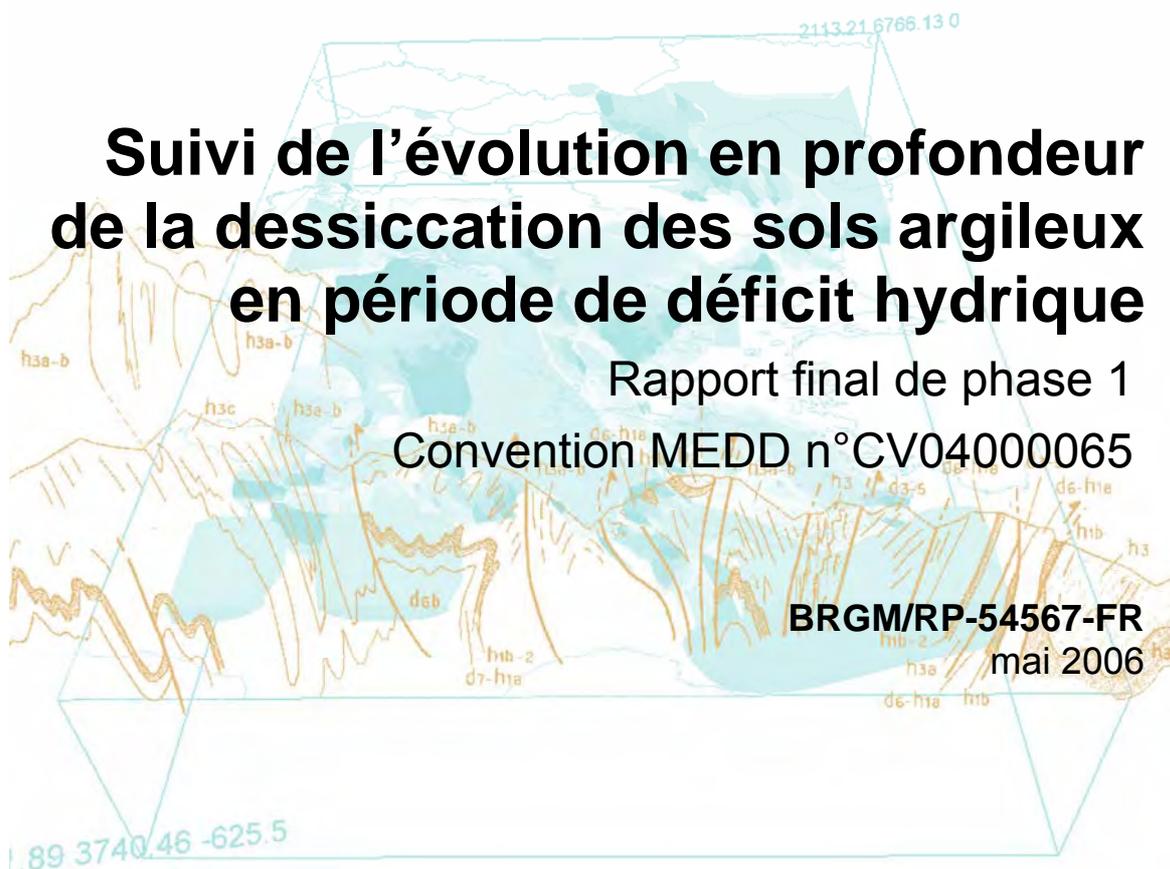




Suivi de l'évolution en profondeur de la dessiccation des sols argileux en période de déficit hydrique

Rapport final de phase 1
Convention MEDD n°CV04000065

BRGM/RP-54567-FR
mai 2006



Suivi de l'évolution en profondeur de la dessiccation des sols argileux en période de déficit hydrique

Rapport final de phase 1
Convention MEDD n°CV04000065

BRGM/RP-54567-FR
mai 2006

Étude réalisée dans le cadre du projet
de service public du BRGM 04RISD04

M. Vincent, J. Bouchut, S. Le Roy, I. Dubus, N. Surdyk

Vérificateur :

Nom : Christian Mathon

Date : 16-08-2006

Signature :

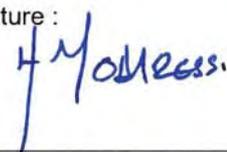


Approbateur :

Nom : Hormoz Modaressi

Date : 28-08-2006

Signature :



Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



Mots clés : risques naturels, mouvements de terrain, retrait-gonflement, argile, sol argileux, sécheresse, dessiccation, Humitub, mesures in situ, instrumentation, Mormoiron, Vaucluse, Mignaloux-Beauvoir, Vienne

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

VINCENT M., BOUCHUT J., LE ROY S., DUBUS I., SURDYK N. (2006) – 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, 189 p., 127 ill.

Synthèse

En France, les sinistres liés au retrait-gonflement des argiles ont pris progressivement, depuis 1989, une part importante et croissante des indemnisations versées au titre des catastrophes naturelles. Parallèlement aux actions de prévention qui sont menées pour tenter de diminuer la sinistralité, et auxquelles participe le BRGM, notamment par l'établissement de cartes d'aléa, les pouvoirs publics s'interrogent désormais sur la manière de mieux caractériser les périodes de conditions climatiques exceptionnelles de nature à provoquer des désordres sur le bâti du fait du retrait-gonflement des argiles. En effet, la sécheresse estivale intense constatée en 2003 et qui a occasionné de nombreux désordres a mis en évidence une inadéquation des critères utilisés jusqu'à présent pour caractériser de manière objective et justifiée ces périodes extrêmes et, par conséquent, un besoin d'investigations complémentaires pour mieux comprendre les mécanismes de déclenchement du phénomène.

