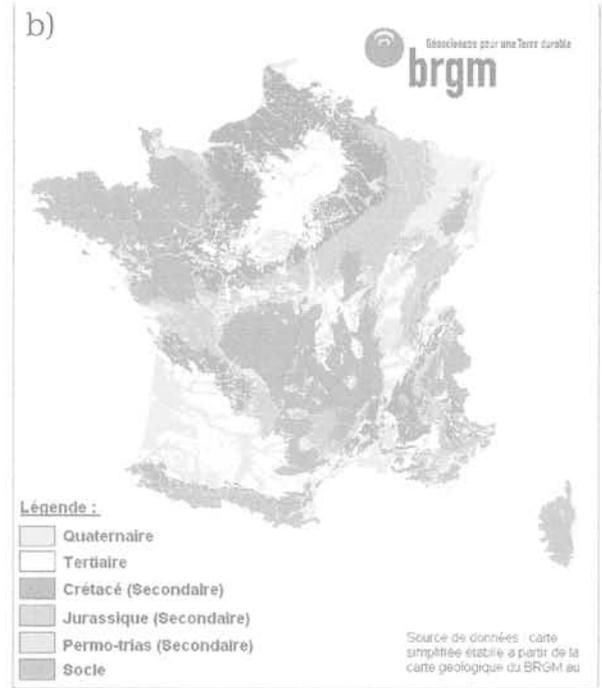
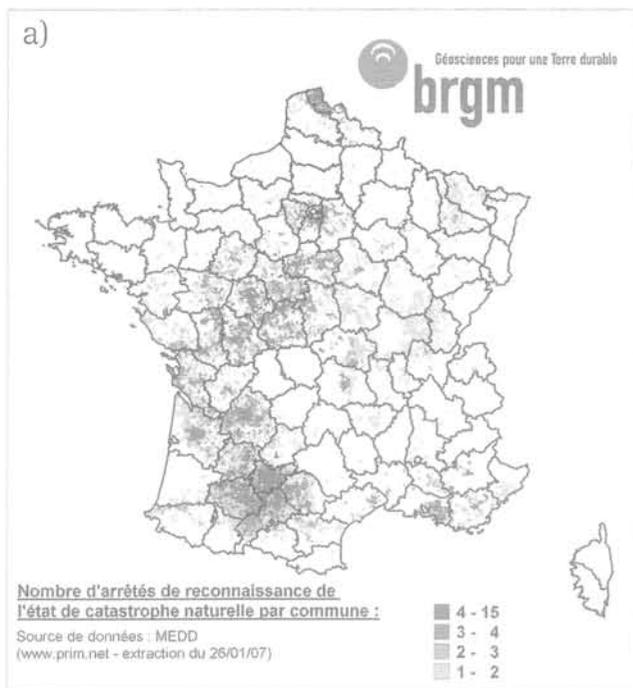


FIG. 1 Répartition des communes françaises reconnues au moins une fois en état de catastrophe naturelle sécheresse (a) et présentation simplifiée de la carte géologique de France éditée à l'échelle 1/1 000 000 par le BRGM (b).
Distribution of cities recognized at least one time in natural disaster state due to drought in France (a) and simplified geological map of France at 1:1,000,000 edited by BRGM (b).

2.2

Les paramètres caractéristiques de la susceptibilité des sols au retrait-gonflement

Si à l'échelle nationale la manifestation du phénomène de retrait-gonflement est clairement reliée à la nature des formations géologiques affleurantes, ce qui a d'ailleurs conduit à l'élaboration de cartes de susceptibilité à l'échelle nationale sur la base de la carte géologique de France éditée par le BRGM à 1/1 000 000 (Toulemont *et al.*, 1994 ; Chassagneux *et al.*, 1998), la réalité est localement plus complexe. Les sols en place, dans les 2 à 5 premiers mètres de profondeur, qui correspondent à la tranche soumise aux tassements différentiels par retrait-gonflement, sont par nature hétérogènes. Il convient donc de déterminer des paramètres physiques permettant de caractériser la susceptibilité de ces sols vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement. La combinaison de ces paramètres, affectée éventuellement de poids variables, permet ensuite de hiérarchiser la susceptibilité globale de chacune des formations géologiques argileuses sur une base statistique qui tienne compte de cette variabilité locale.

2.2.1

Lithologie

La nature lithologique du sol, et notamment la proportion d'éléments fins argileux (de granulométrie inférieure à 2 μm) est classiquement reconnue comme un critère déterminant de l'aptitude d'un sol au retrait-gonflement (Meisina *et al.*, 1998). Il permet de distinguer les terrains essentiellement argileux, de ceux où l'argile est minoritaire. Ce critère intègre donc l'hétérogénéité des formations. En particulier, une formation

de type alluvial, souvent à dominante sablo-graveleuse mais présentant des lentilles argileuses discontinues, peut être localement à l'origine de sinistres et ceci d'autant plus que ces formations alluviales ont souvent été le siège d'une urbanisation récente intensive. Il apparaît en effet que ces configurations de fortes variations lithologiques, tant horizontales que verticales, sont particulièrement dangereuses pour la stabilité des constructions implantées sans reconnaissance géotechnique préalable. La présence de lentilles ou de poches d'argile (en contexte karstique sur plateau calcaire par exemple), même de faible extension géographique, suffit de fait à occasionner des tassements différentiels préjudiciables à l'échelle d'une parcelle construite. Ceci est évidemment accentué lorsque les fondations s'appuient sur des matériaux de nature variable : ainsi une maison fondée d'un côté sur un niveau calcaire et de l'autre sur des matériaux argileux même très peu sensibles au phénomène de retrait-gonflement, subira inmanquablement des tassements différentiels qu'il est indispensable d'identifier dès la conception du projet.

Par ailleurs, il semble que la présence de niveaux perméables intercalés entre des termes argileux favorise les variations hydriques saisonnières au sein de ces derniers, y compris en profondeur, ce qui est de nature à accentuer les mouvements périodiques du sol en surface. En effet, en période sèche, les circulations temporaires d'eau dans les niveaux perméables se tarissent, supprimant toute réhumidification des horizons argileux sus-jacents par remontée capillaire, ce qui accélère la dessiccation de ces derniers. Ceci explique en partie la forte sinistralité de certaines formations hétérogènes telles que les marnes et sables de l'Orléanais en région Centre, ou les argiles vertes à smectites de Mormoiron dans le Vaucluse.

Au-delà de l'hétérogénéité intrinsèque des formations géologiques, la géométrie des termes argileux au sein de la formation entre aussi en ligne de compte, puisque les formations argileuses peu épaisses présentent un potentiel de retrait ou de gonflement moindre que les formations puissantes.

2.2.2

Minéralogie

Les minéraux argileux les plus sujets au retrait-gonflement se caractérisent par de faibles liaisons internes entre feuillets et une grande surface spécifique qui leur permet d'adsorber et de relâcher de grandes quantités d'eau, ce qui se traduit par d'importantes variations de volume en cas de modification de leur teneur en eau. Les sols argileux seront donc d'autant plus affectés que leur fraction fine est riche en certains minéraux argileux, principalement de la famille des smectites (montmorillonite, beidellite, etc.), ainsi que certains interstratifiés de type illite-smectites. La composition minéralogique de la phase argileuse est donc également un critère déterminant de la susceptibilité d'un sol au retrait-gonflement.

Le pourcentage de minéraux gonflants (à savoir smectites et interstratifiés avec présence de smectites) dans la phase argileuse est un paramètre éminemment variable, mais qui dépend néanmoins étroitement des conditions paléogéographiques de dépôt et d'évolution pédogénétique de la formation (Colas *et al.*, 2005). Cette composition pourra donc être approchée par une analyse géologique prenant en compte d'une part les conditions de mise en place et l'environnement de dépôt de la formation géologique, et d'autre part l'histoire (tectonique mais aussi climatique) subie par cette formation. Elle devra cependant être validée par une analyse quantitative fondée sur les résultats d'essais de diffractométrie aux rayons X sur un nombre d'échantillons suffisamment grand pour que les conclusions tirées soient statistiquement représentatives, ce qui n'est pas toujours aisé.

L'exploitation de données spatiales obtenues avec des techniques d'imagerie hyperspectrale a aussi été envisagée pour mettre en évidence la présence de sols gonflants et en cartographier les contours : les images sont d'abord analysées par photo-interprétation ce qui permet des compositions colorées. Cette méthode a permis notamment de distinguer des massifs de smectite pure de zones contenant des mélanges de minéraux argileux dans le Colorado, aux États-Unis (Chabrilat *et al.*, 2002). Toutefois, Launeau *et al.* (2002) insistent sur le fait que les images doivent nécessairement être corrélées à des mesures *in situ* et que la cartographie des zones végétalisées aide largement l'interprétation de ces images. Chabrilat *et al.* (2002) rappellent de surcroît que la réussite d'une telle cartographie est conditionnée par l'exposition du site et sa variabilité minéralogique. Globalement cependant, et dans l'état actuel des connaissances, les conditions d'utilisation d'une telle approche semblent très contraignantes et limitées au seul cas des zones rurales non végétalisées.

2.2.3

Comportement géotechnique

Différents essais de laboratoire classiquement utilisés en géotechnique permettent d'approcher la sus-

ceptibilité d'un matériau vis-à-vis du phénomène de retrait-gonflement mais aucun essai ne permet à lui seul de la caractériser de manière univoque car celle-ci dépend à la fois de la granulométrie du matériau, de la composition de sa phase argileuse, de sa texture, de son état de compacité, de sa teneur en eau, de son comportement mécanique, etc.

De nombreux auteurs ont néanmoins établi des corrélations empiriques entre la susceptibilité d'un sol au retrait-gonflement et certaines de ses caractéristiques physiques, hydriques et mécaniques : teneur en eau initiale, densité des grains solides, limites d'Atterberg, pourcentage des particules argileuses, surface spécifique, etc. (Vincent *et al.*, 2006). En particulier, Meisina *et al.* (1998) ont réalisé une étude comparative de différents essais de laboratoire susceptibles d'être utilisés pour caractériser le potentiel de retrait-gonflement d'un matériau, les critères examinés étant notamment la fraction du sol examiné, la qualité du prélèvement nécessaire (échantillons intacts ou remaniés), le délai d'obtention du résultat, la simplicité de réalisation, le coût et la corrélation entre les résultats de l'essai et le comportement du sol vis-à-vis du retrait-gonflement (nulle, indicative, qualitative, quantitative ou complète). Les essais retenus comme ayant le meilleur rapport efficacité/coût dans le cadre de cette étude sont les suivants : essai au bleu de méthylène, limites d'Atterberg, essai de retrait linéaire, essai de gonflement à l'œdomètre et mesure de succion au papier filtre.

L'essai au bleu de méthylène, méthode relativement globalisante qui intègre à la fois la quantité d'éléments fins et leur capacité d'échange, est souvent jugé comme étant le plus adapté pour une caractérisation des propriétés intrinsèques de retrait-gonflement d'un sol. Les autres essais jugés intéressants dans ce cadre sont notamment les mesures de retrait linéaire ; celles-ci constituent un indicateur de l'importance du retrait volumique possible d'un sol lors de son assèchement, ainsi que l'indice de plasticité, calculé à partir des limites d'Atterberg qui mettent en évidence l'influence de la teneur en eau sur la consistance du matériau fin.

Il importe en effet de préciser que la nature des essais géotechniques exploitables pour évaluer la susceptibilité d'un matériau au retrait-gonflement dépend étroitement du contexte de l'étude. Dans le cadre d'une expertise géotechnique avant construction ou après sinistre, le géotechnicien s'attachera non seulement à caractériser les propriétés du sol en cas de modification de son état hydrique ou du chargement appliqué, mais s'intéressera aussi à son état au moment de l'étude. La détermination de son indice de consistance, de sa pression de gonflement ou de son potentiel de retrait, qui dépendent étroitement de sa teneur en eau naturelle, seront donc des éléments importants pour l'appréciation du comportement du sol. En revanche, dans le cadre de l'établissement d'une carte de susceptibilité au retrait-gonflement, seules les propriétés intrinsèques du sol, indépendamment de son état hydrique au moment de l'étude, peuvent être prises en compte, ce qui explique l'intérêt d'essais tels que la valeur au bleu de méthylène.

2.3

Les autres paramètres de la susceptibilité

Outre les paramètres caractérisant la nature du sol, d'autres éléments influent sur la susceptibilité d'un site

au retrait-gonflement. En particulier, l'occupation du sol et notamment la présence de végétation arborée mais aussi de réseaux enterrés où d'éléments d'imperméabilisation discontinus à la surface du sol sont autant de facteurs de prédisposition à l'apparition de tassements différentiels en présence de sol argileux sujets au phénomène. Ces différents facteurs de prédisposition sont cependant trop ponctuels pour pouvoir être cartographiés à une échelle compatible avec la mise en œuvre d'une politique de prévention nationale.

Le contexte hydrogéologique, du moins pour ce qui concerne les nappes les plus superficielles (alluviales en particulier) et notamment les nappes perchées non pérennes, est également un facteur qui influe de manière directe la prédisposition de certains sites. Néanmoins, les données concernant l'évolution piézométrique de telles nappes, souvent d'extension très localisées et sans véritable enjeu en matière de ressources en eau, est généralement très mal connue et très difficile à prendre en compte dans le cadre de l'établissement d'une carte de susceptibilité.

Enfin, les caractéristiques géomorphologiques d'un site influent également : un terrain en pente, exposé au Sud, sera davantage soumis à dessiccation en période estivale. Il apparaît cependant que ce critère n'est pas totalement pertinent à prendre en compte dans la réalisation d'une carte de susceptibilité (Norie *et al.*, 2001) dans la mesure où les sinistres qui surviennent dans les zones de pente s'expliquent avant tout par la nature lithologique des matériaux mais aussi souvent par des défauts de réalisation et de conception de fondations (avec fréquemment des ancrages de fondation hétérogènes, généralement trop superficiel côté aval).

2.4

Les facteurs de déclenchement

Pour passer d'une carte de susceptibilité à une véritable carte d'aléa affichant la probabilité d'occurrence du phénomène, il est indispensable de prendre en considération les facteurs de déclenchement. Parmi ceux-ci, les éléments climatiques sont manifestement prépondérants comme le montre la répartition temporelle de la sinistralité observée en France depuis 1989 et qui se concentre nettement au cours des périodes de sécheresse : 1989-92 (caractérisée par un déficit de pluies efficaces se prolongeant sur plusieurs années successives), 1997-98 et l'été 2003 (caractérisé surtout par de fortes températures estivales). On constate clairement que la plupart des sinistres se déclenche après des périodes soit de sécheresse intense caractérisée par une forte évapotranspiration, soit de déficit pluviométrique cumulé sur plusieurs années, les deux situations aboutissant à un approfondissement anormal du front de dessiccation dans le sol.

Les mécanismes permettant de relier ces conditions météorologiques exceptionnelles au déclenchement des sinistres dépendent cependant de multiples facteurs locaux tels que l'exposition de la parcelle, la nature du sol (notamment ses propriétés de rétention d'eau) et surtout son état de surface, généralement anthropisé (végétation, terrasses imperméabilisées, drainages, etc.), de telle sorte qu'ils sont très difficiles à quantifier dans le détail et font d'ailleurs l'objet de plusieurs programmes de recherche. Il est donc encore prématuré, dans l'état actuel des connaissances, de prévoir la

probabilité d'occurrence de futurs sinistres en tenant compte à la fois de l'évolution climatique temporelle et de la répartition spatiale des sols et du bâti.

L'analyse d'un grand nombre de sinistres survenus depuis 1989 (CEBTP, 1991 ; Vincent *et al.*, 2006) confirme de toute façon clairement que les facteurs d'origine climatique ne sont pas seuls en cause dans le déclenchement du phénomène mais que des éléments, de nature très localisée, liés d'une part à la croissance des arbres et d'autre part à des facteurs anthropiques (terrassements, pompes, drainage, zones de chauffage, fuites de canalisations enterrées, etc.) prennent souvent une part prépondérante pour expliquer le déclenchement de nombreux sinistres, tout en étant trop ponctuels pour être pris en compte dans l'établissement d'une carte d'aléa.

A défaut de pouvoir établir la probabilité d'occurrence du phénomène sur une base déterministe s'appuyant sur l'influence respective et quantifiée des facteurs de prédisposition et de déclenchement, une alternative possible consiste à évaluer cette occurrence en se basant sur l'observation statistique des phénomènes observés dans le passé. Une des voies explorées dans ce sens repose sur l'analyse des déformations du sol évaluées par imagerie spatiale selon la technique de l'interférométrie radar (par comparaison entre deux vues prises au même endroit à des dates différentes). Cette méthode a notamment été mise en œuvre pour étudier les déformations verticales du sol dans l'Est parisien (Ben Hassen, 2005) au cours des récentes périodes de sécheresse, mais n'a jusqu'à présent pas permis de mettre en évidence de corrélation nette entre les anomalies constatées et la sinistralité observée, pourtant forte dans les zones très urbanisées bâties sur les argiles vertes de Romainville. Cette méthode a aussi été testée par plusieurs opérateurs dans la région de Gardanne (Bouches-du-Rhône), faisant apparaître de multiples divergences d'interprétation et ne permettant pas de mettre en évidence les mouvements saisonniers du sol qui étaient attendus. De même, en Lombardie (Italie), Meisina *et al.* (2006) mettent en évidence l'existence de mouvements de subsidence sans pouvoir établir s'il convient de les attribuer aux effets saisonniers du phénomène de retrait-gonflement ou à la présence d'un puits de pompage au droit du site.

Des développements en cours avec l'utilisation de la technique des réflecteurs permanents permettront peut-être d'aller plus loin dans cette voie. A défaut, un moyen simple d'évaluer l'occurrence du phénomène consiste à prendre en compte la sinistralité passée en la rapportant aux zones urbanisées, ce qui permet de moins de mettre en évidence les zones les plus touchées en l'absence de mesures de prévention. Si l'on suppose que la qualité de la construction en France n'est pas déterminée par des paramètres géographiques, cette approche donne un premier aperçu de l'occurrence spatiale du phénomène à partir d'une quinzaine d'années d'observation et plusieurs centaines de milliers de maisons touchées.

3

Programme de cartographie de l'aléa à l'échelle départementale

La corrélation étroite mise en évidence entre la répartition des sinistres et la nature géologique des

Méthodologie mise en œuvre

3.2.1

Carte synthétique des formations argileuses

A partir des cartes géologiques éditées par le BRGM à l'échelle 1/50 000 et couvrant la totalité du département est établie une carte synthétique des formations affleurantes à sub-affleurantes susceptibles de présenter localement des matériaux argileux. Ceci exige un important travail de numérisation puis d'harmonisation des cartes géologiques. En effet, un département moyen est généralement concerné par une quinzaine voire une vingtaine de feuilles, souvent levées par des auteurs différents et à des dates variables, de telle sorte que les interprétations peuvent diverger fortement entre feuilles adjacentes, particulièrement pour ce qui concerne les formations superficielles, souvent mal représentées sur les versions anciennes des cartes géologiques.

Une fois la carte géologique harmonisée à l'échelle départementale, il convient ensuite d'identifier toutes les formations à dominante argileuse ou présentant localement des termes argileux susceptibles d'occasionner des sinistres par retrait-gonflement. Ceci suppose de procéder à certaines réinterprétations et au regroupement de formations stratigraphiquement proches et dont la lithologie est jugée suffisamment homogène pour que leur susceptibilité au retrait-gonflement puisse être considérée comme identique. Selon les départements traités, la carte départementale des formations argileuses ainsi obtenue affiche entre une quinzaine et une quarantaine de formations retenues comme potentiellement argileuses.

3.2.2

Élaboration de la carte de susceptibilité

Pour chacune des formations argileuses ainsi identifiées, la susceptibilité au retrait-gonflement est alors caractérisée sur la base de trois critères qui se recoupent plus ou moins et se complètent mutuellement. Pour chacun de ces critères est attribuée à la formation une note comprise entre 1 et 4, selon l'aptitude supposée au retrait-gonflement, ceci sur la base d'une grille unique appliquée au niveau national.

Le premier critère appliqué caractérise la lithologie de la formation, à savoir la proportion et la continuité des termes argileux qu'elle renferme. Par convention, la note maximale est attribuée à une argile ou une marne épaisse et continue et la note minimale à une formation hétérogène, présentant des termes argileux non prédominants et discontinus, par exemple sous forme de poches ou de lentilles. Il faut noter que cette caractérisation lithologique des formations est établie sur la base de l'expertise du géologue régional et qu'elle ne peut être totalement dépourvue d'une certaine subjectivité dans son appréciation. Sa valeur relative en vue d'une hiérarchisation des formations argileuses est cependant difficilement contestable. Le barème utilisé pour distinguer les différentes classes lithologiques est présenté dans le tableau I.

formations sub-affleurantes a amené le BRGM (Service géologique national), dès le milieu des années 1990 (Chassagneux *et al.*, 1995), à élaborer des développements méthodologiques en vue de cartographier l'aléa retrait-gonflement des argiles, d'abord à l'échelle communale (Manosque), puis à l'échelle départementale (Alpes-de-Haute-Provence). Cette méthode, appliquée d'abord dans le département des Deux-Sèvres (Vincent *et al.*, 1998), puis dans celui de l'Essonne (Prian *et al.*, 2000) est désormais formalisée (Vincent, 2003) et validée par le ministère en charge de l'environnement qui a confié au BRGM sa mise en œuvre sur l'ensemble du territoire métropolitain, dans le cadre d'un programme pluriannuel qui devrait s'achever en 2010.

3.1

Choix d'une échelle d'étude

L'échelle de travail pour l'établissement des cartes d'aléas est naturellement fonction de la précision souhaitée, des données disponibles et des financements attendus. Les premières approches mises œuvre en France l'ont été à une échelle nationale (Toulemont *et al.*, 1994 ; Chassagneux *et al.*, 1998), sur la base de la carte géologique de la France au 1/1 000 000, éditée par le BRGM. Cette approche est utile pour identifier les secteurs géographiques les plus touchés à l'échelle nationale mais s'avère bien sûr très insuffisante pour développer la prévention du phénomène en matière d'aménagement. Pour cela, il est en effet nécessaire de disposer de documents cartographiques suffisamment précis pour pouvoir déterminer avec un maximum de fiabilité le niveau d'aléa d'une parcelle donnée.

