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 abattements 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'abattement 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 racelles, 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 Boulc-en-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 même 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 verts 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 verts à smectites de Mormoiron* est constitué essentiellement de smectites aluminos-ferriques accompagnées d'attapulgit, issues probablement du remaniement du Bartonien sous-jacent (*calcaire de Jocas et argiles verts à attapulgit 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 « crêneaux » 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 rassemblent 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 al.*, 1999 ; Brown *et al.*, 2004 ; Vink *et al.*, 1997 ; Armstrong *et al.*, 2000 ; Gottesbüren *et al.*, 2000 ; Garratt *et al.*, 2002 ; Dubus *et al.*, 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 événement 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.

- 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., Aussencac G. - La sécheresse de 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années : analyse écophysiological 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 sulfosulfuron 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., Bärhund 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. (ECR, LMSSMAT), Masroufi F. (ENSG, LAEGO), Oppenheim E. (SOLENEBTP), 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.
- 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.
- Weiler 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 clays 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.