Dans ce contexte, le MEDD (Sous-Direction de la Prévention des Risques Majeurs du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable) a demandé à Météo-France, à l'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) et au BRGM d'apporter des éléments de connaissance scientifique en vue d'une meilleure compréhension du mécanisme de dessiccation des sols argileux en période de déficit hydrique, en précisant notamment les délais de réponse du système, l'influence de l'appareil racinaire des arbres en profondeur et les mécanismes cumulatifs inter-annuels. L'objectif principal de cette approche est d'améliorer la connaissance des paramètres de déclenchement des sinistres liés au phénomène de retrait-gonflement des argiles et de préciser le critère météorologique à prendre en compte pour la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle concernant les sécheresses géotechniques.

La part de l'étude confiée spécifiquement au BRGM consiste à déterminer, pour des sols argileux sujets au retrait-gonflement, l'évolution des teneurs en eau dans le sol en fonction de la profondeur et à caractériser cette évolution par rapport aux données météorologiques locales (pluviosité et évapotranspiration). La première phase de ce programme de recherche appliquée est financée à parts égales par le MEDD (convention n° CV04000065, en date du 26 juillet 2004) et par la dotation de service public du BRGM allouée par le Ministère de la Recherche. Elle a été réalisée par le service Aménagement et Risques Naturels du BRGM, avec la collaboration de son service Eau et dans le cadre de ses activités de service public.

Cette première phase avait pour objectif principal, outre un travail préalable de synthèse bibliographique sur la mesure des transferts hydriques dans le sol, d'identifier et caractériser deux sites expérimentaux permettant le suivi, sur plusieurs cycles annuels, de l'évolution des teneurs en eau en profondeur dans des sols argileux gonflants en fonction des paramètres météorologiques, puis de mettre en place le matériel d'instrumentation nécessaire et enfin de procéder à l'enregistrement et aux premières interprétations des données recueillies.

La synthèse bibliographique réalisée dans le cadre de la présente étude a d'abord permis de vérifier que le choix des capteurs capacitifs, du type des Humitubs développés par le BRGM, constituait a priori une solution technique adaptée aux conditions expérimentales envisagées, prévoyant notamment un suivi en continu, à un pas de temps réglable et pour une durée de plusieurs années, des teneurs en eau dans le sol jusqu'à plusieurs mètres de profondeur, avec enregistrement automatisé et télétransmission des mesures.

Elle a aussi permis de passer en revue un grand nombre d'approches expérimentales menées in situ, dans différents pays et dans des contextes variés, pour suivre l'évolution des teneurs en eau et/ou des déplacements du sol sous l'effet des conditions climatiques et de la végétation arborée. Ces différentes observations mettent clairement en évidence le rôle prépondérant des arbres dans la dessiccation des sols, jusqu'à des profondeurs généralement comprises entre 2,5 et 4 m (mais parfois jusqu'à 8 m) alors que la propagation de ce front de dessiccation ne dépasse pas 1 à 1,5 m sous couvert herbacé. Le rayon d'influence des arbres varie beaucoup selon les espèces mais reste généralement inférieur à leur hauteur, bien qu'il puisse atteindre une fois et demi cette hauteur. L'ordre de grandeur des mouvements verticaux de tassement et de gonflement d'un sol argileux, induits par ces variations hydriques saisonnières, est de quelques centimètres en climat tempéré, avec des gonflements pouvant atteindre 10 cm après suppression de grands arbres. Par ailleurs, l'observation montre que la présence d'arbre induit des déficits permanents d'humidité à quelques mètres de profondeur et confirme la réalité de phénomènes cumulatifs de déficits hydriques dans le sol d'une année sur l'autre.

La sélection de deux sites expérimentaux répondant aux critères fixés dans le cahier des charges de l'étude s'est avérée particulièrement ardue. La recherche d'un site en climat méditerranéen a nécessité une phase d'investigations géologiques complémentaires qui a finalement conduit à retenir une parcelle communale à Mormoiron (Vaucluse), laquelle a pu être instrumentée à partir de décembre 2004. Le choix d'un second site en climat océanique à semi-continentale s'est révélé encore plus complexe et a nécessité d'explorer de nombreuses pistes avant de retenir un terrain géré par l'Université de Poitiers, au lieu-dit Le Deffend, sur la commune de Mignaloux-Beauvoir (Vienne), lequel a pu être instrumenté début décembre 2005. Le présent rapport de première phase de l'étude s'appuie donc sur 15 mois d'observations pour le site de Mormoiron et 3 mois pour celui du Deffend.

Chacun de ces sites a fait l'objet d'une caractérisation géologique aussi complète que possible, portant sur la nature lithologique et minéralogique des horizons concernés par l'instrumentation ainsi que sur l'évolution avec la profondeur de l'état hydrique du sol au moment de la mise en place de l'instrumentation. Ce travail a été mené en partie dans le cadre de la présente étude mais devrait aussi bénéficier d'autres projets de recherche appliquée lancés en parallèle sur la même thématique et qui permettront d'affiner la caractérisation des propriétés hydro-mécaniques du matériau.