Les premières approches menées par le BRGM à l'échelle communale, sur la ville de Manosque et en collaboration avec le bureau d'étude Sol-Concept (Chassagneux *et al.*, 1995), sont plus satisfaisantes pour un tel usage. De telles démarches ont été menées par d'autres organismes notamment sur une partie de l'agglomération montpelliéraine (Combes, 1993) et plus récemment sur la commune de Toulouse (GIPEA, 2006). A cette échelle cependant, il est totalement exclu de se limiter aux seules données géologiques et géotechniques publiées, à moins de disposer de bases de données géoréférencées particulièrement détaillées, voire de modèles géotechniques en trois dimensions. Une telle approche est en tout état de cause coûteuse et peut difficilement être mise en œuvre en dehors de quelques agglomérations urbaines où l'on dispose d'un grand nombre d'investigations géologiques.

Afin de répondre aux attentes des pouvoirs publics qui souhaitent développer, dans des délais raisonnables et à moindre coût, sur l'ensemble du territoire national, une politique d'affichage et de prévention du risque de retrait-gonflement, il a donc été nécessaire de mettre en œuvre une méthodologie adaptée permettant de réaliser de manière relativement rapide et homogène des cartes d'aléa à partir des seules données existantes. Pour cela, l'échelle départementale s'est révélée la plus adaptée et la donnée de base principalement utilisée est celle issue des cartes géologiques éditées par le BRGM à l'échelle 1/50 000.

TABEAU I Principe d'attribution des notes de susceptibilité des formations argileuses en fonction du critère lithologique.
Method to allot sensitivity value from soil lithology.

Type de formation	Susceptibilité	Note lithologique
Formation non argileuse mais contenant localement des passées ou des poches argileuses (ex : alluvions avec lentilles argileuses, calcaire avec poches karstiques...)	faible	1
Formation présentant un terme argileux non prédominant de type calcaire argileux ou sable argileux	moyenne	2
Formation à dominante argileuse, présentant un terme ou une passée non argileuse (ex : alternance marno-calcaire ou sablo-argileuse) ou très mince (moins de 3 m)	forte	3
Formation essentiellement argileuse ou marneuse, d'épaisseur supérieure à 3 m et continue	très forte	4

Le second critère retenu concerne la composition minéralogique de la phase argileuse, et plus précisément le pourcentage moyen de minéraux gonflants (smectites et interstratifiés avec présence de smectites) dans la phase argileuse. Cet élément est déterminé à partir des données bibliographiques publiées (complétées par quelques analyses ponctuelles spécifiques) en combinant une approche qualitative, basée sur l'étude des conditions paléogéographiques de dépôt et d'évolution pédogénétique, et une analyse quantitative fondée sur les résultats d'essais de diffractométrie aux rayons X. Les bornes retenues pour cette classification minéralogique correspondent respectivement à 25 %, 50 % et 80 % de minéraux gonflants (smectites et interstratifiés) dans la phase argileuse du matériau (tableau II).

TABEAU II Principe d'attribution des notes de susceptibilité des formations argileuses en fonction du critère minéralogique.
Method to allot sensitivity value from soil mineralogy.

% moyen de minéraux gonflants	Susceptibilité	Note minéralogique
< 25 %	faible	1
25 à 50 %	moyenne	2
50 à 80 %	forte	3
> 80 %	très forte	4

Le troisième critère utilisé est basé sur une interprétation statistique de résultats d'essais de laboratoire recueillis pour chacune des formations argileu-

TABEAU III Principe d'attribution des notes de susceptibilité des formations argileuses en fonction du critère géotechnique.
Method to allot sensitivity value from soil geotechnical characterization..

Valeur de bleu (cm ³ /g) (paramètre déterminant)	Retrait linéaire	Coefficient de gonflement	Indice de plasticité (%)	Susceptibilité	Note géotechnique
< 2,5	< 0,4	< 0,025	< 12	Faible	1
2,5 à 6	0,4 à 0,65	0,025 à 0,05	12 à 25	Moyenne	2
6 à 8	0,65 à 0,75	0,05 à 0,09	25 à 40	Forte	3
> 8	≥ 0,75	≥ 0,09	≥ 40	Très forte	4

ses identifiées (non seulement dans le cadre d'études post-sinistre, mais également au travers d'investigations menées pour des travaux d'aménagement). Cette approche suppose une collaboration active tant des bureaux d'études géotechniques sollicités que des maîtres d'ouvrages publics ou privés. Pour cette interprétation, on privilégie les essais jugés les plus représentatifs du comportement vis-à-vis du retrait-gonflement, à savoir les valeurs de bleu (essais Vb, indiquant la capacité d'adsorption d'eau) et le retrait linéaire sur échantillons intacts (RI). A défaut, on tient aussi compte des indices de plasticité (Ip, calculé à partir des limites d'Atterberg et indiquant l'étendue du domaine plastique) et du coefficient de gonflement (Cg, établi à partir d'essais œdométriques). Les seuils retenus pour caractériser la potentiel de retrait-gonflement à partir de ces essais (Chassagneux *et al.*, 1995 ; Mastchenko, 2001) sont présentés dans le tableau III.

La moyenne des trois notes attribuées à chaque formation pour ces trois critères fournit la classe de susceptibilité de la formation : si cette moyenne est inférieure à 2, la susceptibilité est considérée comme faible (note égale à 1) ; si elle est comprise entre 2 et 3, la susceptibilité est moyenne (note égale à 2) et elle est considérée comme forte pour une moyenne supérieure à 3 (note égale à 3).

3.2.3

Prise en compte de la sinistralité

Afin d'approcher, au moins de manière qualitative, la probabilité d'occurrence du phénomène, la susceptibilité au retrait-gonflement est corrigée en intégrant également la sinistralité observée depuis 1989. Ceci nécessite de recenser le plus grand nombre possible de sinistres survenus dans le département et de les localiser avec précision, afin d'obtenir une représentation statistique réaliste des probabilités d'occurrence du phénomène. Le nombre de sinistres ainsi pris en compte atteint généralement plusieurs milliers par département (jusqu'à 5 250 en Haute-Garonne). Le croisement avec la carte géologique permet de calculer, pour chacune des formations argileuses identifiées, une densité de sinistres qui est ramenée, pour faciliter les comparaisons, à 100 km² de surface d'affleurement réellement urbanisée. Il est en effet nécessaire de tenir compte du taux d'urbanisation qui peut présenter des disparités importantes d'un point à l'autre du département et fausser ainsi l'analyse.

La densité de sinistres rapportée à 100 km² de zone argileuse urbanisée varie très fortement, entre 205 (Eure-et-Loir) et 3 354 (Tarn), avec une valeur moyenne de 1 143. Ce critère met en évidence la sinistralité particulièrement élevée de certains départements qui n'apparaissent pourtant pas comme tels lorsque d'autres critères plus globalisants sont pris en compte. Ainsi, le

département des Alpes-de-Haute-Provence, faiblement urbanisé, dans lequel ont été recensés 1 279 maisons sinistrées, présente une densité de 2 926 sinistres pour 100 km² de zone argileuse urbanisée, alors qu'il n'apparaît qu'à la vingtième position en terme de coût cumulé d'indemnisation, loin derrière les Yvelines ou la Haute-Garonne dont les densités de sinistres sont pourtant moindres (respectivement 2 542 et 1 586).

3.2.4

Élaboration de la carte départementale d'aléa

La carte départementale d'aléa dérive *in fine* de la carte des formations argileuses, après hiérarchisation de ces dernières en fonction de leur niveau de susceptibilité et de la sinistralité qui y a été constatée. Cette combinaison de la note de susceptibilité et de la densité de sinistre par formation se fait cependant en attribuant un poids deux fois plus faible à cette dernière car celle-ci est entachée d'un certain nombre d'incertitudes quant aux causes exactes de certains des sinistres pris en considération (Fig. 2). L'échelle de validité de la carte ainsi obtenue est celle de la donnée de base utilisée, sachant que les cartes géologiques sont levées à l'échelle du 1/25 000 puis restituées au 1/50 000.

3.3

État d'avancement du programme

Après les développements méthodologiques initiaux et les premières applications réalisées à la demande des assurances (Centre européen de prévention des risques pour le département des Deux-Sèvres, Caisse centrale de réassurance pour celui de l'Essonne), ces cartes d'aléa sont désormais produites dans le cadre d'un co-financement entre le Fonds national de prévention des risques naturels mobilisé par le MEDD et la dotation de service public du BRGM. A fin novembre 2007, ces cartes d'aléa sont d'ores et déjà réalisées pour 42 départements et accessibles au public sur internet pour 35 d'entre eux (Fig. 3), après validation par la préfecture et la direction départementale de l'Équipement. Une quarantaine d'autres cartes départementales d'aléa, actuellement en cours, devraient être publiées d'ici fin 2007.

4

Exploitation des cartes d'aléa

Les cartes d'aléa réalisées peuvent servir à la fois comme support d'information préventive et pour l'élaboration de documents à valeur réglementaire que sont les plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR).

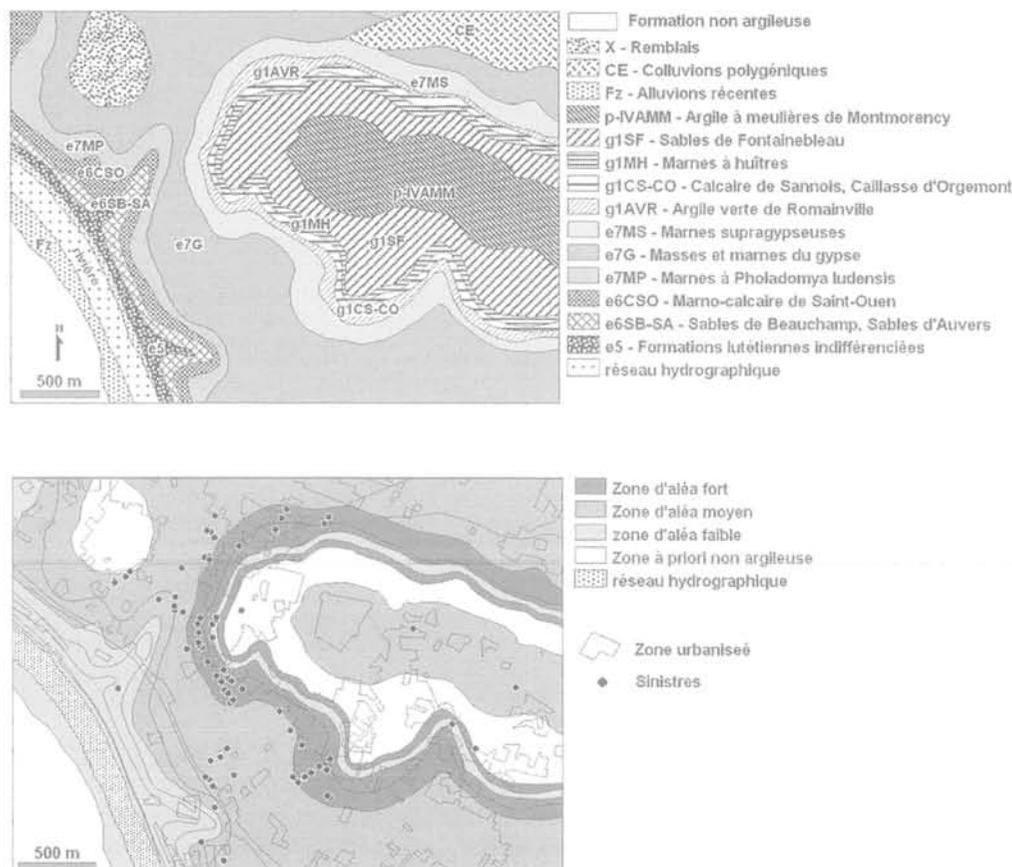


FIG. 2

Extrait de la carte synthétique des formations argileuses et de la carte d'aléa retrait-gonflement du Val d'Oise (Donsimoni *et al.*, 2004).
Extract from maps of superficial clayey soil (a) and of soil swelling and shrinkage hazard (b) (Donsimoni *et al.*, 2004).

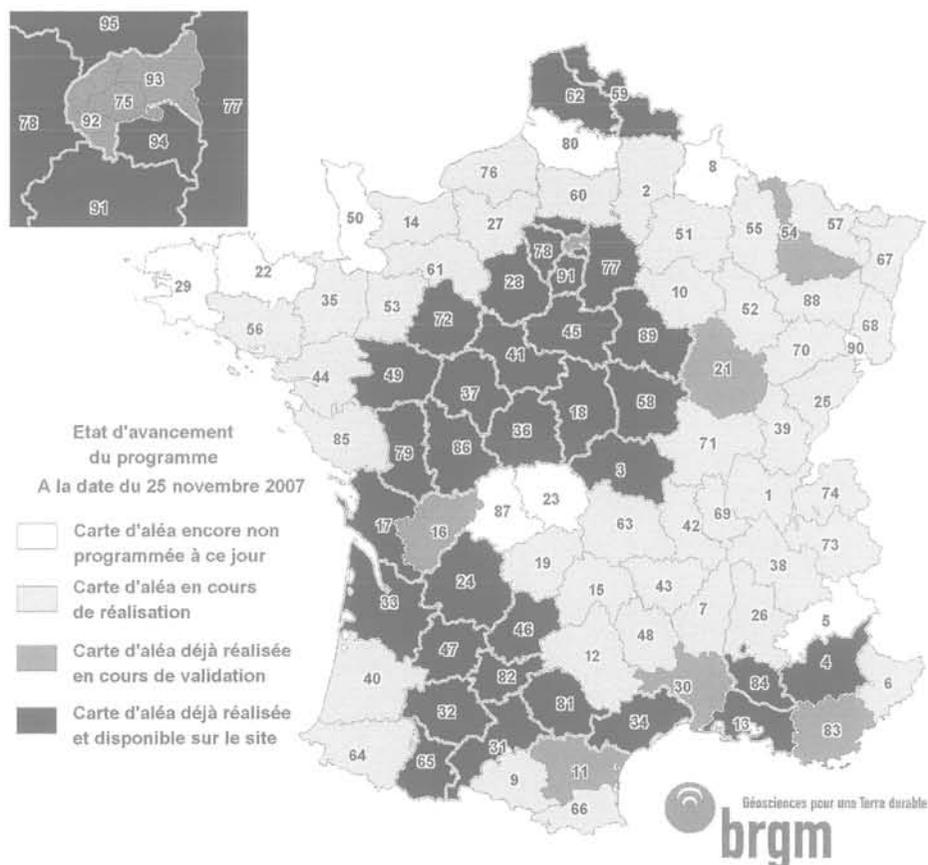


FIG. 3 État d'avancement à fin novembre 2007 du programme de cartographie départementale de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux. Progress report of shrinkage and swelling hazard mapping in France in November 2007.

4.1

Les cartes d'aléas comme support d'information préventive

La diminution future de la sinistralité des maisons individuelles causée par le phénomène de retrait-gonflement des sols argileux passe par une diffusion la plus large possible des mesures de prévention. C'est justement l'objectif principal de ces cartes d'aléa que d'attirer l'attention des maîtres d'ouvrages (y compris des particuliers) et des professionnels de la construction sur la nécessité de prendre des précautions particulières lors de la construction d'une maison individuelle dans un secteur susceptible de contenir des argiles sujettes au retrait-gonflement. Dans ce domaine, de nombreuses actions d'information ont été entreprises récemment, tant par les pouvoirs publics que par certains assureurs et des professionnels de la construction. C'est ainsi qu'à la demande du MEDD, le BRGM a élaboré un site internet spécifique, librement accessible à l'adresse suivante : <http://www.argiles.fr>, et destiné à l'affichage des cartes d'aléa au fur et à mesure de leur publication. Ouvert au public depuis novembre 2004, ce site permet de consulter les cartes d'aléa par département ou par commune, de s'informer sur les manifestations du phénomène et la manière de les prévenir, et de télécharger les rapports et les cartes d'aléa déjà parus. Depuis fin février 2006, les cartes d'aléa sont disponibles sur ce site pour 35 départements, les plus concernés par le phénomène. La consultation importante de ce site (environ 50 000 visiteurs par mois

depuis début 2006 et 350 000 durant les deux premières années de mise en service) confirme la forte attente du public vis-à-vis de ce type d'information préventive. Il est notamment très utilisé par les constructeurs de maisons individuelles et lors des transactions immobilières.

4.2

Transposition des cartes d'aléas en zonage réglementaire

Parallèlement, dans les secteurs les plus touchés par le phénomène, les cartes d'aléa peuvent aussi servir à l'élaboration de plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR). L'échelle de validité des cartes départementales d'aléa retrait-gonflement est *in fine* celle de la donnée de base utilisée, à savoir le 1/50 000. Elles ne permettent donc pas de déterminer avec certitude la présence d'argile gonflante à l'échelle d'une parcelle, surtout si celle-ci est peu étendue. Elles suffisent néanmoins à circonscrire les zones potentiellement sujettes au phénomène de retrait-gonflement et où il convient de prendre des précautions particulières avant de construire. Établir des cartes d'aléa à une échelle plus précise exigerait nécessairement de réaliser des investigations complémentaires coûteuses (avec sondages et essais en laboratoire) ; c'est pourquoi, le MEDD a décidé, pour ce phénomène très particulier qu'est le retrait-gonflement qui n'entraîne pas de risque pour les vies humaines et pour lequel les

mesures de prévention sont relativement simples et peu coûteuses, de limiter la connaissance des zones à risque à cette échelle du 1/50 000.

4.2.1

Méthode de transcription

Les cartes départementales d'aléa, servent donc directement de support à l'élaboration de plans de zonage réglementaires pour la réalisation des PPR, élaborés par commune et présentés sur fond topographique extrait des cartes IGN à 1/25 000 agrandis à 1/10 000 ou sur fond cadastral (Fig. 4). Afin de tenir compte de l'imprécision du tracé des contours dessinés à partir de documents publiés à l'échelle 1/50 000, une bande de sécurité d'une largeur de 50 m est intégrée pour élargir les zones d'aléa. Deux zones réglementées sont distinguées : une zone fortement exposée qui coïncide avec les zones classées en aléa fort et une zone faiblement à moyennement exposée, qui regroupe les secteurs classés en aléa faible à moyen (Norie *et al.*, 2000).

4.2.2

Prescriptions réglementaires

Contrairement à d'autres risques naturels tels que les inondations, les PPR proposés ne prévoient aucune mesure d'interdiction de construire, même dans les zones considérées en aléa élevé. Les mesures préventives préconisées n'entraînent pas de surcoût important et restent donc compatibles avec la construction de maisons individuelles économiques (Exbrayat, 2001). La reconnaissance géotechnique préalable n'est pas rendue obligatoire pour les maisons individuelles (hors permis groupé). Elle est cependant vivement conseillée car elle peut permettre, moyennant un investissement relativement faible, de vérifier le contexte géologique local et de déterminer les mesures constructives les plus adaptées (voire de s'affranchir de toute contrainte particulière si elle met en évidence l'absence d'argile gonflante au droit du projet). A défaut d'une telle étude de sol, le règlement du PPR définit pour l'essentiel des mesures concernant la construction (avec notamment une profondeur minimale d'ancrage des fondations fixée à 0,80 m en zone faiblement à moyennement

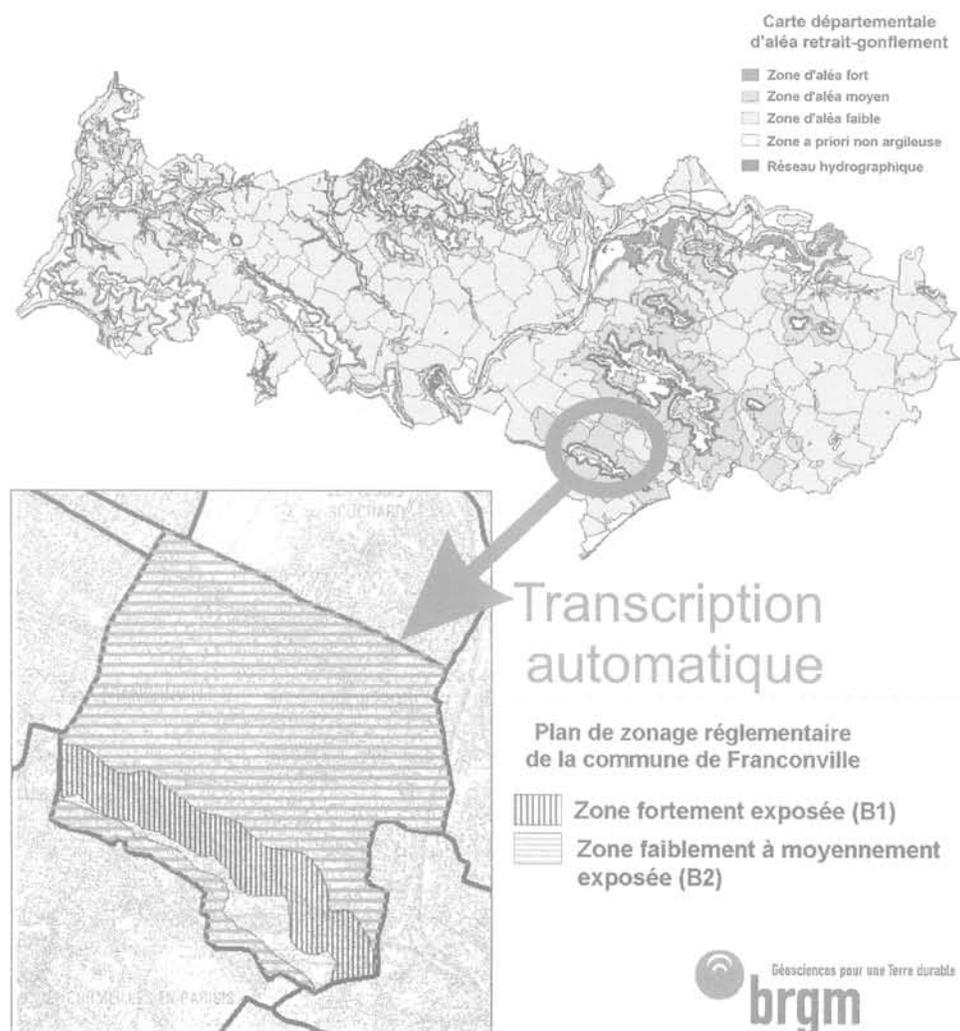


FIG. 4 Principe de transcription de la carte départementale d'aléa en propositions de zonages réglementaires pour la réalisation de PPR (Vincent *et al.*, 2003).