A Mormoiron, le schéma de l'installation mise en place est conforme à celui initialement prévu avec 2 cannes Humitub contenant chacune 12 capteurs de permittivité espacés de 0,5 à 1 m jusqu'à une profondeur maximale de 7 m, l'une des

cannes étant placée à proximité immédiate d'un orme, l'autre étant située une trentaine de mètres en contrebas, en terrain dégagé. Les premières mesures ayant laissé plané un doute sur la qualité du contact entre les capteurs et le sol, en particulier durant les périodes de sécheresse (du fait du retrait qui affecte l'argile), la configuration mise en place sur le site du Deffend est différente. Chaque canne de mesure y est équipée d'un capteur unique placé à 20 cm de l'extrémité et la mise en œuvre a été particulièrement soignée pour assurer d'une part un bon contact entre le sol et le capteur et, d'autre part, éviter toute infiltration d'eau le long du tube. Au total, 22 capteurs ont été mis en place sur ce second site, toujours jusqu'à une profondeur de 7 m, répartis en 2 grappes, l'une en terrain herbeux dégagé, l'autre en lisière d'une zone boisée.

Les premières mesures enregistrées mettent en évidence deux limites principales à la qualité des données recueillies. La première, notée jusqu'à présent uniquement sur le site de Mormoiron et sur certains capteurs seulement, se traduit par des plages de valeurs très basses interprétées comme étant la signature d'une perte temporaire de contact entre le sol et le capteur lorsque le sol se rétracte à proximité de la canne. La seconde, visible sur les deux sites, correspond à une saturation du signal de sortie qui devient erratique lorsque la teneur en eau du sol dépasse un certain seuil (dont la valeur reste à déterminer par des expériences en laboratoire qui sont en cours).

Malgré ces limites et quelques lacunes dans l'enregistrement du fait de dysfonctionnements temporaires de l'installation, les premières mesures montrent, pour les horizons les plus superficiels, une étroite corrélation des pics d'intensité (donc de teneur en eau) avec la répartition temporelle des précipitations enregistrées sur le site (pluviomètre installé dans la cadre du projet à Mormoiron, géré par l'Université de Poitiers au Deffend), ce qui est un gage de qualité des observations. Il reste à ce stade à confirmer et préciser les courbes de corrélation établies pour chacun des sites entre les intensités de sortie fournies par les capteurs et les teneurs en eau massiques du sol (dans cette attente, les résultats ont été présentés ici sous forme de données brutes). Néanmoins, ces premières observations permettent de mettre en évidence la propagation d'un front de réhumidification sur les deux sites, ainsi que les phases de progression de la dessiccation observées au cours de l'été 2005 à Mormoiron.

L'objectif principal de ces instrumentations in situ est de contribuer à caler un modèle numérique qui permette d'évaluer l'évolution des teneurs en eau et des déformations d'un sol argileux sujet au retrait-gonflement, en fonction des conditions météorologiques et de l'influence de la végétation arborée. Un premier pas dans cette direction a été fait avec l'application du modèle MACRO au site de Mormoiron, qui permet, en fonction des caractéristiques du sol et sur la base des chroniques de précipitations et d'évapotranspiration potentielle communiquées par Météo-France à partir de sa station de Carpentras toute proche, d'estimer l'évolution dans le temps des teneurs en eau le long d'un profil vertical.

Les premières simulations effectuées mettent clairement en évidence une dessiccation en profondeur du sol avec effet cumulatif se prolongeant sur plusieurs années lors des périodes récentes de sécheresse (1989-91 et 1997-99 notamment, à l'origine de nombreux sinistres localement). En revanche, l'année 2003, caractérisée par un été chaud et sec précédé et suivi de périodes relativement humides, ne se distingue pas

particulièrement par la profondeur du front de dessiccation simulé. Il reste cependant à affiner cette approche en intégrant dans les modélisations le rôle de la végétation arborée et en prenant également en compte le gonflement du sol consécutif aux périodes de réhydratation. Par ailleurs, un calage du modèle sur le site du Deffend permettra d'étendre ces observations à une configuration climatique différente.

Cette première étape du projet de recherche a donc atteint ses objectifs même si elle ne permet pas de répondre à toutes les questions qui se posent quant aux mécanismes de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux en période de déficit hydrique. Elle devra maintenant être suivie de phases ultérieures permettant de poursuivre l'acquisition des mesures expérimentales, pendant une durée d'au moins trois ans et surtout de développer un système de modélisation de l'évolution de la teneur en eau des sols argileux en fonction de la pluviosité. Cette modélisation, enrichie des observations effectuées par ailleurs par Météo-France et l'INRA, ainsi que celles acquises au travers d'autres programmes de recherche appliquée, initiés par le BRGM en collaboration avec d'autres partenaires, devra permettre à terme de préciser les paramètres de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement des argiles et d'aider à caractériser une période de sécheresse exceptionnelle susceptible de provoquer des désordres sur le bâti.

Sommaire

1. Introduction	17
2. Synthèse bibliographique	19
2.1. INTRODUCTION	19
2.2. METHODES DE MESURE ET SUIVI DES TENEURS EN EAU DU SOL	19
2.2.1. Mesure par pesée sur échantillon	19
2.2.2. Mesure de la résistivité électrique	20
2.2.3. Mesure par sonde à neutrons.....	22
2.2.4. Mesure par gammamétrie	23
2.2.5. Mesure par sondes TDR	23
2.2.6. Mesure par sondes capacitives	26
2.3. METHODES DE MESURE ET SUIVI DE LA SUCCION	32
2.3.1. Principe général.....	32
2.3.2. Mesure tensiométrique de la succion	32
2.3.3. Méthode du papier filtre	33
2.3.4. Mesure par psychrométrie	33
2.4. EXPERIENCES CONDUITES IN SITU	34
2.4.1. Objectifs et remarques générales.....	34
2.4.2. Expériences en Angleterre	35
2.4.3. Études de cas en Australie.....	44
2.4.4. Expériences menées en Afrique du Sud	49
2.4.5. Expériences menées en Israël	50
2.4.6. Expériences de l'INRA Nancy	51
2.4.7. Expériences MUREX (Météo-France)	57
2.4.8. Synthèse de la bibliographie des expériences de mesures in situ	58
3. Caractéristiques du matériel de mesure	61
3.1. LES CAPTEURS D'HUMIDITE.....	61
3.1.1. Caractéristique des capteurs utilisés.....	61
3.1.2. Système d'acquisition des mesures	62
3.1.3. Test de fonctionnement des capteurs	64
3.1.4. Difficultés de fonctionnement	64
3.1.5. Etalonnage de la canne Humitub	66

3.2. LE PLUVIOMETRE	72
4. Sélection des sites expérimentaux.....	75
4.1. OBJECTIFS ET CRITERES DE SELECTION	75
4.2. DEMARCHE POUR LE CHOIX DES SITES	75
4.3. CHOIX DU SITE EN CLIMAT MEDITERRANEEN.....	77
4.4. CHOIX DU SITE EN CLIMAT OCEANIQUE OU SEMI-CONTINENTAL	79
5. Site expérimental de Mormoiron.....	81
5.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE.....	81
5.2. CARACTERISATION GEOLOGIQUE DU SITE.....	81
5.3. SUSCEPTIBILITE AU RETRAIT-GONFLEMENT DES ARGILES	84
5.4. CARACTERISATION CLIMATIQUE DU SITE	85
5.5. INSTRUMENTATION DU SITE DE MORMOIRON.....	93
5.5.1.Principes généraux de l’installation.....	93
5.5.2.Chronologie de l’installation	93
5.5.3.Dispositif mis en place	96
5.6. OBSERVATIONS LORS DE LA MISE EN PLACE	98
5.6.1.Caractérisation géologique	98
5.6.2.Caractérisation physique du matériau.....	103
5.6.3.Caractéristiques minéralogiques du matériau.....	105
5.6.4.Teneurs en eau initiales	106
6. Site expérimental du Deffend.....	109
6.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE.....	109
6.2. CARACTERISATION GEOLOGIQUE DU SITE.....	110
6.3. SUSCEPTIBILITE AU RETRAIT-GONFLEMENT DES ARGILES	113
6.4. CARACTERISATION CLIMATIQUE DU SITE	115
6.5. INSTRUMENTATION DU SITE DE POITIERS	121
6.5.1.Modifications par rapport au site de Mormoiron.....	121
6.5.2.Chronologie de l’installation	123
6.5.3.Dispositif mis en place	124

6.6. OBSERVATIONS LORS DE LA MISE EN PLACE	126
6.6.1. Programme de reconnaissance.....	126
6.6.2. Caractérisation géologique.....	127
6.6.3. Teneurs en eau initiales	134
6.6.4. Synthèse des données actuelles.....	137
7. Interprétation des premiers résultats	141
7.1. SITE DE MORMOIRON.....	141
7.1.1. Source des données.....	141
7.1.2. Mesures météorologiques	141
7.1.3. Mesures par les cannes Humitub	145
7.2. SITE DE POITIERS	155
7.2.1. Source des données.....	155
7.2.2. Présentation des résultats	156
8. Éléments de modélisation	163
8.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS	163
8.2. MODELISATION ET PARAMETRISATIONS	163
8.2.1. Généralités	163
8.2.2. Choix du modèle.....	164
8.2.3. Données climatiques	165
8.2.4. Caractéristiques du sol	166
8.2.5. Paramètres du couvert végétal.....	168
8.2.6. Automatisation des tâches de modélisation	169
8.3. RESULTATS.....	169
8.3.1. Etude du bilan hydrique.....	169
8.3.2. Variations des teneurs en eau	172
8.4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	177
9. Conclusion	179
10. Bibliographie.....	183

Liste des illustrations

Illustration 1 – Sections de résistivité électrique sous une parcelle de vigne début avril (capacité au champ, 1a) et en septembre (dessiccation sous les rangs de vigne, 1b) (Goulet et al., 2003).....	21
Illustration 2 – Évolution des résistivités (corrigées en température) des couches de sol profondes en fonction de la pluviométrie (Brunet et al., 2003).....	21
Illustration 3 –Appareillage utilisé et schéma de principe d'une sonde à neutrons (Melounou, 1998).....	22
Illustration 4 – Différentes sondes TDR et appareil de mesure (Pereira dos Santos, 1997).....	24
Illustration 5 – Relations expérimentales entre la permittivité relative et la teneur en eau volumique du sol (d'après Gaidi et Alimi-Ichola, 2000).....	25
Illustration 6 – Coefficient a pour deux géométries de sondes capacitives (Pereira dos Santos, 1997).....	26
Illustration 7 –Schéma de principe d'une canne Humitub (Leroi et al., 2000) et mise en place d'une sonde sur le site du Deffend (canne à capteur unique) en 2005.....	28
Illustration 8 – Station de mesure avec canne Humitub installée par le BRGM à Roquevaire : schéma de principe et vue de l'installation (Martin et Meillier, 2002).....	29
Illustration 9 – Teneurs en eau suivies par Humitub sur le site de Menton et corrélation avec la pluviosité.....	30
Illustration 10 – Suivi des températures dans le sol avec la sonde Humitub sur le site de Menton entre juillet 2002 et novembre 2003.....	31
Illustration 11 – Évolution de la succion dans des limons à 25 et 40 cm de profondeur lors de l'épisode pluvieux du 7 au 9 mai 2004 (Mantho, 2005).....	33
Illustration 12 – Caractéristiques des espèces arborées à l'origine des désordres d'après Culter et Richardson (1981).....	36
Illustration 13 – Classification des espèces en fonction du rapport de la distance maximale à la maison endommagée sur la hauteur maximale moyenne de l'arbre pour la totalité des cas (traitement réalisé à partir des données de Culter et Richardson, 1981).....	37
Illustration 14 – Classification des espèces en fonction du rapport de la distance maximale à la maison endommagée sur la hauteur maximale moyenne de l'arbre pour 90 % des cas (traitement réalisé à partir des données de Culter et Richardson, 1981).....	38
Illustration 15 – Classification des espèces en fonction du rapport de la distance maximale à la maison endommagée sur la hauteur maximale moyenne de l'arbre pour 75 % des cas (traitement réalisé à partir des données de Culter et Richardson, 1981).....	38
Illustration 16 – Dessiccation engendrée par un peuplier sur un sol de type boulder clay, au 14 septembre 1982 : (a) réduction de teneur en eau volumique (%), (b) déficit d'humidité (mm) d'après Biddle, 1983.....	41
Illustration 17 – Dessiccation engendrée par un tilleul sur un sol de type boulder clay, au 1 ^{er} septembre 1982 : (a) réduction de teneur en eau volumique (%), (b) déficit d'humidité (mm) d'après Biddle, 1983.....	42