Transcription method of shrinkage and swelling hazard map in risk prevention plans (Vincent *et al.*, 2003).

exposée et à 1,20 m en zone fortement exposée) et l'environnement immédiat du projet (distance minimale à respecter pour les plantations d'arbres, dispositif périmétrique anti-évaporation, maîtrise des eaux de ruissellement, étanchéité des réseaux enterrés, etc.).

Les premiers PPR établis sur cette base ont été mis à l'enquête publique dans les quarante communes de Seine-Saint-Denis en novembre 2002. Plus de 1 600 PPR concernant spécifiquement l'aléa retrait-gonflement des argiles ont d'ores et déjà été prescrits (Fig. 5), dont plus de 550 adoptés à fin 2007, et d'autres pourraient l'être très prochainement, moyennant un travail

d'adaptation du règlement afin d'ajuster certaines prescriptions concernant notamment l'impact des arbres et les rejets dans les réseaux. La mise en œuvre de ces PPR dans les communes les plus touchées devrait permettre à l'avenir d'éviter de nombreux sinistres, traumatisants pour les propriétaires et coûteux pour la collectivité.

5

CONCLUSION

Si le phénomène de retrait-gonflement des sols argileux et les mesures constructives adaptées à ce type de terrain sont bien connus des géotechniciens, encore convient-il d'afficher largement le risque à l'usage des maîtres d'ouvrages et de diffuser les mesures préventives nécessaires. C'est tout l'enjeu de ce programme de cartographie départementale de l'aléa retrait-gonflement, initié par le ministère en charge de l'environnement et dont la réalisation a été confiée au BRGM afin de traiter progressivement l'ensemble du territoire métropolitain selon une méthodologie unique et à moindre coût pour la collectivité. Cette approche s'appuie sur les données géologiques disponibles afin de cartographier les contours des formations argileuses affleurantes puis évalue le niveau d'aléa de ces dernières par combinaison d'une note de susceptibilité et d'une note de sinistralité en affectant un poids moindre à cette dernière. La carte ainsi obtenue, bien qu'imprécise à l'échelle de la parcelle, constitue une première étape indispensable pour la prise en compte du phénomène et la mise en œuvre d'une véritable politique d'information préventive à destination des différents acteurs de la construction. Elle permet aussi, moyennant l'intégration d'une bande de sécurité, d'établir des plans de prévention des risques qui visent à circonscrire les zones potentiellement sujettes au phénomène de retrait-gonflement et où il convient de prendre des précautions particulières avant de construire. A fin novembre 2007, les 35 départements les plus touchés par le phénomène sont couverts par une carte d'aléa, mise à disposition d'un large public sur le site internet <http://www.argiles.fr>, et plus de 550 PPR ont d'ores et déjà été adoptés.

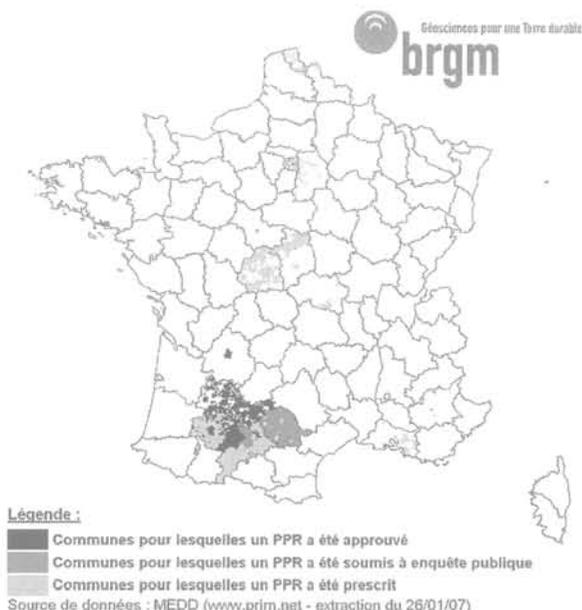


FIG. 5 État d'avancement à fin novembre 2007 des procédures relatives aux plans de prévention des risques mouvements de terrain différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols.

Progress report of risk prevention plans procedure relative to swelling and shrinkage behaviour of clayey soil actualized in November 2007.

BIBLIOGRAPHIE

- Ben Hassen M. - Apport de l'interférométrie radar pour l'étude des faibles déformations engendrées par le comportement des matériaux argileux sous climat extrême : application à la région de Lagny (l'Est parisien). Rapport de DEA présenté à l'université de Marne-la-Vallée, 2005, 75 p.
- CEBTP - Détermination des solutions adaptées à la réparation des désordres des bâtiments provoqués par la sécheresse, sous l'égide de l'AQC, l'APSAD, l'AFAC, la CCR et la FNB. Guide pratique CEBTP, 1991, 3 fascicules.
- Chabrilat S., Goetz A.F.H., Olsen H.W., Krosley L. - Use of hyperspectral images in the identification and mapping of expansive clay soils and the role of spatial resolution, *Remote Sensing of Environment*, 82 (2-3), 2002, p. 431-445.
- Chassagneux D., Stieltjes L., Mouroux P. avec la coll. de Ducreux G.H. - Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols (sécheresse/pluie) dans la région de Manosque (Alpes-de-Haute-Provence). Échelle communale et départementale. Approche méthodologique. Rapport BRGM R 38695, 1995.
- Chassagneux D., Meisina C., Vincent M., Ménillet F., Baudu R. - Guide synthétique pour la prise en compte de l'aléa retrait - gonflement à l'échelle. Rapport BRGM n° R40355, 1998, 33 p., 6 fig., 1 tabl., 1 ann., 1 pl. h.-t.
- Colas B. avec la collaboration de Le Strat P., Vincent M., Dugast D. et Lenfant S. - Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département de l'Hérault. Rapport BRGM/RP-54236-FR, 2005, 123 p., 54 ill., 6 ann., 3 cartes h.-t.
- Combes P. - Cartographie des zones géologiques exposées à des risques naturels dans le département de l'Hérault, le cas des argiles. Rapport GEOTER GTR/CGE/0893-14, 1993.
- Donsimoni M., Hattou C., Giraud F. avec la collaboration de Vincent M. - Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département du Val-d'Oise. Rapport BRGM/RP-52598-FR, 2004, 163 p., 8 fig., 22 tabl., 4 ann., 4 pl. h.-t.
- Exbrayat L. - Dispositions constructives de nature à prévenir et/ou supprimer les effets de la dessiccation/réhydratation des sols : évaluation des coûts. SOLEN Géotechnique n°G01339GT, 2001.
- GIPEA avec la collaboration de 2GH Entreprise, ADRET - Risque naturel retrait-gonflement des argiles. Étude spécifique pour le plan de prévention des risques naturels sécheresse applicable à Toulouse. Rapport final R73.06, 2006, 102 p., 5 ann.
- Launeau P., Sotin C., Girardeau J. - Cartographie de la péridotite de Ronda (Espagne) par télédétection hyperspectrale : données AVIRIS. *Bulletin de la Société géologique de France*, 2002, vol. 173; n° 6 ; p. 491-508.
- Mastchenko A. - Sécheresse et sols argileux. Projet industriel Alpha Sol. École des Mines d'Alès, 2001, 74 p., 9 ann.
- Meisina C., Chassagneux D., Leroi E., Mouroux P. - Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux. Proposition de méthodologie. Article et présentation au 8^e Congrès de l'Association internationale de géologie de l'ingénieur et de l'environnement, 1998.
- Meisina C., Zucca F., Fossati D., Ceriani M., Allievi J. - Ground deformation monitoring by using the armanent Scatterers Technique : The example of the Oltrepo Pavese (Lombardia, Italy). *Engineering Geology*, 2006, vol. 88, p. 240-259.
- Mouroux P., Margron P., Pinte J.-C. (1988) - *La construction économique sur sols gonflants*. Edit. du BRGM, Manuels et Méthodes n° 14, 1988.
- Norie A., Vincent M. - Établissement de plan de prévention des risques naturels prévisibles : mouvements différentiels de terrain liés au phénomène de retrait gonflement des sols argileux. Approche méthodologique dans le département des Deux-Sèvres. Rapport BRGM/RP-50591-FR, 2000, 14 p., 4 fig., 4 ann.
- Norie A., Capdeville J.-P., Vincent M., en collaboration avec Delpont G., Schoen R., Krieg N. - Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département du Gers. Rapport BRGM/RP-51251-FR, 2001, 68 p., 23 fig., 2 pl., 8 tabl., 2 cartes h.-t., 6 ann.
- Philipponnat G. - Désordres dus à la présence de sols gonflants dans la région parisienne. *Annales de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics*, 1978, n° 364, p. 1-15.
- Prian J.-P., Donsimoni M., Vincent M. avec la collaboration de Denis L., Gallas J.-C., Marty F., Motteu M. - Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département de l'Essonne. Rapport BRGM n° RP-50376-FR, 2000, 269 p., 32 fig., 11 tabl., 6 ann., 3 cartes h.-t.
- Skempton A.W. - A foundation failure due to clay shrinkage caused by poplar trees. *Proc. Instn. Civ. Engrs.* Part I, 3, Jan. 1954, p. 66-83.
- Toulemont M., Cojean R., Faccendini J.P. - Cartographie prévisionnelle des sols sensibles à la sécheresse : un outil d'information préventive. *Mappemonde*, 4, 1994, p. 2-4.
- Vincent M., Le Nindre Y.M., Meisina C., Chassignol A.L. - Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département des Deux-Sèvres. Rapport BRGM n° R 39967, 1998, 89 p., 14 fig., 13 tabl., 6 ann., 2 cartes hors-texte.
- Vincent M. (2003) - Retrait-gonflement des sols argileux : méthode cartographique d'évaluation de l'aléa en vue de l'établissement de PPR. 3^e Conférence SIRNAT, Forum des journées pour la prévention des risques naturels, Orléans, janv. 2003, 7 p., 5 fig.
- Vincent M. avec la collaboration de Imbault M. et Donsimoni M. - Établissement de plans de prévention des risques naturels concernant les mouvements différentiels de terrain liés au phénomène de retrait-gonflement des argiles dans le département du Val-de-Marne. Rapport BRGM/RP-52494-FR, 2003, 14 p., 2 fig., 1 ann., 1 CD-Rom.
- Vincent M. (2006) - Retrait-gonflement des sols argileux : un aléa géologique lié aux conditions climatiques - *Géosciences* (la revue du BRGM pour une Terre durable), n° 3, mars 2006, p. 50 à 55.
- Vincent M., Bouchut J., Fleureau J.-M. (LMSSMat), Masroufi F. (LAEGO), Oppenheim E. (CEBTP-Solen), Heck J.-V. (CSTB), Ruaux N. (CSTB), Le Roy S., Dubus I., Surdyk N. - Étude des mécanismes de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux et de ses interactions avec le bâti. Rapport final. BRGM/RP-54862-FR, 2006, 378 p., 308 ill.

Apports d'un Système d'Information Géographique et de la télédétection pour l'étude des mouvements de terrain induits par l'aléa sécheresse : applications à l'Est de l'Île-de-France

H.F. KAVEH,
B. DEFFONTAINES,
B. FRUANEAU

Université Paris-Est
Laboratoire Géomatériaux et
Géologie de l'ingénieur (G2i)
5, bd Descartes
Champs-sur-Marne
77454 Marne-la-Vallée Cedex 2
frederic.kaveh@univ-mlv.fr
benoit.deffontaines@univ-mlv.fr
benedicte.fruneau@univ-mlv.fr

Résumé

Quels sont les apports de la télédétection (optique et radar) pour détecter et mesurer les déformations induites par l'aléa sécheresse et plus particulièrement le retrait/gonflement des sols argileux dans l'Est de l'Île-de-France? L'intégration des données dans un Système d'Information Géographique devrait favoriser l'analyse des principaux facteurs à l'origine de ces déformations. Ainsi un modèle numérique de terrain (BdAlti® de l'IGN) permet d'extraire les pentes topographiques, l'imagerie aérienne (photographie ortho rectifiée de l'IGN) révèle l'occupation du sol, et l'application de la méthode d'interférométrie radar DInSAR favorise la localisation, la caractérisation et la quantification des déformations. D'autres données numériques sont combinées, telles une cartographie détaillée du mode d'occupation du sol de l'IAURIF et la cartographie géologique du BRGM, qui permet de localiser des affleurements d'argiles gonflantes. Ce travail est comparé à l'approche cartographique de l'aléa du retrait/gonflement des sols argileux effectuée par le BRGM. En conclusion, la nature gonflante du sol, le type de tissu urbain, la topographie ou encore la présence de végétation arborée par exemple, sont autant d'éléments qui expliquent localement la sinistralité dans l'Est de l'Île-de-France.

Mots-clés : sécheresse géotechnique, retrait/gonflement, argile, interférométrie, SIG, Est parisien.

Contribution of GIS and remote sensing (optical and radar) for the swelling soils studies. Application to the East of the Paris basin

Abstract

What are the remote sensing (optical and radar wavelength) contributions to locate, characterize and quantify the deformations issued from the dryness hazard in the eastern part of the Paris basin? The data integration within a GIS helps to analyse the major parameters which induce such low deformations. So a Digital Terrain Model (DTM) from BdAlti of IGN permits the extraction of the topographic slopes, the

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 30 avril 2008.

orthophotography (aerial photograph orthorectified) reveals the land use, and the Differential Interferometry DInSAR gives indication in coherent areas to locate, characterize and quantify the low deformations. Other data are superimposed such as the geologic map issued from BRGM mapping which helps to locate the outcropping clays submitted to the phenomena, and IAURIF map which helps to better characterize the land occupation. This work is compared to the one done by the BRGM. To conclude the presence of clays sensible to hygrometry, the type of land occupation such as the presence of trees is key points to explain the disorders that exist in the eastern Paris basin.

Key words: drought hazard, swelling clays, interferometry, GIS, East Paris basin.

Introduction

La sécheresse est à l'origine de nombreux mouvements de la surface du sol. Le phénomène de retrait/gonflement d'Argile (RGA ci-après) exacerbe ces mouvements dans les sols où des argiles sont présentes. Dure et cassante lorsqu'elle est desséchée, l'argile devient plastique et malléable à partir d'un certain niveau d'humidité. Les déplacements induits sont de faible amplitude en valeur absolue (du mm à 15 cm dans la zone d'étude), mais le phénomène de tassement différentiel est à l'origine d'importants dommages sur les bâtiments. Le but de ce travail est de mieux comprendre les facteurs à l'origine des déformations de la surface topographique urbanisée induite par le RGA en utilisant les données de télédétection optique et radar, intégrées au sein d'un Système d'Information Géographique (SIG). Les données optiques sont des orthophotos géoréférencées et les données radars utilisées sont des interférogrammes obtenus par la méthode interférométrique différentielle DInSAR¹. En guise d'application, la région Île-de-France a été choisie car particulièrement affectée par le phénomène avec un cumul de 559 communes sinistrées sur 1 300 (arrêté ministériel du 18/09/1998) pour les périodes de sécheresse de 1989-1992 et de 1996-1997, représentant une sinistralité de 43 %. En particulier, deux départements de l'Est parisien, le Val-de-Marne (94) et la Seine-Saint-Denis (93) ont les taux de sinistralité parmi les plus élevés de France avec le second et le troisième rang respectivement, selon la Caisse centrale de réassurance. En effet, le fort taux d'urbanisation et le caractère pavillonnaire de leurs zones résidentielles situées sur des argiles gonflantes font de ces départements des territoires vulnérables au RGA. Plus récemment, la canicule de 2003 et la sécheresse de l'année 2005 soulignent la récurrence du phénomène, dans le contexte de réchauffement climatique actuel selon l'étude de Hansen *et al.* (2006).

La compréhension du phénomène ainsi que sa cartographie est un objet de recherche d'actualité. D'après Vincent (2006), la délimitation des zones sensibles est la première étape d'une politique de prévention des risques. Elle permet d'appliquer des normes de construction plus sévères ou d'imposer des aménagements adaptés dans les zones à risque. Un premier travail d'inventaire des zones concernées par l'aléa RGA a été réalisé par le Bureau de recherche géologique et minière (BRGM) à l'échelle départementale en se basant sur la cartographie de la lithologie, la sinistralité

et des paramètres géotechniques des formations issus des cartes géologiques au 1/50 000. A la demande du ministère de l'Écologie et du Développement durable (MEDD), ces travaux ont été transposés à l'échelle de la commune, afin d'établir des plans de prévention de risque. Cependant, compte tenu des incertitudes sur la lithologie des sols sub-affleurants et de la grande variabilité dans leur composition minéralogique, la cartographie de l'aléa réalisée par le BRGM reste imprécise à l'échelle d'un quartier d'habitation.

Localement, les analyses géotechniques du sol permettent de caractériser précisément le potentiel expansif du sol (Bigot *et al.*, 2000). Cependant, les essais en laboratoire ont un coût et sont long à effectuer. Il est donc difficile de multiplier les échantillonnages pour un terrain donné et de couvrir ainsi une vaste zone géographique. La télédétection, en tant qu'outil de mesure directe à distance, permettrait d'avoir une vue synoptique du phénomène et pourrait être utilisée pour suivre dans le temps les déplacements induits et de préciser localement l'origine des désordres induits par la sécheresse. Les synthèses de Van der Meer (1999) et de Kariuki *et al.* (2004) exposent succinctement les méthodes et les techniques en télédétection optique utiles à la problématique du RGA. En télédétection optique, l'imagerie hyper spectrale a déjà permis de caractériser la minéralogie des sols affleurants (Chabillat *et al.*, 2002 ; Ben-Dor *et al.*, 2002 ; Kariuki et Van der Meer, 2003). Cependant, si de bons résultats sont obtenus pour des milieux arides, faiblement végétalisés et peu urbanisés, la télédétection optique reste inadaptée en Île-de-France de par la forte urbanisation et l'abondance de la végétation.

Dans le domaine de la télédétection radar, l'interférométrie différentielle radar permet dans certaines conditions de mesurer des déformations discrètes de faible amplitude avec, au mieux, une précision millimétrique, (Massonnet et Feigl, 1998). Cependant, à notre connaissance, cette technique n'a pas encore été appliquée aux mouvements induits par la sécheresse. L'objet de cette étude est donc d'évaluer la faisabilité de la technique DInSAR pour l'étude des effets de la sécheresse géotechnique en vue de localiser, caractériser et quantifier les déformations de la surface du sol. Les résultats et les limites de cette technique appliquée au suivi du phénomène RGA sont précisés ci-dessous. Les traitements ont été réalisés avec des données d'archives du satellite ERS acquises entre les années 1991 et 2000, en particulier pour la sécheresse de 1996/1997, sur l'Est parisien. Après avoir exposé le phénomène RGA et les facteurs participants, la méthode interférométrique utilisée sera détaillée. On présentera les résultats d'une analyse effectuée à partir de l'imagerie aérienne, des cartes géologiques et de la cartographie

de l'aléa réalisée par le BRGM, des cartes de pente et enfin des interférogrammes choisis sur les périodes de sécheresse étudiées.

2

Le retrait/gonflement d'Argile (RGA)

2.1

Le risque RGA

La définition du phénomène de retrait/gonflement des sols argileux en terme d'aléa ou de risque est importante tant les facteurs environnementaux qui interviennent dans la problématique sont nombreux. Rappelons qu'un aléa se définit par la probabilité qu'un évènement naturel se produise. Le risque est l'intersection de cet aléa avec un enjeu ou avec une vulnérabilité (Bourrelier *et al.*, 2000) et se mesure par une intensité. La détection des mouvements de la surface du sol par l'interférométrie radar implique que l'on étudie les effets de la sécheresse en tant qu'aléa, qui croisé avec la susceptibilité du sol au retrait/gonflement donne la sécheresse géotechnique (Fig. 1a). Cependant la problématique fait aussi intervenir un enjeu, tel que les zones urbaines mais aussi la vulnérabilité des bâtiments et les informations relatives à leurs dommages. Le retrait/gonflement des sols argileux est donc un risque, puisqu'il résulte de la combinaison de l'aléa sécheresse, de la susceptibilité du sol au retrait/gonflement et de la vulnérabilité des infrastructures (Fig. 1b).

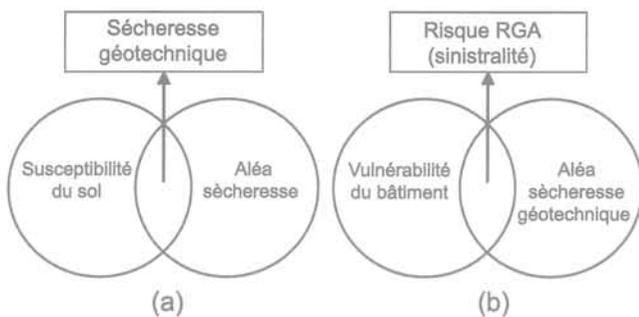


FIG. 1 Schémas risque/aléa appliqués à la sécheresse géotechnique. En (a), l'aléa sécheresse géotechnique résulte de l'aléa sécheresse et de la susceptibilité du sol et en (b), le risque du RGA résulte de la vulnérabilité des bâtiments et de l'aléa sécheresse géotechnique. Scheme Risk/hazard applied to geotechnical drought.

(a) The geotechnical drought hazard,
(b) the swelling soils risk.

2.2

Le phénomène physique

Le cycle de tassement et du retour à l'équilibre d'un sol est un phénomène physique naturel qui se traduit par une variation de volume du sol, qui est étroitement liée à la variation de la teneur en eau. D'un point de vue granulométrique, la plupart des types de sols voient leur volume évoluer selon le retrait ou l'apport d'eau.

Mais ce sont les propriétés minéralogiques des argiles qui font la particularité du phénomène de RGA : la surface spécifique élevée des feuillets argileux permet aux particules d'argile d'adsorber une quantité importante d'eau. Le potentiel de retrait/gonflement est ainsi particulièrement élevé pour les minéraux argileux appartenant au groupe des smectites (en particulier la montmorillonite) et, dans une moindre mesure, au groupe des interstratifiés, caractérisé par l'alternance plus ou moins régulière de feuillets de natures différentes tels que les smectites/illites.