Illustration 18 – A gauche, peuplier sur un sol de type Boulder clay : profils de teneur en eau à proximité de l'arbre (0,2 h) et éloigné de l'arbre (2 h) en automne et au printemps (moyennes sur 4 ans) – A droite, peuplier sur un sol de type Oxford clay : profils de teneur en eau à proximité (0,25 h) et loin (3 h) de l'arbre, en automne et au printemps (Biddle, 1983).....	44
Illustration 19 – Plan de localisation du Musée national d'art (Richards et al., 1983)	45
Illustration 20 – Profils des succions le long de la façade orientale du Musée avant l'abattage des arbres (Richards et al., 1983).....	45
Illustration 21 – Mouvements verticaux en surface au niveau de différents points à l'intérieur et à l'extérieur du musée national d'art (Richards et al., 1983).....	46
Illustration 22 – Profils de succion dans un sol de type red-brown respectivement au voisinage d'un eucalyptus, d'un pin et en l'absence d'arbres (Richards et al., 1983).....	47
Illustration 23 – Pluviométrie mensuelle enregistrée à Adélaïde entre janvier 1980 et septembre 1982 (Richards et al., 1983).....	47
Illustration 24 – Plan d'implantation des arbres (groupe d'eucalyptus) et des points de mesures (d'après Richards et al., 1983).....	48
Illustration 25 – Profils de succion mesurés au voisinage d'un groupe d'eucalyptus (d'après Richards et al., 1983).....	48
Illustration 26 – Mouvements verticaux du sol en fonction du temps pour différents types de recouvrement de surface (d'après De Bruijn, 1973, cité par Williams et Pidgeon, 1983).....	50
Illustration 27 – Profils de teneurs en eau en automne et au printemps (Ravina, 1983).....	50
Illustration 28 – Relation entre évapotranspiration relative et eau extractible relative en période de sécheresse (ronds) puis de réhydratation (croix) (Bréda et al., 1992)	52
Illustration 29 – Carte de localisation des arbres, de la tranchée et des points de mesure (Bréda et al., 1994)	53
Illustration 30 – Caractéristiques pédologiques du sol du site expérimental (Bréda et al., 1994)	53
Illustration 31 – Répartition des racines dans les différents horizons (en fonction de leurs diamètres) et profils de teneurs en eau durant l'année 1992 (Bréda et al., 1994)	54
Illustration 32 – Évolution des précipitation et suivi de la succion dans différents horizons pour la zone témoin et la clairière, durant l'année 1992 (Bréda et al., 1994)	55
Illustration 33 – Classement par ordre décroissant des 10 années de plus forte contrainte hydrique au cours de la période 1950-2003 (Bréda et al., 2004)	57
Illustration 34 – Précipitations mensuelles enregistrées sur le site (Calvet et al., 2004).....	58
Illustration 35 – Profils de teneurs en eau volumiques mesurées (Calvet et al., 2004).....	58
Illustration 36 – Sonde Humitub (photo MINAUS S.A.)	61
Illustration 37 - Paramètres géométriques des capteurs	62
Illustration 38 – Schéma global du dispositif de mesure (site de Mormoiron)	63
Illustration 39 – Évolution de l'intensité en sortie des capteurs suite à un ajout d'eau.....	64
Illustration 40 - Évolution de l'intensité en sortie des capteurs en présence d'une variation d'humidité (mesures en laboratoire).....	66

Illustration 41 – Étalonnage de la canne Humitub dans un bac d'eau distillée	67
Illustration 42 – Tableau des résultats obtenus pour l'étalonnage des capteurs Humitub.....	67
Illustration 43 – Droite d'étalonnage des capteurs Humitub.....	68
Illustration 44 – Moyenne des résultats des essais sur 8 échantillons prélevés à Mormoiron.....	70
Illustration 45 – Relation expérimentale entre teneur en eau volumique et teneur en eau massique pour le matériau de Mormoiron	70
Illustration 46 – Courbe de conversion des intensités de sortie des capteurs Humitub en teneurs en eau massique pour le site de Mormoiron	71
Illustration 47 – Situation du pluviomètre sur le site de Mormoiron.....	72
Illustration 48 – Schéma de principe du pluviomètre installé sur le site de Mormoiron	73
Illustration 49 – Vue du sondage de reconnaissance préalable sur la parcelle BI 262 à Mormoiron et des bancs gréseux rencontrés en forage.....	78
Illustration 50 – Plan de situation de la parcelle expérimentale de Mormoiron (fond topographique extrait des cartes IGN à l'échelle 1/25 000)	81
Illustration 51 – Extrait de la carte géologique éditée par le BRGM à l'échelle 1/50 000 (feuille Carpentras).....	82
Illustration 52 - Carte d'aléa départementale du Vaucluse avec zoom sur la commune de Mormoiron.....	85
Illustration 53 – Précipitations mensuelles moyennes sur Carpentras (données Météo France)	86
Illustration 54 – Cumuls annuels de précipitation enregistrés à Carpentras entre 1964 et 2005 (données Météo-France).....	87
Illustration 55 – Températures journalières moyennes (valeurs moyennes et moyenne des extrêmes) sur la période 1964-2005, à Carpentras (données Météo-France).....	88
Illustration 56 – Moyennes mensuelles sur la période 1964-2005 des évapotranspirations journalières moyennes et maximales à Carpentras (données Météo-France)	89
Illustration 57 – Moyenne mensuelle sur la période 1964-2005 des précipitations et ETP à Carpentras (données Météo France)	90
Illustration 58 – Précipitations efficaces annuelles entre 1964 et 2005 sur Carpentras	91
Illustration 59 – Précipitations et ETP mensuelles des années 2002 à 2005, comparées aux moyennes mensuelles sur la période 1964-2005 (données Météo-France).....	92
Illustration 60 – Schéma de principe de l'instrumentation mise en place sur le site de Mormoiron.....	93
Illustration 61 - Plan de situation du site instrumenté à Mormoiron (extrait carte IGN 1/25 000) et localisation des points de prélèvement (extrait plan cadastral)	95
Illustration 62 – Mise en place et environnement de la canne 1 (proximité arbre).....	96
Illustration 63 – Environnement de la canne 2	97
Illustration 64 - Coupe du sondage carotté réalisé le 2 septembre 2004.....	98

Illustration 65 – Faciès reconnus lors du sondage carotté (sept. 2004) : argile d'altération avec traces de matière organique, prof. 0,20 m (1) ; argile verte légèrement silteuse, prof. 2,50 m (2) ; argile verte avec nodule blanc, prof. 3 m (3) ; argile verdâtre homogène, prof. 4 m (4).....	99
Illustration 66 – Coupe lithologique des sondages à la tarière réalisés le 1 ^{er} décembre 2004 pour la mise en place des cannes de mesure (document Intrasol).....	100
Illustration 67 - Succession des horizons identifiés au niveau de la fosse pédologique	102
Illustration 68 – Ouverture d'une fouille à la pelle sur le site expérimental de Mormoiron en février 2006 (1) : faciès argileux (2) et venue d'eau dans un faciès plus silteux (3) à 2 m de distance et à la même profondeur (1,70 m).....	103
Illustration 69 – Granulométrie sur des échantillons issus du sondage carotté.....	104
Illustration 70 – Calcimétrie sur des échantillons issus du sondage carotté	104
Illustration 71 – Valeurs de Bleu de méthylène sur des échantillons issus du sondage carotté	104
Illustration 72 – Profil hydrique mesuré dans le sondage à la tarière ST1	106
Illustration 73 – Profil hydrique dans le sondage à la tarière 2 de Mormoiron.....	107
Illustration 74 – Plan de situation du site du Deffend (extrait carte IGN 1/25 000).....	109
Illustration 75 - Contexte géologique du site du Deffend et sondages antérieurs disponibles	110
Illustration 76 - Implantation des sondages préliminaires et localisation du site retenu pour l'installation du matériel de mesure	111
Illustration 77 – Environnement du site retenu pour l'installation du matériel expérimental (photo prise lors de la réalisation du sondage ST3, mars 2005)	113
Illustration 78 - Carte d'aléa retrait-gonflement sur le département de la Vienne et la commune de Mignaloux-Beauvoir	114
Illustration 79 - Précipitations mensuelles moyennes sur Poitiers-Biard (données Météo France).....	115
Illustration 80 – Cumuls annuels de précipitations mesurés à Poitiers-Biard sur la période 1949-2005 (données Météo France)	117
Illustration 81 – Températures journalières moyennes (valeurs moyennes et moyenne des extrêmes) sur la période 1949-2005, à Poitiers-Biard (données Météo France).....	118
Illustration 82 – Moyennes mensuelles sur la période 1949-2005 des évapotranspirations potentielles moyennes et maximales à Poitiers-Biard (données Météo-France).....	118
Illustration 83 – Moyenne mensuelle sur la période 1949-2005 des précipitations et ETP à Poitiers-Biard (données Météo-France).....	119
Illustration 84 – Précipitations efficaces annuelles entre 1949 et 2005 sur Poitiers-Biard	120
Illustration 85 – Précipitations et ETP mensuelles des années 2002-2005, comparées aux moyennes mensuelles sur la période 1949-2005 (données Météo-France)	121
Illustration 86 – Disposition des différents éléments mis en place par le BRGM sur le site du Deffend pour l'acquisition des mesures expérimentales.....	124
Illustration 87 – Schéma de principe d'installation des cannes Humitub au Deffend	125