Quel est l'ordre de grandeur de ces mouvements susceptibles d'être détectés par la technique d'interférométrie radar ? Lors d'une sécheresse, la tranche la plus superficielle du sol argileux est soumise à l'évaporation sur plusieurs mètres de profondeur. Il en résulte un tassement vertical et l'ouverture de fissures verticales superficielles. L'amplitude des mouvements verticaux est d'ordre centimétrique et peut dépasser 10cm en certaines circonstances. Une couche argileuse saturée de un mètre d'épaisseur qui subirait une diminution relative de la teneur en eau de 10 %, générerait un tassement d'environ cinq centimètres (Barbier, 2004). Ces variations de volume, surtout lorsqu'elle donnent lieu à des tassement différentiels, ont des conséquences importantes sur l'état des bâtiments, en particulier sur ceux dont la conception n'est pas adaptée pour résister à ce type de mouvement.

2.3

Les facteurs

Pour décrire les facteurs influençant l'aléa RGA, on distingue les facteurs de prédisposition et les facteurs de déclenchement (Donsimoni *et al.*, 2003). Cette nomenclature proposée par le BRGM a été reprise dans nos travaux.

Les facteurs de prédisposition sont ceux dont la présence fait que le phénomène de retrait-gonflement est possible, mais ne suffisent pas à eux seuls pour le déclencher. Ces facteurs sont fixes ou évoluent très lentement avec le temps. Ce sont : (1) la nature du sol, (2) le contexte hydrogéologique, (3) la présence d'une nappe phréatique, (4) le contexte géomorphologique et (5) les défauts de construction.

Les facteurs de déclenchement sont ceux dont la présence provoque le phénomène de retrait-gonflement, mais qui n'ont d'effet significatif que s'il existe des facteurs de prédisposition préalables. Ce sont : (1) les conditions climatiques, (2) les facteurs anthropiques et (3) la végétation.

Ces éléments doivent donc être théoriquement pris en compte lors d'une étude complète de l'impact d'une sécheresse. En effet, selon le processus considéré, l'extension spatiale du mouvement liée aux effets de la sécheresse est variable : la déformation de la surface du sol peut être très localisée pour le retrait/gonflement de sols argileux, mais aussi plus étendue dans le cas d'une déstabilisation des pentes ou dans le cas d'un tassement d'une formation géologique lié au battement du niveau de la nappe d'eau souterraine. Les facteurs de prédisposition selon le contexte environnant, comme la présence de végétation ou l'existence d'une nappe aquifère temporaire peuvent certainement modifier de manière relative l'extension spatiale de ces mouvements. Leurs influences doivent être prises en

compte pour mieux décrire les signaux détectés dans les interférogrammes calculés.

2.4

Les périodes relatives de sécheresse

La détermination des périodes de sécheresse est un travail nécessaire pour l'étude des effets de l'aléa sécheresse sur le sol par interférométrie radar. Connaître ces périodes permet de sélectionner les données radar utiles et donne des repères temporels pratiques lors de l'interprétation des interférogrammes. La détermination d'une période de sécheresse consiste à identifier l'intervalle de temps pendant lequel les conditions hydriques sont déficitaires par rapport à des valeurs normales. Les seuils utilisés pour déterminer ces périodes dépendent largement des traitements statistiques et des normes utilisés, c'est pourquoi la définition d'une période de sécheresse peut fortement varier d'un pays à un autre.

Afin de déterminer une ou des périodes d'étude de sécheresse géotechnique, une étude simple des données de température et de précipitation a été réalisée à partir des données de Météo-France sur la région Est parisienne (Fig. 2). Elle est basée sur l'analyse de la pluviométrie efficace mensuelle corrigée et de l'estimation d'une courbe de tendance par moyenne mobile centrée (période de 11 mois) pour lisser les disparités pluviométriques mensuelles. La courbe de tendance fait ainsi apparaître les débuts et fins des périodes de déficit hydrique susceptibles d'intéresser l'étude du RGA par interférométrie radar.

La pluie efficace brute est calculée à partir de la formule simplifiée : $PE = PP - ETP$, le bilan dans ce cas peut être négatif. On définit également la pluie efficace corrigée, PEC, pour laquelle les valeurs négatives sont remplacées par zéro. Les histogrammes donnés ci-dessus sont des valeurs en mm par mois.

Précipitation (PP) : le terme précipitation recouvre toutes les eaux météoriques, il concerne la pluie, la rosée, le brouillard, la neige, la grêle, le givre. L'unité employée est le millimètre d'eau par surface unitaire de 1 m^2 .

Evapotranspiration (ETP) : elle désigne toutes les pertes d'eau par retour direct à l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau. L'évaporation étant le phénomène physique et la transpiration le phénomène biologique. Elle est qualifiée de potentielle puisque la valeur calculée correspond à la limite maximale d'évapotranspiration d'une zone lorsque celle-ci ne subit aucune restriction en eau.

Pluie efficace (PE) : dans le cadre d'un bilan hydrologique, on définit la notion de pluie efficace qui correspond à la quantité d'eau infiltrée et ruisselée.

On peut noter les périodes relativement humides juste avant les sécheresses de 1989 et de 1996. De même, la période 2001-2002 est relativement abondante en précipitations. Une explication possible de la sécheresse géotechnique serait un fort contraste météorologique (tant au niveau des températures que de la pluviométrie) qui fait que l'état hydrique des sols se situe hors de son état d'équilibre. Cette étude simple fixe deux périodes de sécheresse à étudier par interférométrie : la sécheresse de mars à juin 1996 et celle de 2003. Celle de 1989 ne peut être étudiée en raison de l'absence de données radar sur cette période.

3

L'interférométrie différentielle

3.1

Principe

L'interférométrie radar désigne l'ensemble des méthodes « qui utilisent au moins deux images SAR complexes afin d'obtenir des informations supplémentaires sur les objets présents dans une seule image SAR, en exploitant l'information de phase du signal SAR », (Bamler et Hartl, 1998). Pour apporter de l'information, un paramètre d'acquisition doit être différent entre la première et la deuxième image. Cela peut être soit l'instant d'acquisition, soit la position et l'orientation du radar (interférométrie simultanée, par exemple) soit la fréquence ou la polarité de l'onde, émise ou reçue, ou encore le mode d'acquisition.

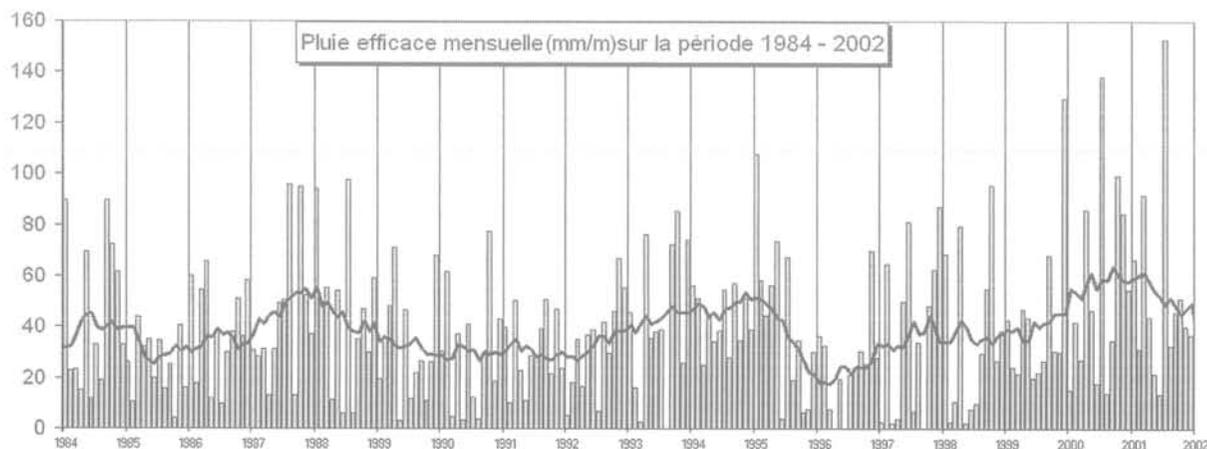


FIG. 2

Histogramme de pluviométrie efficace corrigée (PEC) entre 1984 et 2002 sur l'Est parisien et courbe de tendance à partir de la moyenne mobile calculée sur une période mobile de onze mois (Données : © Météo France). Rainfall histogram between 1984 and 2002 on the eastern Paris basin and the Moving average curve extracted with a period of 11 months (Data: © Meteo France).

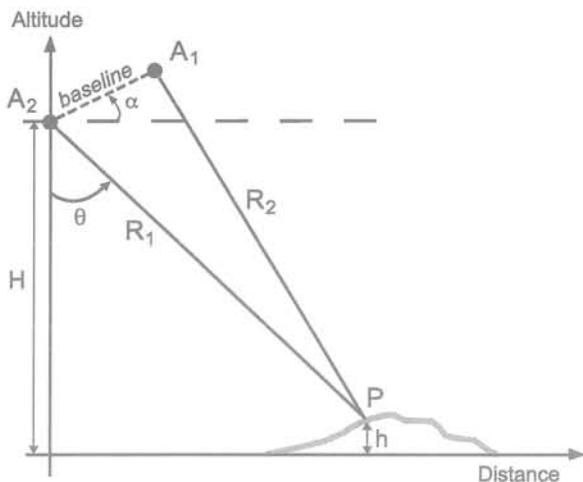


FIG. 3 Géométrie d'acquisition en interférométrie. Les deux capteurs A_1 et A_2 sont séparés par une distance, la ligne de base. Idéalement, cette distance doit être la plus courte possible. Une cible P est localisée dans la scène, à une hauteur h . R_1 et R_2 sont les distances respectives entre les capteurs et la cible. Geometry acquisition in interferometry. The distance between the two sensors A_1 and A_2 is called the baseline which must be as short as possible. The target P is at a distance R_1 and R_2 and an elevation h .

Pour l'étude des déplacements, le seul paramètre d'acquisition qui doit changer entre les deux images est la date d'acquisition entre les deux passages successifs. Dans ce type d'application, il est donc préférable que la géométrie d'acquisition entre les passages successifs du capteur soit identique autant que possible. Dans un cas idéal où le satellite repasse exactement au même endroit, on peut alors étudier la différence de phase entre les deux images (la répartition spatiale de ce déphasage) et étudier ainsi l'origine de ce déphasage. Cependant, la relative maîtrise du positionnement des satellites ne permet pas d'avoir des géométries d'acquisition strictement identiques. La distance entre les deux satellites est appelée la ligne de base du couple (*baseline* en anglais) qui est l'un des paramètres de sélection des images radar pour produire des interférogrammes exploitables.

Les interférogrammes calculés font apparaître des variations de phase sous forme de franges interférométriques colorées. Une différence de phase entre les deux images peut parfois se traduire par la présence de plusieurs franges. Chaque frange est équivalente à un déplacement dont l'amplitude est égale à une demi-longueur d'onde (2,8cm pour le capteur ERS1 et ERS2) selon la ligne de visée du capteur. Par déroulement des franges, on peut ainsi estimer une des composantes du vecteur de déplacement de la surface du sol.

La différence de phase (déphasage), résulte de plusieurs contributions décrites de la façon suivante :

$$\Delta\phi = \Delta\phi_d + \Delta\phi_a + \Delta\phi_t + \Delta\phi_{dc} + \Delta\phi_r + 2k\pi$$

- $\Delta\phi$: différence de phase ;
- $\Delta\phi_d$: différence de phase liée au déplacement du sol, mesuré selon la ligne de visée ;
- $\Delta\phi_a$: différence de phase due au changement des conditions atmosphériques ;
- $\Delta\phi_t$: différence de phase liée à la topographie ;
- $\Delta\phi_{dc}$: différence de phase issue des décorrélatons géométriques et temporelles ;

$\Delta\phi_r$: différence de phase résiduelle (bruit) issue des traitements (recalage, enregistrement SAR).

L'analyse d'un interférogramme consiste principalement à distinguer les différentes contributions des phases au sein de l'image pour isoler la seule composante $\Delta\phi_d$ (mesure du déplacement). La précision de mesure pour cette méthode interférométrique est de l'ordre du demi centimètre (Fruneau *et al.*, 2005), pourvu que les données spatiotemporelles de la technique (répétitivité de mesure égale à 35 jours, mesure dans l'axe de visée) soient adaptées au phénomène étudié.

3.2

Limites de l'interférométrie

L'interférométrie DInSAR fonctionne si le décalage dans le temps n'est pas trop long (inférieur à dix ans), si la ligne de base est inférieure à un kilomètre, si l'atmosphère est comparable au moment des deux acquisitions de données. Sous ces conditions, les deux images radar forment un couple interférométrique performant et permettent d'obtenir des franges interprétables en terme de déplacement.

3.2.1

Perte de cohérence

En pratique, l'interprétation des franges interférométriques est rendue difficile par la perte de cohérence temporelle et/ou spatiale (ou géométrique) entre les deux acquisitions. La cohérence est une mesure du degré de corrélation de la phase entre les deux images radar prises sur une même zone avec un certain intervalle de temps. Plus la cohérence est élevée, plus l'interférogramme est lisible. Par exemple, la présence de végétation diminue ou annule la cohérence. A l'inverse, un milieu densément urbanisé favorise la concentration de réflecteurs RADAR et améliore la lisibilité de l'interférogramme. Cette cohérence peut être diminuée par (1) la décorrélation spatiale et (2) la décorrélation temporelle.

(1) La décorrélation temporelle est liée aux changements physiques de la surface entre les deux observations. Cela peut servir d'indicateur de l'état de la surface du sol et ses modifications entre les deux acquisitions. Une illustration de cette décorrélation est proposée à la figure 4 : on peut observer que sur un interférogramme avec une faible période (ici un mois) entre les deux acquisitions sera plus cohérent, notamment au niveau des champs d'agriculture, qu'un interférogramme avec une période entre images radar de plusieurs années (3 ans pour le second couple).

(2) La décorrélation géométrique résulte des variations dans la géométrie d'acquisition des images. Dès lors que la ligne de base perpendiculaire entre les deux positions du radar aux deux dates d'acquisitions des images est non nulle, il existe une différence d'angle d'incidence qui fait que la mesure ne se répète pas exactement au même endroit. Cette décorrélation spatiale, est d'autant plus importante que la ligne de base perpendiculaire est élevée. Certains couples d'images, pour lesquelles la ligne de base dépasse la ligne de base critique, ne donneront pas des interférogrammes exploitables.

De même, ce type de décorrélation spatiale peut résulter de variations de l'angle de dépointage du radar, qui ne vise pas perpendiculairement à sa trajectoire, mais vers l'avant ou l'arrière. Une défaillance des gyroscopes qui contrôlent l'attitude d'ERS-2, à partir de février 2000 est à l'origine de fortes variations de cet angle de dépointage et donc du Doppler des images. Seuls les couples dont la différence de Doppler est inférieure à 400 Hz sont donc calculés.

3.2.2

Les artefacts atmosphériques

Les artefacts atmosphériques viennent également perturber l'interprétation des interférogrammes et doivent donc être décrits. Les hétérogénéités atmosphériques locales (présence de nuages, pluie...) introduisent des franges atmosphériques et des anomalies de formes variables (globulaire, effilée ...) sur les interférogrammes et qui ne peuvent pas être facilement séparées des franges de déplacement. Une illustration à la Figure 5a montre les effets sur l'interférogramme de ce type d'artefact.

3.2.3

Les artefacts liés aux traitements

Enfin d'autres effets indésirables peuvent apparaître au sein des interférogrammes comme l'apparition d'une frange liée à une mauvaise connaissance de la géométrie orbitale lors de l'acquisition des images

(voir Figure 5b). Il apparaît ainsi des franges résiduelles au sein des interférogrammes qu'il est possible de corriger.

3.3

Critères de sélection des couples interférométriques

Trois critères de sélection interviennent dans le choix des images radar pour calculer un interférogramme de qualité. Ce sont les périodes de sécheresse, la ligne de base et la valeur du doppler. Selon que ces critères sont plus ou moins respectés, on peut juger de l'intérêt d'un interférogramme avant son calcul.

Les périodes de sécheresse sont un critère important de sélection dans ce type d'étude. Il motive le choix des couples et justifie de recalculer des interférogrammes même si les autres paramètres sont en limite de qualité. En effet, chaque interférogramme calculé implique deux images. Le fait que l'une ou les deux images appartiennent à ces périodes va déterminer l'interprétation qui en sera faite. En effet, certains mouvements sont attendus selon que l'interférogramme couvre ou non la période sensible de sécheresse. En dehors de ces périodes de sécheresse, il sera intéressant de suivre sur le long terme les effets consécutifs au tassement, jusqu'à deux ans après l'épisode climatique déclencheur. Enfin, il sera également intéressant d'observer le retour à l'équilibre des sols sur les interférogrammes.

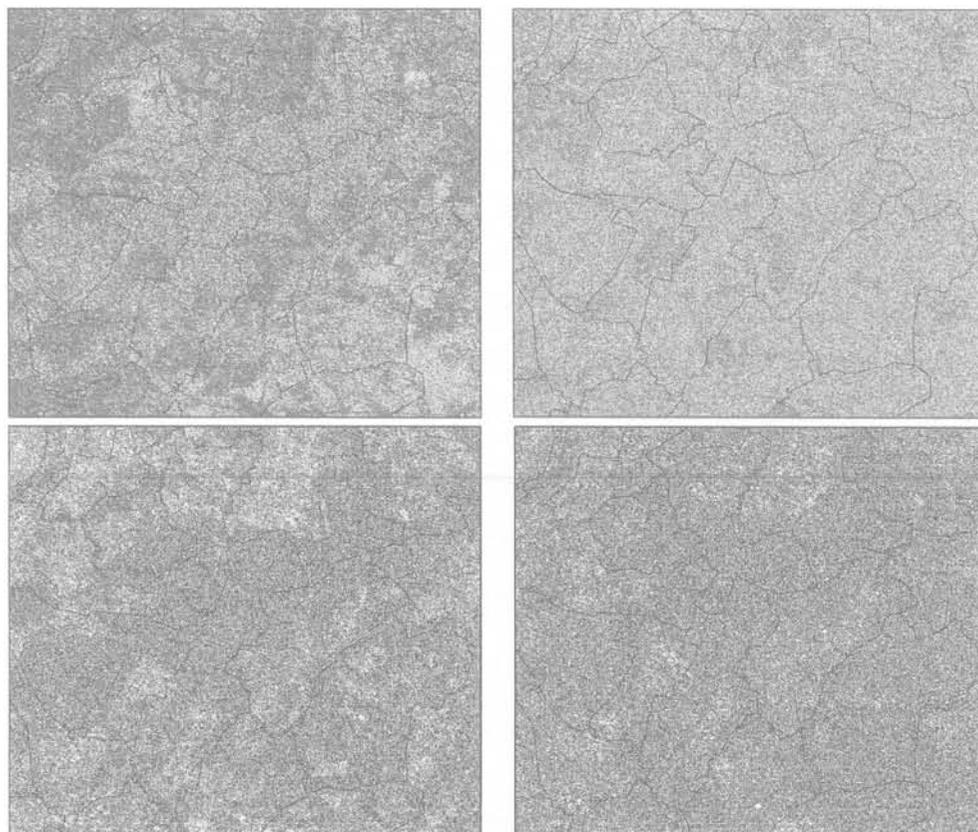


FIG. 4

Illustration de la perte de cohérence temporelle.

Example of the temporal coherence loss.

Figures disponibles en couleur sur <http://www.univ-mlv.fr/g2i/kaveh/>

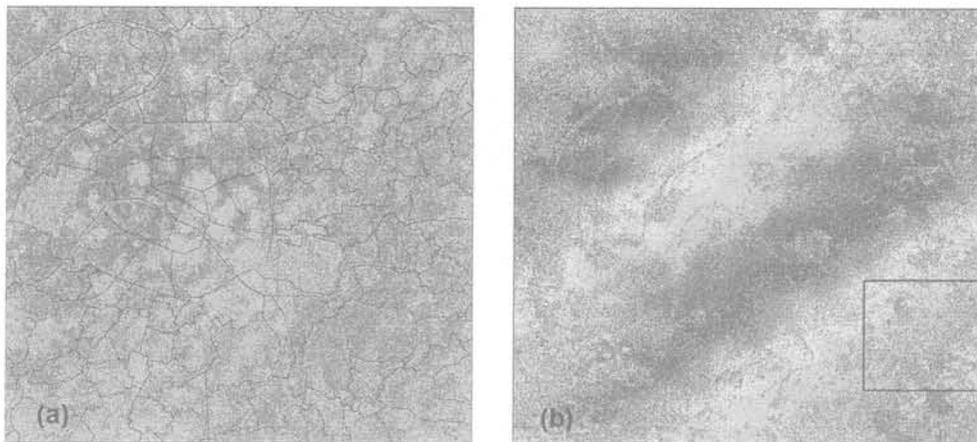


FIG. 5 a) Exemple d'un interférogramme affecté par des artefacts atmosphériques ;
b) Exemple d'un interférogramme avec deux franges orbitales.

a) Example of an interferogram affected by atmospheric artefacts; b) Example of an interferogram characterized by two orbital fringes.

Figures disponibles en couleur sur <http://www.univ-mlv.fr/g2i/kaveh/>

La ligne de base ou « baseline » est un paramètre essentiel dans la sélection des données radar pour constituer des couples interférométriques. C'est une variable qui indique la qualité des interférogrammes produits. Une sélection avec une ligne de base de 200 mètres a été ici réalisée, même si dans la pratique, les interférogrammes facilement interprétables ont une valeur de ligne de base inférieure à 100 mètres.

Enfin, un paramètre lié aux traitements des données SAR, la valeur du doppler centroïde, a été pris en compte dans la sélection des images radar. En télédétection radar, la précision du doppler centroïde affecte directement la qualité des images radar. Sa connaissance est donc importante pour l'application interférométrique envisagée. En effet, les échos qui portent l'information de phase et d'amplitude sont enregistrés par le capteur radar en utilisant un effet doppler, qui est utilisé en traitement du signal pour reconstruire les images. Or, suite à une défaillance du satellite ERS-2 en février 2000, les valeurs du doppler centroïde ont des variations importantes, ce qui réduit le nombre d'interférogrammes à calculer. Ainsi, la sélection des images radar pour constituer un interférogramme exploitable est faite de telle sorte que la différence entre les doppler des deux images n'excède pas 400Hz en valeur absolue.