Illustration 88 – Coordonnées et destination des différents sondages réalisés sur le site du Deffend pour la mise en place des capteurs	126
Illustration 89 - Vues de la tranchée d'observation ouverte par hydrASA.....	128
Illustration 90 - Log lithologique du sondage carotté E1 (description synthétique).....	129
Illustration 91 – Fragment de carotte recueilli à la base du sondage E1 en zone de prairie (photo LAEGO).....	130
Illustration 92 – Matériaux prélevés dans le sondage à la carrière T1 (prairie)	131
Illustration 93 – Sable fin de couleur beige rencontré dans T21 sous des argiles rougeâtres.....	131
Illustration 94 - Log lithologique du sondage carotté E2 (description synthétique).....	133
Illustration 95 – Remontée de cuttings au cours de sondages effectués à la carrière en zone boisée	134
Illustration 96 – Profils hydriques mesurés dans la zone de prairie lors de l'installation des capteurs (données LAEGO et HydrASA)	135
Illustration 97 – Profils hydriques mesurés dans la zone boisée lors de l'installation des capteurs (données LAEGO et HydrASA)	136
Illustration 98 – Profils hydriques enregistrés en novembre 2006 comparés aux données antérieures disponibles dans les mêmes secteurs.....	139
Illustration 99 – Comparaison des précipitations journalières enregistrées à Carpentras (station Météo-France) et à Mormoiron (données BRGM).....	142
Illustration 100 – Reconstitution de la chronique journalière des précipitations sur le site de Mormoiron entre le 9/12/2004 et le 28/02/2006 à partir des données mesurées complétées par les données Météo-France de Carpentras pour les périodes de lacunes.....	144
Illustration 101 – Reconstitution des cumuls mensuels de précipitations sur le site de Mormoiron entre le 9/12/2004 et le 28/02/2006 à partir des données mesurées complétées par les données Météo-France de Carpentras pour les périodes de lacunes.....	144
Illustration 102 – Intensité mesurée par le capteur Humitub à 1,5 m de profondeur sur la canne 2 et pluviométrie – site de Mormoiron (du 9/12/04 au 28/02/06).....	146
Illustration 103 – Intensité mesurée par le capteur Humitub à 0,5 m de profondeur sur la canne 2 et pluviométrie – site de Mormoiron (du 9/12/04 au 28/02/06).....	147
Illustration 104 - Intensité mesurée par le capteur Humitub à 0,5 m de profondeur sur la canne 1 et pluviométrie – site de Mormoiron (période du 01/06/2005 au 31/10/2005).....	148
Illustration 105 - Intensités en sortie des capteurs Humitub de la canne 1 à 0,5 m, 1 m, 1,5 m, 5 m et 7 m de profondeur et pluviométrie – site de Mormoiron (du 09/12/2004 au 23/04/2005).....	149
Illustration 106 - Intensité mesurée par le capteur Humitub de la canne 2 à 2 m de profondeur et pluviométrie – site de Mormoiron (période du 09/12/2004 au 28/02/2005)	150
Illustration 107 - Intensités de sortie des capteurs Humitub de la canne 2 aux profondeurs de 0,5 m, 1 m, 1,5 m, 2 m, 2,5 m, 3 m, 3,5 m et 4 m et pluviométrie – site de Mormoiron (du 01/09/2004 au 28/02/2005) – périodes de saturations ramenées à 20 mA.....	152

Illustration 108 - Températures enregistrées sur la canne 2 à 0,5 m, 2,5 m, 4 m de profondeur entre le 09/12/2004 et le 16/02/2006 et pluviométrie journalière – site de Mormoiron	154
Illustration 109 - Pluviométrie et humidité à 0,5 m de profondeur en prairie - site du Deffend.....	157
Illustration 110 - Pluviométrie et humidité à 1 m de profondeur en prairie - site du Deffend.....	158
Illustration 111 - Pluviométrie et humidité à 0,5 et 1 m de profondeur en prairie - site du Deffend.....	159
Illustration 112 - Pluviométrie et humidité à 1,5 de profondeur en prairie - site du Deffend.....	160
Illustration 113 - Pluviométrie et humidité à 1,5 de profondeur en prairie - site du Deffend.....	161
Illustration 114 - Pluviométrie et humidité à 2,5, 3,5, 4 et 5 m de profondeur en forêt - site du Deffend	162
Illustration 115 - Précipitations mensuelles et annuelles sur Carpentras entre 1964 et 2005	165
Illustration 116 – Résultats des analyses granulométriques et des mesures de teneur en eau sur des échantillons prélevés dans la fosse pédologique.	166
Illustration 117 - Courbes de rétention des trois horizons réalisées avec les paramètres de la courbe de Van Genuchten obtenus grâce au programme Rosetta.	167
Illustration 118 - La courbe de rétention et la courbe de conductivité hydraulique montrent les interactions entre les différentes variables du modèle.....	167
Illustration 119 - Découpage du profil pédologique en couches numériques.....	168
Illustration 120 - Précipitations, évapotranspiration potentielle et évapotranspiration réelle (simulée pour une pelouse) à Mormoiron entre 1988 et 2005 (au pas de temps mensuel).....	170
Illustration 121 - Part de l'évaporation et de la transpiration dans l'évaporation réelle face aux précipitations sur le site de Mormoiron de 1988 à 2005 (données moyennées)	170
Illustration 122 - Comparaison des précipitations et des évapotranspirations réelles annuelles sur le site de Mormoiron entre 1995 et 2005.....	171
Illustration 123 - Recharge à 4,15m simulée par MACRO.....	172
Illustration 124 - Évolution du taux d'humidité dans les quatre horizons simulés à l'aide de MACRO entre 1988 et 2005	173
Illustration 125 - Visualisation graphique des teneurs en eau du sol de Mormoiron simulées par MACRO entre le 01/01/64 et le 31/12/2005, en regard de la pluviosité mesurée à Carpentras	174
Illustration 126 - Visualisation graphique des précipitations et des teneurs en eau (simulées) du sol de Mormoiron entre le 01/01/88 et le 31/12/2005.....	175
Illustration 127 - Visualisation graphique des précipitations et des teneurs en eau (simulées) du sol de Mormoiron entre le 01/07/2002 et le 01/07/2004. Les flèches noires indiquent une forte influence des phénomènes d'écoulements préférentiels sur les transferts d'eau dans le sol.....	176