Donc, même après une sélection par la ligne de base et les dates, tous les interférogrammes ne sont pas exploitables. Avec les données des missions ERS-1 et ERS-2 en mode ascendant et descendant et en appliquant les critères de sélection exposés plus haut, plus de 300 interférogrammes ont été calculés, mais principalement sur la période 1995 à 2000. Ces interférogrammes présentent des qualités variables, seuls certains étant réellement exploitables pour l'application envisagée.

4

Application de l'interférométrie à l'Est parisien

Cette partie décrit les résultats obtenus par l'interférométrie DInSAR appliquée à l'Est parisien pendant les périodes de sécheresse. En premier lieu une description de la zone d'étude est présentée, puis des planches

illustrées d'interférogrammes et de documents thématiques sont décrits et analysés.

4.1

La zone d'étude

Une zone d'intérêt a été définie et deux sites ont été sélectionnés dans l'Est parisien. Après avoir précisé leur emprise géographique, une analyse géomorphologique et géologique est présentée, ainsi que l'analyse de la sinistralité effectuée pour caractériser l'ampleur spatiale du phénomène. L'ensemble de ces informations est essentiel pour la bonne réalisation des travaux en interférométrie radar.

4.1.1

Localisation et occupation du sol

Un site a été sélectionné sur des zones urbaines concentrant de nombreux dommages sur les bâtiments (Fig. 6) entre les départements du Val-de-Marne (94) et de Seine-Saint-Denis (93) s'étendant en partie sur huit communes de l'Est parisien. Les rapports du BRGM recensent plusieurs centaines de sinistres dans ce département. Les communes couvertes par le site d'étude (Bry-sur-Marne, Champigny-sur-Marne, Fontenay-sous-Bois, Nogent-sur-Marne, Le Perreux-sur-Marne) sont renseignées dans la base de données avec les documents thématiques. La zone est centrée sur la commune de Nogent-sur-Marne, avec une emprise qui a été choisie de telle sorte que le rendu cartographique des figures soit à l'échelle du 1/50 000.

Le fichier du mode d'occupation du sol « MOS 2003 » de l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la région Île-de-France (IAURIF) à 21 postes – issu de la photo-interprétation d'imageries aériennes –, décrit l'occupation du sol, avec entres autres des informations sur le caractère individuel ou collectif des bâtiments. Disponible pour l'Est parisien, cette classification permet de calculer la surface occupée par les principaux types de bâtis édifiés pour la zone d'étude. La répartition des classes par ordre d'importance décroissante est donnée par le tableau suivant.

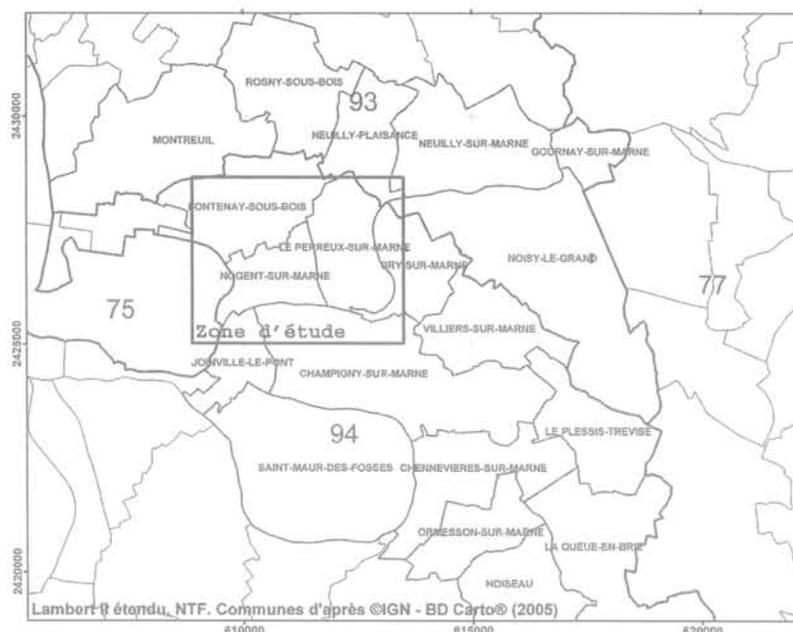


FIG. 6 Localisation de la zone d'intérêt au sein du département du Val-de-Marne (94) ; limite départementale en gras, limite des communes en trait fin.

Location of the test site in the Val-de-Marne district. District boundary in heavy black line, cities boundary in light black line.

TABLEAU I Statistique d'occupation du sol sur les zones d'études à 21 postes, classés par ordre d'importance de la superficie (Source : MOS IAURIF).

Surface statistic of 21 land cover classes ranked in surface order of importance.

Code	Libellé	Surf. (km ²)	%
9	Habitat individuel	13,9	42,7
10	Habitat collectif	4,3	13,2
6	Parcs et jardins	3,1	9,5
20	Transports	2,6	8,0
12	Activités secondaires	1,8	5,5
1	Bois	1,4	4,4
7	Sport (espaces ouverts)	0,9	2,9
15	Équipement d'enseignement	0,8	2,4
8	Terrain vacant	0,7	2,1
4	Eau	0,7	2,1
18	Locaux, administration	0,5	1,5
13	Activités tertiaires	0,4	1,4
5	Autre rural	0,4	1,4
17	Cimetière	0,2	0,7
21	Chantiers et divers	0,2	0,5
14	Sport (construit)	0,1	0,4
2	Grandes cultures	0,1	0,4
16	Équipement de santé	0,1	0,3
11	Habitat autre	0,1	0,2
19	Grands équipements	0,0	0,1
3	Autres cultures	0,0	0,1
	TOTAL	32,6	100,0

Pour une surface totale de 32,6 km², les bâtiments résidentiels représentent 55,5 % de la surface urbanisée et c'est l'habitat individuel qui arrive en première position avec près de 42,7 % d'occupation du sol urbanisé, suivi de très loin par l'habitat collectif (13,2 %). On constate également l'importance des espaces arborés publics qui représentent 16 % de la surface de la zone

d'étude (parcs, forêts et plans d'eau). Ensuite viennent les transports et les activités secondaires avec respectivement 8,0 % et 5,5 %.

Ces chiffres traduisent d'une part le caractère majoritairement résidentiel du mode d'habitat dans les zones d'étude choisies et d'autre part le caractère individuel des bâtiments. Ce tissu urbain est caractéristique d'une zone périurbaine secondaire, avec de nombreux pavillons accompagnés de jardins privés.

4.1.2

Sinistralité

Une étude préalable de la sinistralité a été réalisée afin de développer des hypothèses sur les mouvements de la surface du sol lié au RGA. Pour cette courte analyse des désordres provoqués par le RGA, il est important d'évaluer l'évolution temporelle et l'extension spatiale du phénomène.

Les déclarations des sinistres sur les biens privés auprès des assureurs et des collectivités ainsi que les constats d'experts permettent de dresser un premier bilan du phénomène. Ces données ont été rendues publiques par le BRGM pour un département voisin, la Seine-et-Marne (Donsimoni *et al.*, 2006). Néanmoins, notons que les déclarations de sinistres peuvent intervenir plusieurs mois après la date effective du début du sinistre. Cela est en partie lié à une observation tardive ou à une déclaration différée. On notera qu'une à deux années peuvent s'écouler avant qu'une commune soit déclarée en état de catastrophe naturelle par l'État.

On observe généralement que les dommages se répercutent à long terme après un épisode de sécheresse (Figure 7). L'étude des dates de sinistralité montre que la sécheresse de 1989 précède des sinistres déclarés en 1991 et 1992 en saison humide. Le nombre de sinistres déclarés en 1989 est à peu près équivalent au nombre de sinistres survenus en 1991 et 1992. Il faut attendre l'année 2003 pour observer à nouveau une

sinistralité comparable en nombre de déclarations à celle de 1989.

Cette étude montre que le RGA provoque des sinistres sur une période de plusieurs années, longtemps après l'épisode de sécheresse. La sécheresse, qui est un événement ponctuel à l'échelle d'une saison se traduit par un risque RGA sur plusieurs années en fonction de la susceptibilité du sol au retrait. La sécheresse provoque donc un retrait, qui est le moteur de la déformation. Cette phase initiale du RGA est suivie d'un gonflement qui intervient de manière inégale tant dans le temps que dans l'espace. On observe aussi sur la figure 7 que la sécheresse de 1996/1997 n'a pas apporté autant de déclarations de sinistres liés au RGA qu'en 1989 dans le département de la Seine-et-Marne (77).

Cependant, dans la mesure où les données radar d'archives ERS ne permettent qu'une étude à partir de 1993, seuls la sécheresse de 1996/97 et l'épisode caniculaire de 2003 seront donc étudiés.

4.1.3

Éléments de géologie/géomorphologie

Le relief de la zone d'intérêt est constitué de trois principales unités : la plaine alluviale de la Marne, le plateau et ses versants (Fig. 9). Les flancs des plateaux

présentent des pentes prononcées recoupant les formations géologiques subhorizontales. Au niveau des talwegs, les pentes sont plus douces et les formations sous-jacentes aux limons de plateau affleurent davantage. L'altitude de la plaine alluviale n'excède pas les 35 mètres. La plaine alluviale est composée d'alluvions quaternaires : sables et graviers recouverts par des limons d'inondation. Sur les flancs des versants affleurent les couches de la série éocène et oligocène avec de la base au sommet : calcaire de Champigny ou masses et marnes de gypse, marnes supra-gypseuse, argile verte de Romainville et glaise à Cyrènes, calcaire de Brie et argiles à meulières. Au sommet des plateaux, une couverture de limon des plateaux est présente (Fig. 8a).

Parmi ces formations citées plus haut, le calcaire de Brie (g,b) par sa nature calcaire est peu sensible au phénomène RGA, bien qu'il puisse contenir à la base quelques niveaux marno-calcaires, voire argileux, et bien qu'il puisse présenter localement des poches de décalcification remplies de matériaux argileux. De même, les limons des plateaux (LP) sont peu sensibles au retrait/gonflement, car principalement constitués de matériaux limoneux, même si localement la distinction entre limons de plateaux et argiles à meulières sous-jacentes est délicate. Les autres formations géologiques, par leur nature marneuse ou argileuse, sont

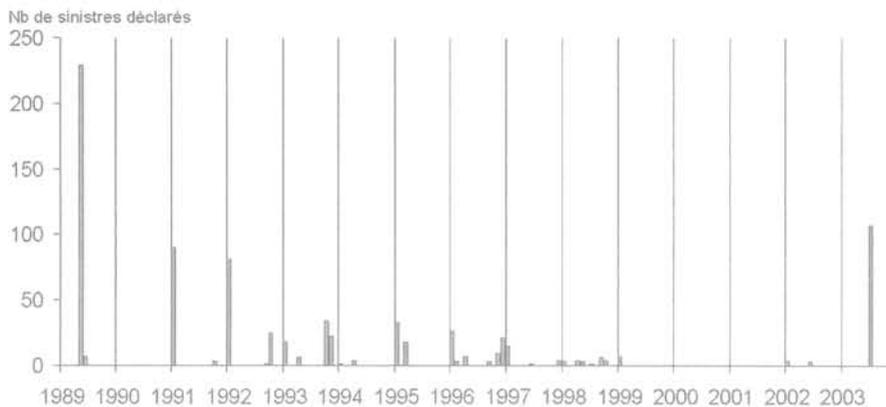


FIG. 7 Dates des déclarations de sinistres de bâtiments pour le département de Seine-et-Marne (77) entre 1989 et 2004 (données extraites de Donsimoni *et al.* 2006).
Date of the damaged houses declaration for the Seine-et-Marne District (77) between 1989 and 2004 (data coming from Donsimoni *et al.*, 2006).

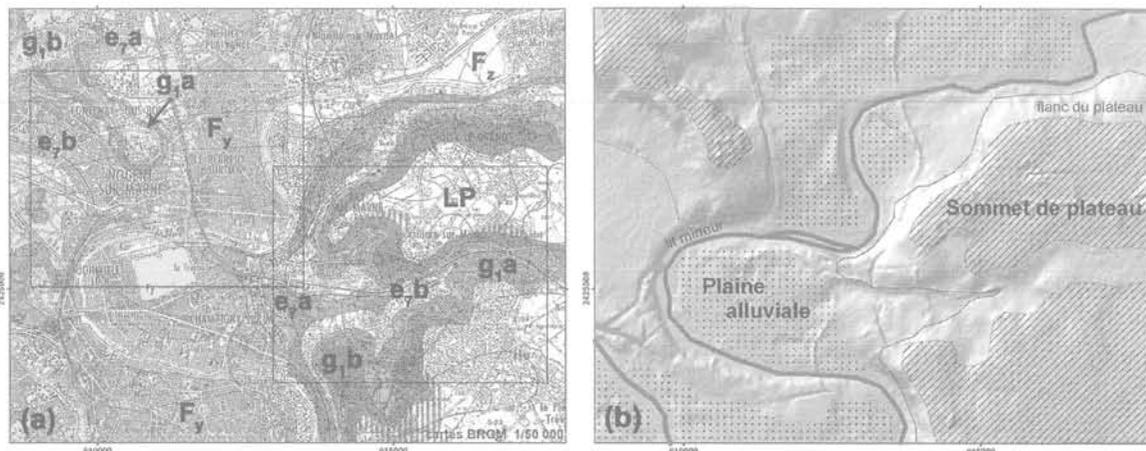


FIG. 8 a) Extrait légendé de la cartographie géologique du BRGM (Soyer *et al.*, 1958) ; b) Descriptif géomorphologique simplifié sur le zone d'intérêt.
a) Detail of the BRGM mapping (Soyer *et al.*, 1958); b) Simplified geomorphologic description of the test site.

potentiellement sujettes au retrait/gonflement. Il s'agit d'étudier le lien entre la sinistralité et l'extension des formations géologiques décrites cartographiquement par le BRGM.

$e_{7,a}$: calcaire de Champigny et marnes à pholadomies indifférenciées (Éocène supérieur, Priabonien, Ludien inf. à Ludien moy.), marnes ludiennes (faciès de transition), et masses et marnes du gypse (Éocène supérieur, Priabonien, Ludien moyen) ;

$e_{7,b}$: marnes supragypseuses (Éocène supérieur, Priabonien, Ludien supérieur) ; les marnes bleues d'Argenteuil et les marnes blanches de Pantin ;

$g_{1,a}$: argile verte de Romainville et glaises à cyrènes (Oligocène, Rupélien, Sannoisien inférieur) ;

$g_{1,b}$: calcaire de Brie et argiles à meulières (Oligocène, Rupélien, Sannoisien) ;

LP : limons des plateaux ;

F_y : alluvions anciennes ;

F_z : alluvions modernes.

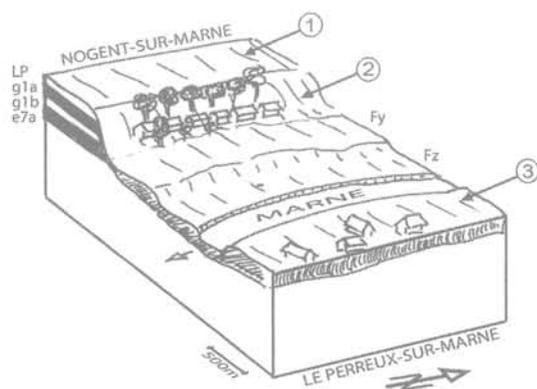


FIG. 9 Représentation 3D simplifiée de la zone d'étude de Nogent-sur-Marne.

1- Plateaux, soumis au RGA et retrait des nappes temporaires, 2- Flanc de coteaux, sensible au fluage des sols et au RGA, 3- Zone alluvionnaire humide soumise à l'aléa sécheresse par la baisse hydraulique de la nappe sous jacente.

3D view of the Nogent-Sur-Marne area.

1- Plateau submitted to the drought, 2- Flank sensitive to the soil creep and drought, 3- Alluvial plain submitted to topographic movement due to the seasonal piezometric variation.

4.2

Analyses

Les planches en couleurs qui montrent les résultats des interférogrammes sont placées à la fin de l'article en noir et blanc et sont disponibles en couleur sur <http://www.univ-mlv.fr/g2i/kaveh/>.

La planche 1 présente une série de vignettes focalisées sur les villes de Nogent-sur-Marne et du Perreux-sur-Marne. Deux agrandissements A_1 et A_2 sont extraits de l'orthophotographie A. Les maisons qui ont été déclarées sinistrées pour le RGA entre 1989 et 2002 (étoiles noires) sur la commune de Nogent-sur-Marne sont notamment alignées N/S perpendiculairement à la Marne sur une zone de forte pente (planche 1, A_1). Elles sont situées sur des roches argileuses gonflantes ($g_{1,a}$

et $g_{1,b}$) d'âge éocène à oligocène supérieur (planche 1, C). Ces maisons individuelles sont encadrées par deux espaces arborés (planche 1, A et A_1). La combinaison des trois facteurs 'végétation arborée', 'forte pente', et 'sol gonflant argileux', est certainement à l'origine de cette forte sinistralité. Cette zone appartient bien à un aléa fort d'après la cartographie du BRGM (planche 1, B). L'interférogramme brut (planche 1, E) et l'interférogramme masqué (planche 1, F) à une cohérence de 0,6 soulignent et révèlent une forte cohérence sur les maisons et bâtiments et, à l'inverse, une faible cohérence sur les zones boisées. La présence de pixels contigus de différentes couleurs sur les interférogrammes souligne la disparité des amplitudes de déplacements des bâtiments, mais cela reste difficilement exploitable du fait du bruit important.

La seconde illustration (planche 1, A_2) est située sur la ville du Perreux-sur-Marne, dans la plaine alluviale de la Marne où se sont déposées les alluvions holocènes F_y et les alluvions récentes F_z (planche 1, C). Ces alluvions argileuses, qui ont des propriétés gonflantes, correspondent à des dépôts de plaine d'inondation. L'agrandissement de l'orthophotographie (planche 1, A_2) montre l'importance de l'habitat pavillonnaire et la présence d'arbres isolés. La sinistralité est caractérisée par des aléas faibles à moyens (planche 1, D). L'information délivrée par les interférogrammes (planche 1, E et F) révèle une faible cohérence liée à l'occupation pavillonnaire jardinée, rendant les interférogrammes difficilement exploitables. La sinistralité est très dispersée et difficile à interpréter.

La planche 2 présente une série d'interférogrammes calculés à partir de couples d'images radar indépendantes sur la zone d'étude. Un rappel de la topographie (planche 2A) et de la géologie (planche 2B) est présenté en haut de la planche afin d'apprécier le contexte général.

Ces six interférogrammes révèlent des déformations soulignées par des flèches noires. Les numéros d'orbite et les dates d'acquisition des couples sont indiqués respectivement en bas à gauche et en bas à droite des vignettes. Les cinq premiers extraits d'interférogrammes révèlent un déphasage du signal radar au niveau de la transition entre la formation F_y et la formation $e_{7,b}$. On peut observer la proximité de ce déphasage avec les sinistres localisés juste en amont, ainsi qu'avec une rupture de pente qui caractérise le changement lithologique entre les alluvions F_y et les marnes de l'Éocène supérieur $e_{7,b}$. Ce déphasage est croissant (rapprochement du sol vers le capteur) entre les années 1996 et 1999 pour les quatre premières vignettes, et seul l'interférogramme 1515 5022 entre le 04.08.95 et le 05.04.96 présente un déphasage négatif (éloignement du sol dans la direction de visée du capteur radar). On montre ainsi un retrait à peine perceptible pendant la fin de l'année 1995 et avril 1996 de l'ordre de 0,3 cm et un gonflement des sols de 0,4 cm jusqu'en 1998 dans le sens de visée du satellite. Une discussion sur l'amplitude de ces valeurs est effectuée ci-après. La dernière vignette représentée par le couple 24695/17046 pour la période entre du 04.04.1996 au 24/07/1998, montre un déphasage positif interprété comme un gonflement sur la rive Est du Perreux-sur-Marne. Il coïncide également avec des sinistres sur une zone alluvionnaire. On note des signaux de déphasage positif également sur les berges de la Marne.

Discussion

Sur le terrain, les déplacements engendrés par le RGA affectent une zone comprise entre la dizaine de mètres carrés et plusieurs centaines de mètres carrés en planimétrie pour des mouvements verticaux de l'ordre au maximum de quinze centimètres. Cependant, les mouvements détectés par interférométrie sont bien inférieurs, car de l'ordre du demi-centimètre sur les surfaces urbaines de Nogent-sur-Marne. Dans la mesure où la technique interférométrique DInSAR décrit principalement les mouvements liés aux réflecteurs des bâtiments, on parvient à expliquer cet écart. En effet, on mesure par interférométrie la réponse du bâtiment aux sollicitations des mouvements induits par le RGA.

Deux types de mouvement sont à distinguer : (1) celui des bâtiments en général, mesuré par interférométrie radar avec une amplitude de quelques millimètres et une surface de plusieurs dizaines de m², et (2) les mouvements du sol caractérisés par une amplitude pluricentimétrique. Hanssen, (2001) définit le champ d'application de l'interférométrie différentielle en prenant en compte l'amplitude et l'extension spatiale des mouvements étudiés (Fig. 10). Cette figure a été modifiée en ajoutant un bloc « RGA » avec les dimensions spatiales de ce type de mouvement observé. Ainsi, les déformations de la surface du sol observées et liées au RGA sont situées à la limite supérieure, du champ d'application de la méthode DInSAR (Fig. 10, bloc RGA, coin haut gauche), tandis que les mouvements détectés sur le bâti (amplitude millimétrique et forte extension) se placent dans le champ d'application de l'interférométrie (Fig. 10, bloc RGA coin en bas à droite).

Les calculs réalisés avec la technique interférométrique DInSAR appliquée à la sécheresse 1996/97 montrent donc des limites. La réponse des bâtiments aux déformations engendrées par le RGA n'est pas homogène dans le temps et dans l'espace. Quelques signaux détectés ont pu être mis en relation avec la sinistralité mais cela nécessite une confirmation terrain. Cependant, les déformations discrètes à l'échelle de petits bâtiments sont rarement décrites.

Parmi les facteurs environnants, participant au phénomène RGA, les surfaces végétalisées et arborées, caractérisées par leur forte évapotranspiration, sont souvent la source des nombreux désordres constatés. Or, ces zones ont une très faible cohérence en interférométrie radar, et sont donc peu identifiables au sein des interférogrammes. La topographie, en particulier les pentes, est un facteur de prédisposition important, car il joue sur la stabilité du terrain pendant le cycle de dessiccation/hydratation du sol. A une échelle régionale, l'étude géomorphologique du paysage permet de mettre en évidence les zones à risque. A une échelle locale, des études de pentes précises sont nécessaires. Enfin, la nature du sol décrite par la carte géologique est certainement un point de départ dans l'étude de la susceptibilité au RGA. La méthodologie du BRGM est confirmée, la sinistralité étant globalement liée à l'aléa cartographié.

L'analyse des facteurs relatifs à la topographie, à la végétation et au type de sol révèle que la description du tissu urbain et de son organisation est nécessaire. Le mode d'occupation du sol de l'IAURIF, permet de situer les zones urbanisées, c'est-à-dire l'enjeu et plus particu-

lièrement les zones urbaines secondaires pavillonnaires. Les informations ainsi extraites, telles que la proximité d'espace arboré, la pente du terrain ou la présence d'un terrain sensible au RGA, sont traitées sous un système d'Information Géographique pour produire une cartographie du risque et des dommages liés au RGA.

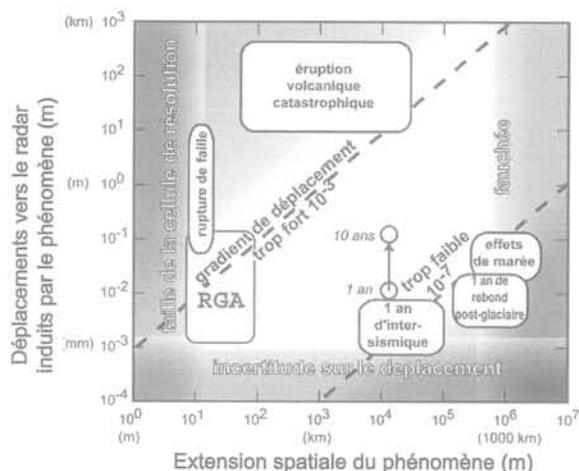


FIG. 10 Domaine d'application de l'interférométrie radar (Massonnet et Feigl, 1998 ; Hanssen, 2001 ; Pathier, 2005, modifié).

Radar interferometric application domain (modified from Massonnet et Feigl, 1998; Hanssen, 2001; Pathier, 2005).

5

Conclusion

Cette approche multisource et pluridisciplinaire permet de mieux comprendre les déplacements de la surface topographique dans les zones soumises au retrait/gonflement. Un Système d'Information Géographique (SIG) est utilisé ici afin de mieux comprendre les origines de la sinistralité liée au retrait/gonflement des sols argileux. Les résultats d'une cartographie optimisée du RGA à l'aide de la combinaison de données issues de la télédétection intégrée dans un SIG pourraient apporter des éléments concrets utiles aux gestionnaires et assureurs.

Plusieurs exemples sont issus de l'Est de l'Île-de-France, région fortement affectée par la sécheresse géotechnique. On constate que la proximité de zones fortement arborées, à forte pente et de formations géologiques argileuses gonflantes d'âge oligo-éocène sont autant de facteurs de prédisposition. L'interférométrie radar (DInSAR) est testée ici dans un but de localisation, de caractérisation et de quantification des amplitudes des déformations liées au RGA. Elle souligne des déplacements qui ne sont pas toujours facile à interpréter. En effet, les résultats observés sont limités du fait : (1) de la faible cohérence de la zone d'étude liée *pro parte* à la nature du tissu périurbain (habitat individuel, pavillonnaire disparate, jardiné et arboré) ; (2) du faible nombre d'images radar ERS et Envisat utilisées et actuellement disponibles sur les périodes de sécheresse et de déficit hygrométrique ; (3) de la non-continuité des déplacements engendrés par le RGA dans le temps ; et, enfin (4) de la forte évolution

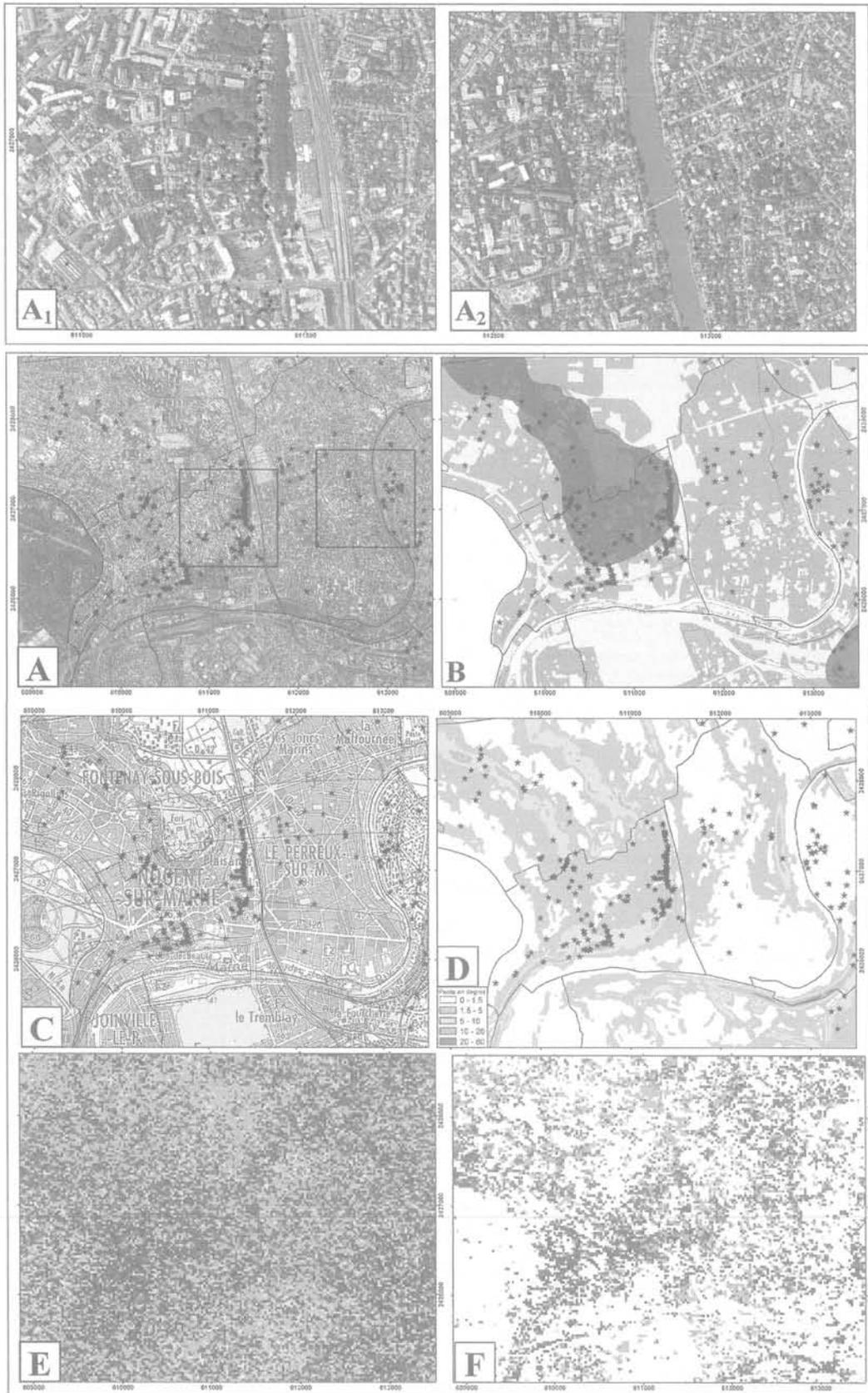


Planche 1

Zone de Nogent-sur-Marne.

A, A1, A2- Orthophotographies ; B- Carte d'aléa BRGM, modifié avec le bâti (MOS IAURIF) ; C- Carte géologique de la figure 8a ; D- Carte de pente ; E, F- Interférogramme 7334_20360 avec et sans masque de cohérence de 0,6 (disponible sur <http://www.univ-mlv.fr/g2i/kaveh/>).

Nogent-sur-Marne area.

A, A1, A2- Aerials photos; B- Risk map issued from BRGM, modified, and anthropic building area (MOS IAURIF); C- Geological map fig.8°; D- Slope map; E, F- Interferogram 7334_20360 with and without a coherence mask of 0.6 (available on <http://www.univ-mlv.fr/g2i/kaveh/>).

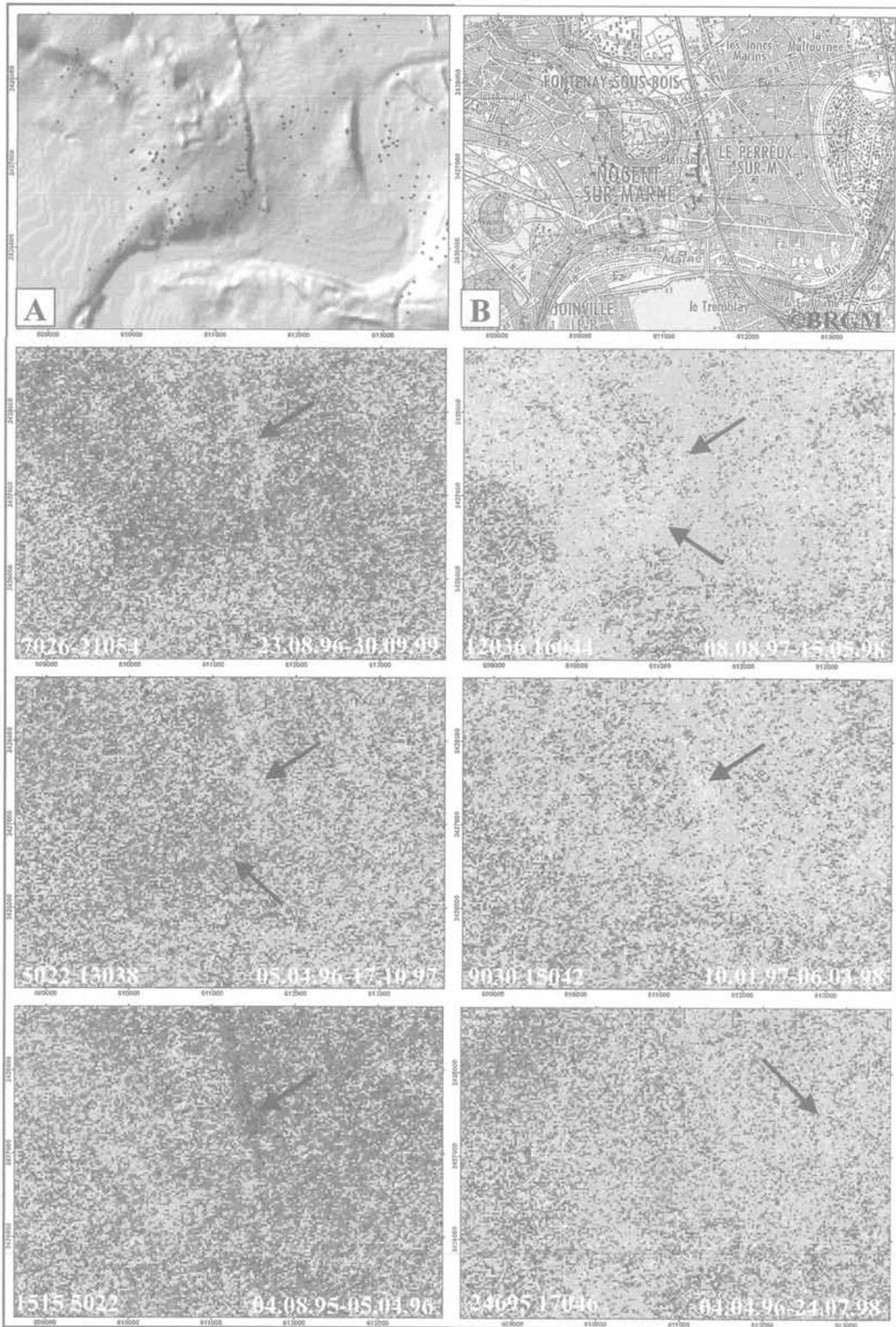


Planche 9

Extraits d'interférogrammes sur la zone d'étude de Nogent-sur-Marne.

A- estompage de MNT révélant la topographie ; (B) extrait de la carte géologique et de la sinistralité recensée par le BRGM (Donsimoni *et al.*, 2003). (disponible sur <http://www.univ-mlv.fr/g2i/kaveh/>).

Extracts of interferogram on the study area of Nogent-Sur-Marne.
A- Hillshaded DTM revealing the topography; B- Extract of the geological map and damage identified by the BRGM (Donsimoni *et al.*, 2003) (available on <http://www.univ-mlv.fr/g2i/kaveh/>).

spatiotemporelle du phénomène. Soulignons que les limitations d'usage sont nombreuses, du fait de la perte de corrélation géométrique, temporelle et des artefacts atmosphériques, qui limitent l'interprétation des anomalies dans un milieu périurbain présentant beaucoup moins de réflecteurs que le milieu urbain plus dense. Il semblerait que seules des déformations affectant une zone supérieures à 1 000 m² sont potentiellement analysables par cette méthode.

Il s'avère donc nécessaire maintenant d'effectuer cette étude en utilisant une autre technique interférométrique, plus adaptée à des objets ponctuels de la taille des bâtiments : la méthode des points stables (PS), dénommée *Persistent Scatterers Interferometry* (PSI) en anglais. L'interférométrie PSI, qui semble plus adaptée à la problématique du RGA permettrait de suivre l'évo-

lution temporelle de réflecteurs fortement rétrodiffusant pourvu que l'on précise la nature du réflecteur et qu'il soit suivi dans le temps avec une référence stable correctement localisée et déterminée.

REMERCIEMENTS

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet de recherche « aléa et risque sécheresse » de la fondation MAIF.

Nous tenons à remercier l'AURIF pour avoir accordé l'utilisation du MOS 2003 ; la Fondation MAIF pour son aide financière ; l'IGN pour les extraits de la BDortho sur l'Île-de-France, issue du Géoportail ; le BRGM pour la carte géologique non vectorisée achetée, et la synthèse des données de sinistralité disponibles dans les rapports départementaux (cf. www.argiles.fr). Nous tenons également à remercier vivement les relecteurs pour les améliorations apportées au manuscrit.

Bibliographie

- Bamler, R., Hartl P. - Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems* 14(4), 1998, p. R1-R54.
- Barbier P. - Comprendre le phénomène de retrait/gonflement. *Qualité Construction*, n° 87, novembre-décembre 2004, p. 21-44.
- Ben-Dor E., Patkin K., Banin A., Karnieli A. - Mapping of several soil properties using DAIS-7915 hyperspectral scanner data : A case study over clayey soils in Israel. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 23, n° 6, 30, 2002, p. 1043-1062.
- Bigot G., Zerhouni M.I. - Retrait, gonflement et tassement des sols fins, Notes techniques. *Bulletin des Laboratoires des ponts et chaussées* -229, NT 4252,2000, p. 105-114.
- Bourrelier P.H., Deneufbourg G., De Vanssay B. - Les Catastrophes naturelles, Éditions OEM, 2000, 160p.
- Chabrilat S., Goetz A.F.H., Krosley L., Olsen H.W. - Use of hyperspectral images in the identification and mapping of expansive clay soils and the role of spatial resolution. *Remote Sensing of Environment*, vol. 82, Issues 2-3, 2002, p. 431-445.
- Donsimoni M. avec la collaboration de Clozier L., Motteau M., Vincent M. - Cartographie de l'aléa retrait/gonflement des sols argileux dans le département du Val-de-Marne. BRGM/RP-52224-FR, 2003, 5 fig., 16 tabl., 2 ann., 4 pl. h.t., 133p.
- Donsimoni M., Kerneis M., Giraud F. avec la collaboration de Imbault M. et Le Roy S. - Cartographie de l'aléa retrait/gonflement des sols argileux dans le département de Seine-et-Marne. Rapport BRGM/RP-53212-FR, 2006, 38 ill., 3 ann., 3 pl. h.t., 1 CD-Rom, 114 p.
- Fruneau B., Deffontaines B., Rudant J.-P., Le Parmentier A.-M. - Monitoring vertical deformation due to water pumping in the city of Paris (France) with differential interferometry. *Comptes rendus Geosciences*, vol. 337, Issue 13, 2005, p. 1173-1183.
- Hansen J., Sato M., Ruedy R., Lo K., Lea D.W., Medina-Elizade M. - Global temperature change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 006, 103, 14288-14293 originally published online Sept 25, 2006; doi: 10.1073/pnas.0606291103.
- Hanssen, R.F. - Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. *Remote Sensing and Digital Image Processing*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 2001, 308 p.
- Kariuki P.C., Van der Meer F. - Issues of effectiveness in empirical methods for describing swelling soils. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 4, Issue 3, 2003, p. 231-241.
- Kariuki P.C., Woldai T., Van der Meer F. - The Role of Remote Sensing in Mapping Swelling Soils. *Asian Journal of Geoinformatics*, vol. 5, n° 1, 2004, Published by ARSRIN, P.O. Box 4, Klong Luang, Pathumthani 12120, Thailand.
- Massonnet D., Feigl K. - Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Review of Geophysics*, vol. 36, n° 4, 1998, p. 441-500.
- Pathier E. - *Apports de l'interférométrie radar différentielle à l'étude de la tectonique active de Taiwan*. Thèse de l'université Marne-la-Vallée, (école doctorale ICMS), 2003, 272 p.
- Soyer R., Lemoine M., Goguel J. - *Carte géol. France (1/50 000)*, feuille Lagny, (type1922), 1^{re} édition, Orléans, BRGM, 1958.
- Van der Meer F. - Can we map swelling clays with remote sensing? In: Van der Meer F., Nieuwenhuis G.J.A., Molenaar M., Woldai T. (eds.), *Operational remote sensing for sustainable development. Journal of Applied Geoinformation Management (special section)*, 1(1), 1999, p. 27-35.
- Vincent M. 2006. Prévention du risque sécheresse : cartographie départementale de l'aléa retrait/gonflement des argiles et établissement de plans de prévention des risques. *Revue géologue* n° 146, 2006, p. 43-47.

La prévention des risques liés à la sécheresse géotechnique : une expérience transposable à d'autres aléas naturels

M. TOULEMONT

Géologue, ex-Chargé de mission au MEDD, DPPR.
49 boulevard de Port-Royal
75013 Paris,
m.toulemont@wanadoo.fr

R. COJEAN

École des mines de Paris,
Centre de Géosciences
UMLV - Bâtiment IFI
5 boulevard Descartes,
Champs-sur-Marne
77454 Marne-la-Vallée Cedex 2
roger.cojean@ensmp.fr

Résumé

Cette note présente un point de vue sur l'expérience acquise dans l'analyse et la cartographie de l'aléa sécheresse géotechnique, la mise en oeuvre de politiques de prévention des risques associés, l'information apportée aux différents acteurs de l'acte de construire ainsi qu'aux particuliers sur le sujet du retrait/gonflement des sols argileux. Elle se conclut par une ouverture vers des préoccupations de prévention relatives à d'autres aléas naturels, considérés dans la perspective du changement climatique global.

Mots-clés : aléa sécheresse géotechnique, retrait/gonflement, sols argileux, cartographie, prévention, information, changement climatique global.

Risk prevention related to shrink/swell hazard: an experience useful for other natural hazards

Abstract

This note presents a point of view concerning the experience obtained in the analysis and mapping of natural hazards related to soil shrinking and swelling, the implementation of the adapted risk prevention policy, the information brought to people and different specialists involved in the field of construction when shrink/swell hazards are concerned. A conclusion is drawn for other natural hazards and prevention policies with a particular look to the global climatic change in progress.

Key words: drought hazard, soil shrinking and swelling, clayey soils, mapping, prevention, information, global climatic change.

Introduction

La Journée technique organisée le 18/01/2007, conjointement par le Comité français de géologie de l'ingénieur et de l'environnement (CFGIE) et le Comité français de mécanique des sols et de géotechnique (CFMS), sur le thème de la sécheresse géotechnique a montré l'actualité des préoccupations scientifiques et techniques relatives à ce sujet, pour des domaines relevant de la géologie, de l'engineering geology et de la géotechnique, de la construction sur sols argileux et de la prévention des risques. L'importance des dommages dus aux phénomènes de retrait/gonflement des sols argileux depuis 1989 et la quasi-certitude de leur renouvellement en cas de nouveaux épisodes de sécheresse intense et durable, ont conduit à la mise en œuvre d'une politique de prévention destinée à réduire le niveau de sinistralité. Cette politique de prévention est aujourd'hui encore en cours d'adaptation dans un contexte naturel et technique d'une grande complexité. Cet article est un point de vue que les auteurs ont tenté de placer dans le cadre du changement climatique global.

Un bref historique de la démarche de prévention et d'information concernant la sécheresse géotechnique

Les processus de retrait/gonflement des sols argileux font l'objet de travaux de recherche scientifique depuis de longues années : caractérisation des facteurs de prédisposition, identification des facteurs déclenchants, recherche d'indicateurs de sécheresse géotechnique pertinents. Les retours d'expériences et résultats d'expertises techniques sur le sujet de la sécheresse géotechnique apportent leur contribution à ces recherches. On ne citera, à titre d'exemple que quelques références sur ce sujet : Philipponnat (1991), Vandangeon (1992), Al-Rawas *et al.* (2006).

Les principales périodes de sécheresse ayant entraîné des dommages au bâti clairement identifiés sont connues : période 1989-1992, période 1996-1997, année 2003. De 1989 à 2002, le coût global d'indemnisation (dans le cadre du régime d'indemnisation Catastrophes naturelles ou Cat-Nat) a été de 3,3 milliards d'euros, selon la CCR (Caisse centrale de réassurance), en deuxième poste de dépenses après les indemnisations concernant le risque inondation. La profession s'est très tôt intéressée à ce sujet technique avec différentes actions entreprises sous l'égide des ministères de l'environnement ou de l'écologie.

Ainsi, il faut rappeler que l'Agence Qualité Construction (AQC) a fait réaliser en 1990, par un réseau d'experts, une enquête statistique sur 356 bâtiments sinistrés, afin de préciser les causes de pathologie des maisons individuelles. En 1991, le CEBTP (Centre expérimental de recherches et d'études du bâtiment et des travaux publics) a réalisé une enquête sur 412 bâtiments endommagés par la sécheresse géotechnique. Ces études ont permis d'identifier le profil de la construction sinistrée. Il s'agit d'une maison

individuelle en rez-de-chaussée (72 %), avec dallage sur terre plein (68 %), fondée entre 0,40 m et 0,80 m de profondeur (77 %), sur un sol argileux (97 %) et avec des arbres à proximité (30 %). Il en a résulté, sous l'égide des organismes : AQC, APSAD, AFAC, CCR et FNB, l'édition d'un guide pratique sur « La détermination des solutions adaptées à la réparation des désordres des bâtiments provoqués par la sécheresse » (CEBTP, 1991). La *Revue française de géotechnique* a publié un article consacré au retrait/gonflement des argiles dans le N° 57 (octobre 1991) puis un ensemble de cinq articles dans le n° 58 (janvier 1992) passant en revue les aspects scientifiques et techniques du problème et présentant les conditions d'application de la loi du 13 juillet 1982 sur l'indemnisation des victimes des catastrophes naturelles.

En 1993, la Direction de la prévention des pollutions et des risques (DPPR) du ministère de l'Environnement a publié, à la Documentation française, un guide de prévention *Sécheresse et construction* (DPPR, 1993) présentant des recommandations à l'usage des constructeurs et énonçant les principes d'une cartographie de l'aléa et du risque sécheresse géotechnique. Ce guide, tiré à 5 000 exemplaires, a été transmis en 1998 aux préfets des départements concernés et à l'ensemble des maires des communes reconnues sinistrées par arrêté interministériel portant constatation de l'état de catastrophe naturelle. En 1993, la DPPR a établi un document présentant la méthodologie d'une cartographie de l'aléa « sensibilité des sols à la sécheresse » et la carte correspondante au 1/1 000 000. Quatre classes d'aléa étaient distinguées, prenant en compte les caractéristiques lithologiques et géotechniques des formations géologiques ainsi que leur degré d'homogénéité et prenant appui sur l'analyse en retour des conséquences des événements « sécheresse géotechnique » disponibles à cette époque, au vu des dossiers des communes reconnues sinistrées par arrêté interministériel dans le cadre du régime d'indemnisation Cat-Nat. Les auteurs de cet article, à l'origine de cette cartographie, ont ensuite publié un article synthétique dans la revue *Mappemonde* (Toulemont *et al.*, 1994).

En 1995, dans le cadre de la procédure spécifique de prise en compte des risques dans l'aménagement du territoire, au plan réglementaire, la DPPR du ministère de l'Écologie et du Développement durable (MEDD) a lancé la réalisation des Plans de prévention des risques naturels (PPRN). À la suite des sécheresses pluriannuelles de 1989-1992, de 1996-1997, puis de la canicule de 2003, le MEDD a mandaté le BRGM afin d'établir la cartographie départementale de l'aléa retrait/gonflement au 1/50 000 sur la France entière (Vincent, 2003).

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

Le Comité français de géologie de l'ingénieur et de l'environnement (CFGIE) a réalisé plusieurs séances techniques relatives au thème des sols sensibles à la sécheresse : en janvier 1991, sur le thème « Sécheresse, terrains argileux et fondations », puis, en janvier 2003, sur le thème « Sols sensibles à l'eau, retours d'expérience ». En janvier 2007, une journée technique CFGIE-CFMS était organisée sur le thème « Sécheresse géotechnique », accueillant plus de 150 participants.

En Grande-Bretagne, où la sécheresse de 1976 a occasionné des sinistres importants, une profondeur minimale de fondation d'1 mètre a été immédiatement rendue obligatoire pour les maisons individuelles. En

France, malgré son intensité, cette sécheresse n'avait occasionné que peu de dommages du fait de sa brièveté, quatre mois environ, et de la faible profondeur de l'assèchement.

Il n'y a pas eu, par la suite, de modification des textes normatifs DTU 13-12 relatifs à la profondeur hors gel (0,50 m en zone tempérée) en dépit de la sécheresse géotechnique qui, depuis 1989, a constitué le premier facteur de pathologie des maisons individuelles. Cependant, l'établissement des PPR Sécheresse géotechnique et la définition d'un règlement adapté à ce type d'aléa reste aujourd'hui encore un sujet de concertation entre spécialistes.

L'importance des dégâts immobiliers durant les dernières décennies et les risques de nouvelles périodes de sécheresse ont conduit à prendre en compte la nécessité d'une politique d'information volontariste en direction des collectivités territoriales, compte tenu de leur responsabilité en matière de prévention.

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

- une plaquette d'information sur la prévention de ces désordres qui s'adresse à l'ensemble des lotisseurs, maîtres d'œuvre, constructeurs, contrôleurs techniques et géotechniciens ;
- un diaporama « sécheresse et constructions sur sol argileux : nouvelles règles préventives ».

Un programme de plus de 10 rencontres interprofessionnelles régionales destinées aux professionnels et notamment aux constructeurs de maisons individuelles a été organisé et va être poursuivi. Les participants, de 100 à 200 par réunion, ont exprimé leur grande satisfaction à l'issue de ces réunions, ayant tout particulièrement apprécié le débat sur les dispositions constructives locales.

3

Des sols sensibles au retrait-gonflement sous toutes latitudes

Les sols sensibles au retrait/gonflement ou sols gonflants (*expansive soils*) sont connus pratiquement dans toutes les régions du monde, les dommages aux constructions étant souvent très spectaculaires dans les régions arides et semi-arides. Les phyllosilicates de la famille des smectites ou d'autres minéraux argileux

de la famille des interstratifiés (illite-smectite...) sont toujours présents dans ces sols et leur confèrent un fort potentiel de gonflement et de retrait. Dans le cas des pays de climats tropicaux secs (régions désertiques ou semi-désertiques) et méditerranéens, où l'état de référence des sols est généralement un état de sol sec la plus grande partie de l'année, la sollicitation hydrique à l'origine des dommages est représentée le plus souvent par un apport d'eau inhabituel, générateur de processus de gonflement des sols argileux avec les dommages au bâti qui en résultent. Dans le cas des pays de climats tempérés océaniques ou continentaux, où l'état de référence des sols est un état de sol humide, la sollicitation hydrique à l'origine des dommages est le plus souvent un assèchement des sols en surface, sollicitation d'origine climatique ou liée à l'action de la végétation, génératrice de processus de retrait des sols argileux avec les dommages au bâti qui en résultent. Dans ces situations, même lorsque les minéraux argileux gonflants ne sont pas prépondérants dans les sols concernés, comme pour certains sols argileux en Grande-Bretagne ou en France par exemple, les dommages au bâti liés à la sécheresse peuvent être très importants.

On connaît des sols sensibles au retrait/gonflement en Afrique du Sud, en Allemagne, en Argentine, en Australie, en Birmanie, au Canada, en Chine, à Chypre, à Cuba, en Espagne, en Éthiopie, en France, au Ghana, en Grande-Bretagne, en Grèce, en Inde, en Iran, en Israël, au Japon, en Jordanie, au Maroc, au Mexique, en Norvège, en Oman, en Rhodésie, en Roumanie, en Russie, en Suède, en Turquie, aux USA, au Venezuela. Certains sols gonflants sont connus sous le nom de *black cotton soils* aux USA et en Inde. Les géologues et géotechniciens sont familiers de ces types de sols, de même que les pédologues qui décrivent les vertisols, sols argileux riches en argiles gonflantes, soumis à un brassage par les « mouvements vertiques » liés aux variations saisonnières de volume des argiles, conduisant en période sèche à la formation de fentes de retrait, en période humide à la formation, en surface, de micro-reliefs dénommés gilgai et au sein du matériau à la formation de surfaces de friction ou « slickensides » caractéristiques (P. Duchaufour, 1977 et 1984, D. Tessier, 2006).

A titre d'exemple, la Chine est l'un des pays du globe où les sols gonflants sont très largement répandus. Ils sont présents dans 20 provinces et régions occupant environ 6 000 000 km². Le retrait-gonflement des sols argileux représente le principal phénomène naturel responsable des problèmes de construction sur fondations peu profondes et de certains glissements de terrain. Selon des estimations incomplètes, le nombre de mètres carrés inhabitables pour cause de destruction suite à un gonflement du sol serait de 10 millions de mètres carrés, soit une perte économique pour la Chine estimée à environ 1 milliard de dollars par an, d'après B. Shi *et al.* (2002). Dans des pays comme les États-Unis, le Canada, le Mexique, la Jordanie et, dans une moindre mesure, le Maghreb, les sols gonflants sont aussi très répandus. La forte présence des sols gonflants constitue la cause essentielle des dégâts immobiliers, par les processus de retrait/gonflement, entraînant des coûts considérables (2 à 7 milliards de dollars aux États-Unis certaines années).

Retours d'expérience actuels transposables dans le cadre du changement climatique global

Compte tenu de la quasi-certitude, selon le GIEC (Groupement d'experts intergouvernemental sur l'étude du climat), du réchauffement climatique et de ses répercussions sur les phénomènes de sécheresse, il apparaît nécessaire, par mesure de précaution, d'accélérer les mesures de prévention et de protection actuellement en cours, afin de diminuer, à l'avenir, les effets de la sécheresse (Denhez, 2005 ; Durand, 2007 ; *Pour la Science*, 2007 ; *Sciences et Avenirs*, 2007).

D'une façon générale, d'après ce rapport, la concentration de gaz à effet de serre continue d'augmenter dans l'atmosphère, principalement du fait des activités humaines (IPCC-GIEC, 2007). L'impact sur le bilan radiatif de la Terre est important. Le climat change, avec pour la période 1995-2006 : onze des douze années les plus chaudes depuis 1850 et une augmentation de la température moyenne à la surface du globe de 0,76 °C depuis 1860, dont 0,74 °C depuis 1900 et 0,20 °C depuis 1990. D'ici 2100, suivant les différents scénarios possibles quant aux émissions de gaz à effet de serre, selon les prévisions des modèles et hors événement naturel exceptionnel, la température moyenne de l'air à la surface du globe devrait augmenter de 1,1 à 6,4 °C par rapport à 1990. De plus, des changements significatifs pourraient apparaître quant aux caractéristiques de variabilité des climats, s'agissant de la fréquence et de l'intensité de certains événements climatiques extrêmes : précipitations et sécheresse (ONERC, 2003 ; E. Bard, 2006 ; IPCC-GIEC, 2007).

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

Ce rapport signale aussi que le niveau des océans augmente, principalement par dilatation thermique des océans et fonte des glaces des inlandsis et des glaciers de montagne. Du fait de la grande inertie thermique des océans et de la lenteur de la fonte des glaces, cette montée des eaux se réalisera continûment pendant des siècles, même si le réchauffement était aujourd'hui maîtrisé. Le niveau des mers a monté en moyenne de 1,8 mm/an entre 1961 et 2003 et de 3,1 mm/an de 1993 à 2003. L'augmentation totale durant le *XX^e* siècle est estimée à 0,17 m (A. Cazenave, 2006).

Mais d'autres risques naturels peuvent être générés et accentués par les canicules estivales (type 2003) et les fortes précipitations hivernales, et ils ne sont pas encore vraiment pris en compte :

- recul du littoral principalement par submersion des côtes basses, localement par érosion des falaises, crayeuses ou argileuses, du fait de l'élévation accélérée du niveau de la mer. Des îles basses et des atolls sont voués à disparaître. Des régions de deltas seront submergées, les biseaux salés pénétreront plus avant dans l'arrière pays et contamineront les réserves en eaux douces. Les zones littorales basses constituées de marais maritimes se transformeront, les pratiques aquacoles et agricoles devront évoluer ;
- accroissement des incendies de forêt en période estivale et inondations en période hivernale ;
- baisse des nappes phréatiques superficielles et diminution des ressources en eau ;
- dépérissement agricole et forestier, eutrophisation et pollution des eaux ;
- augmentation des glissements de terrain et éboulements en rapport avec les précipitations.

En s'appuyant sur l'expérience de la sécheresse géotechnique, la même démarche générale et des mesures de prévention adaptées à chaque configuration d'aléa devraient être mises en œuvre pour ces autres risques liés au réchauffement du climat, sans attendre par mesure de précaution.

5

Conclusion

L'expérience acquise dans l'analyse de l'aléa sécheresse géotechnique et de ses effets sur les constructions mérite d'être confrontée aux perspectives du changement climatique global. Il faut espérer que, devant les changements à venir, les écosystèmes présenteront la résilience nécessaire pour s'adapter. Les communautés administratives et sociologiques, confrontées à un milieu naturel de plus en plus stressant, devront définir dans l'urgence les bases d'un développement soutenable. La mise en œuvre des politiques de prévention des risques, incluant l'information et la formation des citoyens, doit participer de cette réaction positive.

REMERCIEMENTS

Cette note a été établie en prenant appui sur le retour d'expérience acquis par l'un des auteurs (M. Toulemont) au sein du MEDD qui est remercié. De même l'AQC est remerciée pour les informations transmises.

Bibliographie

- Al-Rawas A.A., Goosen M.F.A. (eds) - *Expansive soils. Recent advances in characterization and treatment*, 2006, 526 p.
- AQC (Agence Qualité Construction) - *Fondations de maisons individuelles. Principales pathologies*. CD-Rom pédagogique à partir d'études de cas concrets. Diaporama retrait gonflement des sols argileux et brochure d'information, 2004.
- Bard E. - *L'Homme face au climat*. Collège de France, Odile Jacob, 2006, 446p., Paris.
- Cazenave A. - Les variations actuelles du niveau de la mer : observations et causes. in Bard E., 2006, p. 85-101.
- Durand F. - *Le réchauffement climatique en débats*. Ellipse, 2007, 188 p.
- FFSA et GEMA. - *Fascicule sécheresse*, 2001, 24 p.
- CEBTP. 1991. Guide pratique : Détermination des solutions adaptées à la réparation des désordres des bâtiments provoqués par la sécheresse. Sous l'égide de AQC, APSAD, AFAC, CCR, FNB - Fascicule 1 : Bases de référence. 48 p., Glossaire. Fascicule 2 : Principes et méthodologie : 8 p., Tableaux guides, Tableaux des solutions élémentaires, Schémas de désordres et de principe de réparation, Glossaire. Fascicule 3 : Annexes techniques, 124 p. Edition SEDITTA, Paris.
- Denhez F. - *Atlas de la menace climatique*. Autrement, coll. « Atlas/Monde », 2005, 80 p.
- DPPR - *Sécheresse et construction. Guide de prévention*. La Documentation Française, 1993, 52 p.
- Duchaufour P. - *Pédologie*, 1 Pédogénèse et classification. Masson, 1977, 478 p.
- Duchaufour P. - *Pédologie. Abrégés*. Masson, 1984, 220 p.
- IPCC-GIEC - *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers*, 2007, 18 p.
- MAIF - La méthodologie de l'expertise « sécheresse », 2000, 19 p. et annexes.
- ONERC (Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique en France et dans les Dom-Tom) - Conséquences du réchauffement climatique sur les risques liés aux événements météorologiques extrêmes. *Actes du Colloque* du 22-23 juin 2003, ONERC, Paris, octobre 2003.
- Philipponnat G. - Retrait/gonflement des argiles, proposition de méthodologie. *Rev. française de géotechnique*, n° 57, 1991, p. 5-22.
- Pour la Science*, Dossier Climat, comment éviter la surchauffe, janvier/mars 2007. 120 p.
- Revue française de géotechnique* n° 57, octobre 1991.
- Revue française de géotechnique* n° 58, janvier 1992.
- Sciences et Avenir*, Le réchauffement climatique, 2007 82 p.
- Shi B., Jiang H., Liu Z., Fang H.Y. - Engineering geological characteristics of expansive soils in China. *Engineering Geology* 67, 2002, p. 63-71.
- Tessier D. - Analyse comparative des politiques de prévention du risque de « sécheresse géotechnique ». Modélisation et visualisation du phénomène. Rapport INRA, 2006, 288 p.
- Toulement M., Cojean R., Faccendini J.-P. - Cartographie prévisionnelle des sols sensibles à la sécheresse : un outil d'information préventive. *Mappemonde* 4, 1994, p. 2-5.
- Vandangeon P. - Exemples de sinistres en région parisienne. *Revue française de géotechnique*, n° 58, 1992, p. 7-14.
- Vincent M. 2003. Retrait/gonflement des sols argileux : méthode cartographique d'évaluation de l'aléa en vue de l'établissement de PPR. 3^e Conférence SIRNAT, Forum des Journées pour la prévention des risques naturels, Orléans. *Actes du Colloque*, 2003, 7 p.

Retour d'expérience en matière d'expertise dans le cadre des dossiers « Sécheresse et réhydratation des sols » relatifs à l'habitat pavillonnaire

C. ROUME

MAIF, Expert régional
220 avenue P. Brossolette
92245 Malakoff Cedex
christian.roume@maif.fr

Résumé

La sécheresse, ses pathologies, ses modes réparateurs, son contexte relationnel : un vaste sujet.

Dans le cadre d'un dossier expertise, les acteurs en présence sont l'assuré, l'assureur, l'expert, le géotechnicien et les entreprises.

L'intervention de l'expert se fait dans un contexte relationnel et technique, souvent particulier, et propre aux dossiers « sécheresse ». L'expert se sert, pour établir ses rapports, de trames définies dans un ouvrage intitulé *Fascicule Sécheresse 2001*, dans lesquelles il doit s'expliquer, entre autres, sur les causes des pathologies rencontrées.

Le contexte particulier vise un assuré :

- dans l'attente, depuis longtemps, de la prise en compte de ses désordres ;
- pas toujours d'accord avec les mesures curatives et préventives demandées (action sur la végétation), ou les solutions de réparation envisagées ;
- dont l'habitation est touchée dans un environnement de voisinage, dans lequel les prises en charge peuvent être différentes d'une maison à l'autre.

L'étendue de la garantie est définie dans le cadre de l'article 2 des arrêtés Sécheresse, qui stipule que les dommages doivent avoir, pour cause déterminante, l'effet de cet agent naturel qu'est la sécheresse.

Afin de déterminer si un dossier relève de la sécheresse, un acteur important est le géotechnicien, et les rôles de ce dernier et de l'expert doivent être bien définis.

Mots-clés : sécheresse, contexte relationnel, l'assuré, le géotechnicien, *Fascicule Sécheresse 2001*, pathologie, arrêté Sécheresse, rôle de l'expert.

Experience feedbacks as regards expertise within the frame of the files "Dryness and rehydration of soils" related to private housing estate

Abstract

Subsidence, its problems, the repair response, the personal context: a vast subject.

The actors involved in an expert evaluation are the insured, the insurer, the loss adjuster, the geotechnical engineer and the contractors.

The loss adjuster contributes in terms of the personal and the technical, often highly specific, and relevant to all Subsidence dossiers.

In producing his reports, the loss adjuster uses the guidelines defined in a work entitled *Fascicule Sécheresse 2001* [2001 Subsidence Booklet] which should explain the causes of the problems encountered.

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 30 avril 2008.

The particular context is designed for an insured:

- who has been waiting for some time for his problems to be dealt with;
- who does not necessarily agree with the curative and preventive measures requested (action on vegetation) or the repair solutions envisaged;
- whose home is affected by the circumstances in the immediate area, and where solutions may differ from one house to another.

The extent of cover is defined in Article 2 of the "Subsidence" orders, which stipulates that the damage must have been caused by subsidence as an effect of nature.

In the determination of whether a problem is subsidence-related, the geotechnical engineer is an important actor, and his role and the loss adjuster's must be clearly defined.

Key words: subsidence, personal context, the insured, the geotechnical engineer, 2001 Subsidence Booklet, problem, Subsidence Order, role of the loss adjuster.

1

La sécheresse, ses pathologies, ses modes réparateurs, son contexte relationnel avec l'assuré : un vaste sujet

Bien que désormais le phénomène soit connu, aucune réglementation constructive n'existe au regard de la sécheresse et de la réhydratation des sols. Tout au plus, des plans de prévention des risques peuvent être prescrits, imposant à certaines communes très vulnérables de nouvelles règles préventives.

C'est donc, dans ce contexte, que l'expert se voit confier sa mission et qu'il doit la mener à bien.

2

Les acteurs en présence

L'appréhension de ce type de dossiers fait appel à un ensemble de protagonistes.

L'assuré sinistré en constitue la « fondation », l'assureur le garant de la « construction » d'un dossier bien appréhendé et, pour ce faire, il fait appel à des « strates successives » que sont l'expert qu'il mandate, le géotechnicien, l'entreprise qui réparera et, éventuellement, le maître d'œuvre en cas de dossier le nécessitant.

Pour les compagnies d'assurances, les dossiers « Sécheresse », lourds de conséquences pécuniaires, nécessitent la mise en place de réseaux d'experts spécialisés pour traiter ce type de dossiers, dont la particularité est qu'ils arrivent par vague et en masse.

Chaque assureur a ensuite la volonté, dès que l'arrêt est paru, de se rendre au plus tôt chez son assuré, afin d'assumer ses obligations envers ce dernier et faire la part des choses entre ce qui relève de la sécheresse et les pathologies qui n'en sont pas la conséquence.

3

Le contexte relationnel de l'intervention de l'expert

L'expert a alors à intervenir dans un climat général souvent particulier, dans le sens où le désordre touche,

bien sûr, un bien, un patrimoine qui, pour l'assuré, correspond à un investissement important, voire l'investissement de sa vie, sa maison.

En plus, dans ce contexte, il a affaire à un assuré, un sociétaire, souvent inquiet, qui craint pour la dévalorisation de son patrimoine et s'interroge sur son indemnisation.

Cet assuré a aussi été destinataire d'informations variées quelquefois, subjectives, et il impute souvent, par méconnaissance des pathologies normales touchant un bâtiment, tous ses désordres à la sécheresse.

Il ne faut pas non plus négliger l'aspect médiatique pressant, qui environne cette typologie de dossiers.

Notons aussi qu'il attend la venue de l'expert depuis longtemps, voire très longtemps, le phénomène étant à la base naturel et les assureurs ne couvrant pas en l'absence d'arrêt.

En effet, par exemple, si l'on se réfère à un dernier arrêté paru le 01/12/06 pour la commune de Versailles, visant la sécheresse de juillet-août-septembre 2003, il verra l'expert en janvier ou février 2007, soit trois ans et demi après qu'il ait constaté les fissures.

Ainsi, pour mener à bien sa mission, l'expert doit développer toute sa science de la communication, pour convaincre du bien-fondé de ses conclusions, appuyées sur ses connaissances en matière de pathologies du bâtiment.

4

Les outils

Le point culminant et critique de la connaissance de cette matière, se situe vers la fin des années 1990 au moment où le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles a connu des difficultés.

Pour unifier les pratiques et pour aider tous les acteurs dans la compréhension et le traitement de ce type de dossiers, les deux familles d'assureurs, que sont le GEMA et la FFSA, la CCR et les pouvoirs publics ont mené, à partir de 1999, une réflexion sur la réforme du régime. Cette réforme a fait l'objet de correctifs financiers, mais s'est accompagnée de la mise en place d'outils, dont notamment la création d'un ouvrage intitulé *Fascicule Sécheresse 2001*, applicable aux arrêtés postérieurs au 15/11/00.

Ce document oblige donc désormais l'expert à dresser un rapport-type structuré et cohérent, dans

lequel il doit s'expliquer sur la pathologie rencontrée et, notamment, c'est souvent le plus difficile, si cette dernière n'est pas la conséquence de la sécheresse.

Ce fascicule facilite désormais grandement la gestion des dossiers, et règle également la relation entre assureurs dans les cas où le sinistre s'étend sur une longue période, et où donc la maison peut se trouver garantie par plusieurs assureurs successifs (situations de cumul d'assurance).

5

Le contexte technique de l'intervention de l'expert

Les bases du travail de l'expert posées, son travail démarre alors, non seulement dans le cadre relationnel ci-avant développé, mais aussi dans un contexte jalonné de contraintes techniques et méthodologiques, quelques fois difficiles à faire admettre aux assurés qui, rappelons-le, attendent depuis longtemps qu'on répare leur maison.

De façon non exhaustive et sans niveau hiérarchique, ni chronologique, ces contraintes et/ou difficultés, lors et après la première expertise, peuvent être déclinées ainsi :

- pour l'assuré, puisqu'un arrêté est paru sur sa commune, les désordres sont forcément liés à la sécheresse...
- puisque les désordres sont apparus pendant la période visée par l'arrêté, ils sont forcément la conséquence de la sécheresse...
- encore du temps à passer et à attendre du fait d'éventuelles mises en observation du bâtiment ;
- une neutralisation de la végétation trop souvent mal acceptée, cette dernière contribuant au charme et à l'esthétique des propriétés ; et, pourtant, toute la profession connaît le rôle prépondérant de cette végétation dans le mécanisme de la déshydratation. Sur ce point, une difficulté supplémentaire existe quand cette végétation appartient au voisin ;
- des mises en œuvre de solutions qui ne se veulent pas maximalistes et/ou totalement sûres (trottoirs périphériques, géomembranes...) ; l'assureur doit alors assumer sa position et l'expert l'expliquer et la faire accepter à l'assuré dans le cadre d'une prise de risque mesurée ;
- un voisin dont la maison a été reprise en sous-œuvre avec des travaux lourds, non justifiés chez la personne visitée ;
- des investigations sur des réseaux de distribution d'eaux pluviales et/ou d'eaux usées, enterrés, accessibles ou non accessibles, qui allongent la durée de vie du dossier, du fait des mises en observation postérieures après avoir traité les désordres y afférant ;
- des configurations particulières, telles que des pavillons sinistrés en bout de bande de plusieurs bâtiments, avec des fondations communes et des pathologies différentes d'un pavillon à l'autre. Comment alors réparer de façon indépendante ? Les solutions existent bien sûr, mais sont complexes à mettre en œuvre ;
- un temps d'élaboration des études de sol (si besoin) souvent long, les entreprises étant surchargées suite aux demandes multiples des experts à réception des vagues de dossiers.

- la difficulté à déterminer quelquefois, pour l'expert et le géotechnicien, le rôle prédominant de la sécheresse dans la survenance du sinistre, en rappelant, à ce niveau de l'exposé, l'article 2, stipulé en préambule des arrêtés, à savoir :

La garantie CATNAT est accordée lorsque les dommages matériels directs, qui résultent de la sécheresse, ont eu pour cause déterminante l'effet de cet agent naturel, et que les mesures habituelles à prendre, pour prévenir ces dommages, n'ont pas pu empêcher leur survenance ou n'ont pu être prises.

De ce paragraphe, je retiens deux points essentiels :

a) Sur le plan légal, rappelons que la loi du 13 juillet 1982, et les diverses modifications intervenues, précisent que seuls sont donc pris en compte les *dommages matériels directs*, c'est-à-dire ceux qui portent atteinte à la structure ou au contenu de la chose assurée.

A ce titre, relèvent des dommages directs :

- les frais d'études géotechniques pour instruire le sinistre, et non ceux exposés en amont pour faire reconnaître la commune en situation de catastrophe naturelle ;
- les travaux de remise en état ;
- les travaux de confortation destinés à éviter l'aggravation immédiate des désordres ;
- les travaux de déblais et de démolition ;
- à la condition que l'expert entérine cette nécessité, les honoraires d'architecte, de bureau d'études et de contrôle technique pour mettre en œuvre et contrôler la réalisation de travaux ;
- l'indemnisation est subordonnée à la réalisation effective des travaux, les dépenses devant être justifiées ;
- le coût de la prime assurance « dommages-ouvrage ».

Par opposition, on peut aussi rappeler ici que relèvent des dommages indirects :

- les pertes de loyers ;
- les pertes d'usage ;
- les frais de déplacement du mobilier ;
- les honoraires d'experts d'assuré ;

qui n'entrent pas dans le champ de la garantie catastrophes naturelles, mais qui peuvent tout à fait être pris en charge par l'assureur au titre d'une autre garantie du contrat.

b) Qu'il faut que la cause déterminante soit l'effet de cet agent naturel qu'est la sécheresse et, de plus, que les mesures habituelles à prendre, pour prévenir les dommages, n'ont pu empêcher leur survenance ou n'ont pu être prises.

Quid alors des évacuations d'eaux pluviales en pied de bâtiment, d'une végétation qu'on a laissé grandir sans se poser de questions à proximité du bâtiment ?

Tous ces éléments de réflexion, qui débouchent vers l'octroi d'une garantie ou d'une fin de non-recevoir, constituent la difficulté de l'expertise.

Ceci exposé, on ne peut, bien sûr, parler de la sécheresse et de la réhydratation des sols, sans évoquer la place du géotechnicien, intimement liée à celle de l'expert et, sur ce point, le fascicule Sécheresse est clair.

Il revient bien à l'expert, bien sûr dans une démarche partenaire avec le géotechnicien, de proposer, s'il l'estime nécessaire, la réalisation d'une étude de sol, en motivant son avis.

L'expert attend des résultats de l'étude une base argumentaire technique et solide sur la prépondérance des phénomènes de sécheresse et de réhydratation dans la concrétisation du sinistre, car n'oublions pas que c'est sur cette base qu'il devra convaincre l'assuré de l'absence de lien avec la sécheresse, si c'est le cas...

Le résultat de l'étude opérée doit être alors soumis à l'appréciation de l'expert, et il lui appartient alors de faire le choix d'un remède et d'en chiffrer le coût.

J'estime important ce rappel, les professionnels, experts comme assureurs, n'étant pas toujours en adéquation sur ce « partage » des métiers.

De la même façon, il existe des comportements différents d'un assureur à l'autre sur des aspects comme :

- la mise en observation des immeubles ;
- l'opportunité d'intervention de maîtres d'œuvre et/ou de bureaux d'étude, intégrés ou non dans les entreprises.

Sur ce plan, à chaque expert donc de répondre à la demande de son mandant.

Pour conclure, on peut indiquer que l'expertise « Sécheresse » requiert de l'expert des compétences,

doublées d'une expérience en mécanique des sols et pathologie du bâtiment, mais également des qualités humaines essentielles, d'observation, de diplomatie et de pédagogie.

Pour toutes les raisons évoquées ci-avant, ces dossiers sont certainement, dans le cadre de l'habitat pavillonnaire, à mettre dans la famille des dossiers les plus délicats à traiter.

Des publications des études, projets de recherches, modélisations et chantiers divers sur le sujet, tels que les résultats évoqués par M^{me} Catherine Jacquard de l'entreprise Fondasol sur l'influence de la végétation en fonction des types d'essence, en complément de l'étude anglaise bien connue des experts, aideraient grandement l'expert de terrain, bien loin de ces modélisations, à convaincre les assurés du bien-fondé de leur argumentaire.

Enfin, rappelés pour finir que les experts travaillent sur un « matériel très concret et pratique » qu'est la maison de Monsieur Tout-le-monde, qui ne l'est justement pas pour l'assuré, le sociétaire à qui le bien appartient, qui considère son habitation comme une chose unique.

Bibliographie

Jacquard C. - *Pathologie des fondations superficielles sur sols argileux. Retour d'expérience en Midi-Pyrénées*. Revue française de géotechnique, à paraître.

FFSA et GEMA - *Fascicule Sécheresse*. Document interne FFSA et GEMA, 2001, 24 p.

Point d'étape en fin 2006 sur l'assurance de la sécheresse géotechnique en France

R. NUSSBAUM

Directeur de la Mission risques naturels (MRN)¹
roland.nussbaum@mrn.gpsa.fr

Résumé

Depuis 1989, une grande partie des dommages causés par la sécheresse géotechnique a été prise en charge, au titre du régime français d'assurance des catastrophes naturelles « Catnat ». Trois pics de sinistralité ont été observés, en 1990, puis en 1996-98, avec un épisode paroxystique attribué à la canicule de 2003, à l'origine de sérieuses préoccupations sur l'équilibre du régime et son évolution, de la part des pouvoirs publics, comme des assureurs. La réforme projetée n'ayant pas été présentée au Parlement, les assureurs s'en tiennent pour l'heure à exprimer des orientations sur le volet sécheresse de ce projet, tant sur le plan de la prévention que des conditions d'assurance.

Mots-clés : sécheresse géotechnique, sinistralité, équilibre économique, régime Catnat, projet de réforme, assureurs, prévention.

Insurance conditions of subsidence due to drought period at the end of the year 2006 in France

Abstract

Since 1989, most of subsidence claims have been taken over within the French "CatNat" insurance regime. Three peaks of loss accumulations have been observed, in 1990, the between 1996 and 1998, with an extraordinary one attributed to the 2003 heat wave, which caused serious preoccupations on the equilibrium of the regime and its evolution, from the side of Public authorities as well as from the insurers' side. As the projected reform has not yet been presented to Parliament, the insurers stick to present their views on the part of this project regarding subsidence coverage, about prevention and on the insurance conditions.

Key words: Subsidence, loss records, economic equilibrium, CatNat insurance regime, project of reform, insurers, prevention.

¹ Mission des sociétés d'assurance pour la connaissance et la prévention des risques naturels, association entre la Fédération française des sociétés d'assurances (FFSA) et le Groupement des entreprises mutuelle d'assurances (GEMA)

Introduction

Un nouveau pic de sinistralité attribuable à des formes de sécheresse géotechnique, suite à la canicule de 2003, est à l'origine de nouvelles préoccupations sur l'équilibre économique du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles¹. Une procédure exceptionnelle a été lancée par le Gouvernement pour accorder une aide de 218 millions d'euros aux propriétaires de maisons les plus gravement endommagées dans les communes n'ayant pas bénéficié d'un arrêté CatNat (3 400 sur 7 000 qui en ont fait la demande). Mais ces moyens ont été jugés largement insuffisants, de sorte que les « oubliés » de la sécheresse 2003 réclament 1,4 milliard d'euros².

Le diagnostic et des recommandations de réforme du régime CatNat ont fait l'objet d'un rapport d'inspection générale interministérielle de décembre 2005, avec un rapport particulier consacré à la sécheresse³.

¹ Une situation analogue s'était déjà produite en 2000, suite aux deux pics de sinistralité de la décennie 90, qui additionnés à la sinistralité inondations de cette décennie et particulièrement de l'année 1999, avait déjà conduit l'Etat à prendre des mesures drastiques pour rétablir l'équilibre économique du régime (mise en jeu de la garantie de l'Etat sur la CCR, relèvement du taux de la surprime de 9 à 12 %).

² *Les Échos*, 15 mars 2007.

³ Inspection générale des finances, Conseil général des ponts et chaussées, Inspection générale de l'environnement, Inspection générale de l'administration : Mission d'enquête sur le régime d'indemnisation des victimes des catastrophes naturelles, septembre 2006.

Néanmoins, la réforme projetée suite à ce rapport n'ayant pas encore eu lieu et dans le contexte tendu et non réglé rappelé ci-dessus pour 2003, on se limitera ici :

- à un bref commentaire de l'évolution de la sinistralité et de son impact sur l'équilibre économique du régime, pour mémoire ;
- aux quelques éléments de position pris d'un commun accord par les assureurs sur les orientations de réforme à ce jour, dans ce domaine spécifique.

Évolution de la sinistralité

Le graphique ci-dessous reproduit les coûts annuels de la sécheresse géotechnique, estimés respectivement par la CCR et la FFSA, depuis sa prise en compte dans le régime, en 1989, jusqu'à l'année 2002, qui a précédé le pic de 2003 (source : rapport cité).

Le coût total pour la période est de l'ordre de 3 milliards d'euros, avec un coût moyen par sinistre de 10,5 k€ et par commune sinistrée de 500 à 600 k€.

L'évolution de la sinistralité en trois cycles et les niveaux de coûts moyens sont tout à fait similaires au Royaume-Uni.

Les périodes de sinistralité élevée se traduisent directement en décroissance de la provision d'égalisation de la Caisse centrale de réassurance (CCR), sorte de baromètre de l'équilibre économique du régime CatNat (cf. graphique ci-dessous, source CCR).

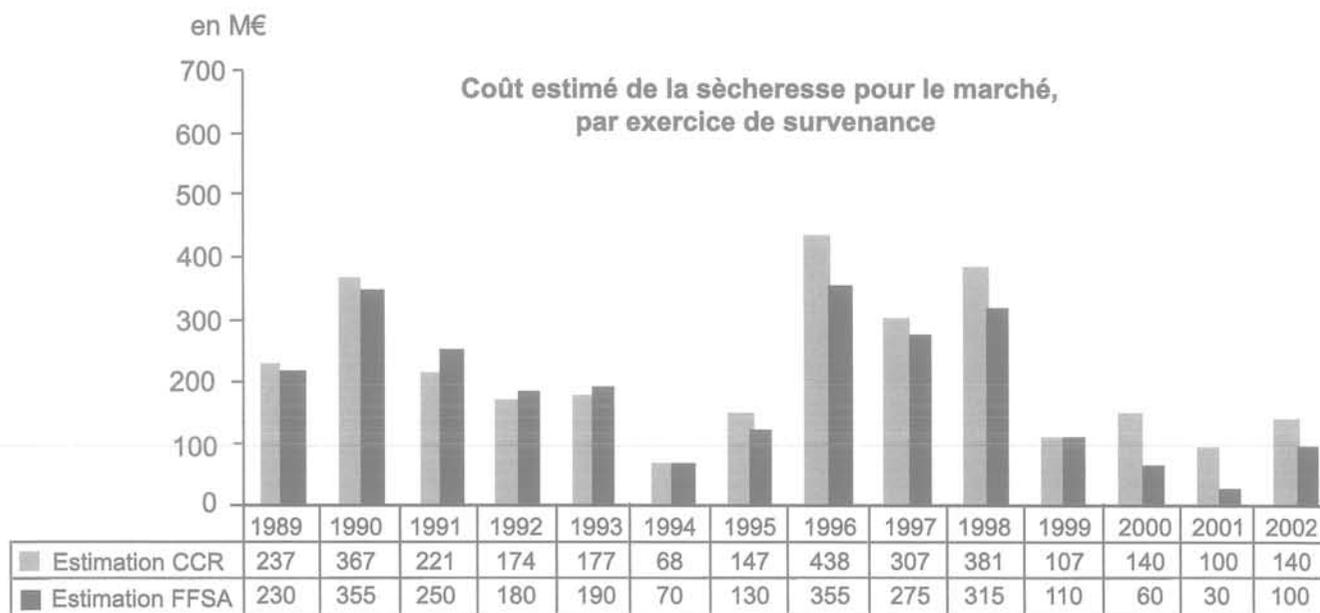


FIG. 1

Évolution de la provision d'égalisation et du chiffre d'affaires de la CCR

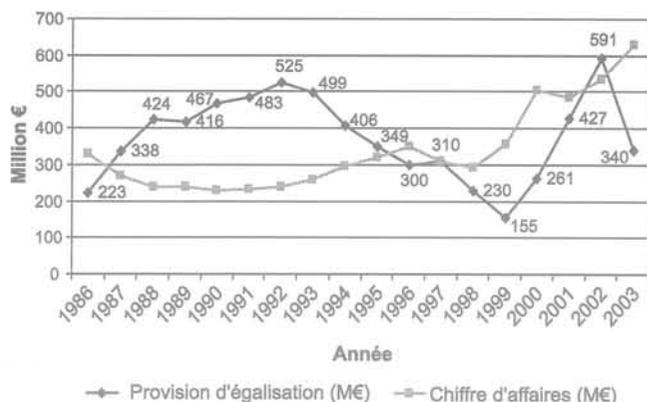


FIG. 2

3

Les assureurs et le projet de réforme

Sur la prévention, les assureurs FFSA et GEMA ont retenu comme particulièrement importants, parmi les orientations proposées par la mission d'inspection générale, les points suivants :

- l'élaboration d'un zonage national et l'obligation réglementaire d'information de l'acquéreur d'un terrain⁴ ;
- une définition caractérisant les dommages couverts en sécheresse comme ceux qui portent atteinte à la solidité de la structure du bâtiment ;

⁴ Cette disposition a pris effet en juin 2006, en application de la loi Bachelot, seulement dans le cas où un PPR a été prescrit ou approuvé.

- la mise en place de mesures de prévention accrues par les pouvoirs publics contre le risque sécheresse et notamment la fixation de règles de construction tenant compte de la nature des sous-sols.

Sur le seul volet sécheresse du projet de réforme de la loi d'indemnisation qui leur a été présenté à ce jour, les assureurs se sont également déclarés favorables aux dispositions suivantes :

- que le bénéfice de la garantie ne soit plus accordé, lorsque les dommages apparaissent plus de deux ans après le début du phénomène ;
- que les ouvrages ne bénéficient plus de la garantie, lorsque les dommages surviennent au cours du délai de prescription décennal, à compter de la date de réception des travaux de construction du bâtiment ;
- que l'indemnisation ne couvre que les réparations nécessaires au confortement de la solidité de la structure de l'ouvrage.

Mais il importe que ces dispositions ne s'appliquent qu'aux bâtiments dont la construction a été entreprise postérieurement à la prise d'effet de la loi et des décrets d'application, puisqu'elles sont corrélées à la mise en place des mesures de prévention renforcées sous forme de règles impératives de construction, tenant compte de la nature des sous-sols.

4

Conclusion

Si de telles orientations devraient permettre de maintenir la sécheresse géotechnique dans le champ du régime CatNat, avec de meilleures garanties de pérennité, il est également important qu'une issue équitable soit trouvée par les parties concernées, pour tous les cas de sinistres avérés, datant de la canicule 2003, et qui seraient encore en suspens.

INSTRUCTIONS AUX AUTEURS

Le projet d'article sera envoyé en deux exemplaires, accompagnés de la version électronique à l'un des rédacteurs en chef de la revue :

Philippe MESTAT
LCPC
55 Boulevard Lefebvre
75732 Paris CEDEX 15

Frédéric PELLET
L3SR - Univ. Joseph Fourier
Domaine universitaire
BP n° 53

Denis FABRE
CNAM
2 rue Conté
75141 Paris CEDEX 3
38041 VGrenoble CEDEX 9

Un projet d'article sera composé sous Word, présenté en double interligne, sur feuilles de format A4 paginées. Un projet d'article (y compris la bibliographie) ne devra pas dépasser une trentaine de pages ; un projet de *note technique*, une dizaine de pages.

La première page comprendra le titre en français et en *anglais*, les noms, prénoms, organismes, adresses des auteurs et les numéros de téléphone, fax et l'adresse électronique de l'auteur correspondant.

Le résumés, ainsi qu'une liste de **mots-clés** (moins de 10) devront être également fournis en français et en anglais, les résumés n'excédant pas *200 mots*.

Les graphiques devront être de bonne qualité, avec des caractères et des chiffres d'assez grande taille pour en permettre une lecture aisée après une éventuelle réduction. Les traits devront être d'une épaisseur suffisante. Les **titres** des figures devront être fournis en français et en anglais.

Les photographies devront avoir été scannées à 300 dpi (format jpg ou tif) et fournies dans des fichiers à part (néanmoins, une sortie papier doit servir de document témoin).*

Les tableaux pourront être intégrés dans le texte, leur titre fourni en français et en *anglais*.

Les équations seront numérotées entre parenthèses après l'équation. On utilisera les unités SI.

Les références bibliographiques citées dans le texte seront du type (Baguelin et Jézéquel, 1978), pour un ou deux auteurs ; (Wastiaux *et al.*, 1999) pour plus de deux auteurs.

La bibliographie, en fin d'article, sera présentée par ordre alphabétique des premiers auteurs :

- pour les ouvrages : titre en italique, le reste en romain ;
- pour les revues et actes de conférences publiés : titre de la revue ou de la conférence en italique, le reste en romain ;
- pour les rapports internes et les thèses : texte tout en romain.
- pour les sites Internet : texte tout en romain

Par exemple :

Baguelin F., Jézéquel J.-F. - *The pressuremeter and foundation engineering*. Series on rock and soil mechanics, vol. 2, n° 4, Trans-tech Publications, 1978.

Wastiaux M., Ducrocq J., Corbetta F. - Les pieux maritimes du pont Vasco da Gama. *Revue française de géotechnique*, n° 87, 1999, p. 27-33.

* Il est rappelé que les figures et photos sont imprimés en noir et blanc : l'usage de la couleur n'est donc pas recommandé.