1. Introduction

Depuis 1989, les sinistres liés au retrait-gonflement des argiles sont indemnisés dans le cadre de la loi sur les catastrophes naturelles. Le coût lié à ces indemnisations était estimé en 2002 à 3,3 milliards d'euros par la Caisse Centrale de Réassurance, ce qui en fait le deuxième poste après les inondations. Dans le but de préciser le critère de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle pour ce phénomène et éviter ainsi certaines dérives constatées, le Ministère de l'Écologie et du Développement Durable (MEDD) a demandé à Météo-France de définir un critère unique basé sur l'analyse du déficit hydrique calculé à partir de son réseau de stations météorologiques. La mise en application de ce critère, en décembre 2000, a permis de rejeter un certain nombre de demandes injustifiées de reconnaissances de l'état de catastrophes naturelles sécheresse. Il est cependant apparu à l'usage que ce critère prenait en compte une tranche de sol probablement trop superficielle, ce qui n'intègre pas suffisamment le rôle du système racinaire et rend mal compte des possibilités de sécheresses cumulatives, notamment en climat méditerranéen. Par ailleurs, la sécheresse estivale intense constatée en 2003 et qui a occasionné de nombreux sinistres par retrait des argiles ne peut être prise en compte du fait de ce critère qui accorde un poids excessif à l'existence d'un déficit hydrique en période hivernale de recharge des nappes. Il apparaît donc un besoin d'investigations complémentaires pour aider à une meilleure compréhension des phénomènes physiques qui participent au déclenchement des sinistres retrait-gonflement et apporter ainsi des éléments objectifs de nature à aider à la redéfinition du critère de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle pour la sécheresse géotechnique.

Dans ce contexte, le MEDD (Sous-Direction de la Prévention des Risques Majeurs du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable) a demandé à Météo-France, à l'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) et au BRGM d'apporter des éléments de connaissance scientifique en vue d'une meilleure compréhension du mécanisme de dessiccation des sols argileux en période de déficit hydrique, en précisant notamment les délais de réponse du système, l'influence de l'appareil racinaire des arbres en profondeur et les mécanismes cumulatifs inter-annuels. L'objectif principal de cette approche est d'améliorer la connaissance des paramètres de déclenchement des sinistres liés au phénomène de retrait-gonflement des argiles et de préciser le critère météorologique à prendre en compte pour la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle concernant les sécheresses géotechniques.

La part de l'étude confiée spécifiquement au BRGM, dans le cadre de la convention n° CV04000065 en date du 26 juillet 2004, consiste à déterminer, pour des sols argileux sujets au retrait-gonflement, l'évolution des teneurs en eau in-situ en fonction de la profondeur et à caractériser cette évolution par rapport aux données météorologiques locales (pluviosité et évapotranspiration). Pour cela, il est prévu une revue bibliographique en vue de synthétiser l'état actuel des connaissances en la matière, puis la mise en œuvre d'un programme d'instrumentation sur deux sites distincts, l'un en climat méditerranéen, l'autre en climat océanique ou semi-continentale.

Le cahier des charges de l'étude prévoit de choisir chaque site en fonction de critères liés à la géologie locale et à des conditions pratiques de mise en œuvre et de pérennité, chacun d'eux devant être équipé de capteurs permettant une mesure en continu de l'humidité des sols à intervalles réguliers jusqu'à 7 m de profondeur. Sur chaque site, l'un de ces forages doit être placé à proximité d'un arbre disposant d'un système racinaire bien développé, afin d'intégrer l'influence de ce dernier.

La première phase de ce programme de recherche appliquée, prévue initialement pour durer seize mois et qui fait l'objet du présent rapport de restitution, comprend, outre un travail préalable de synthèse bibliographique sur la mesure des transferts hydriques dans les sols argileux gonflants, le choix et la caractérisation des sites expérimentaux, la mise en place du matériel d'instrumentation et l'enregistrement ainsi que les premières interprétations des données recueillies.

Cette étape sera suivie de phases ultérieures permettant de poursuivre l'acquisition des mesures expérimentales, pendant une durée d'au moins trois ans et surtout de développer un système de modélisation de l'évolution de la teneur en eau des sols argileux en fonction de la pluviosité, afin de mieux comprendre le déclenchement des phénomènes de retrait-gonflement en période de déficit hydrique. Cette modélisation, enrichie des observations effectuées par ailleurs par Météo-France et l'INRA, devra permettre de préciser les paramètres de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement des argiles et pourra servir de base à une redéfinition du critère de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle pour les sécheresses géotechniques.

La première phase de ce programme est financée à parts égales par la Sous-Direction de la Prévention des Risques Majeurs du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable et par la dotation de service public du BRGM allouée par le Ministère de la Recherche. Elle a été réalisée par le service Aménagement et Risques Naturels du BRGM avec la collaboration de son service Eau et dans le cadre de ses activités de service public.

2. Synthèse bibliographique

2.1. INTRODUCTION

Le contenu du travail bibliographique préliminaire à ce programme de recherche appliquée ne concerne pas le phénomène de retrait-gonflement des sols argileux en lui-même car celui-ci a déjà fait l'objet d'une synthèse très approfondie confiée par le MEDD à l'INRA (Tessier et al., 2006), qui porte à la fois sur les mécanismes du retrait-gonflement et les paramètres influant sur la susceptibilité des sols vis-à-vis de cet aléa, sur les manifestations de ce phénomène et les différents moyens de le prévenir mis en œuvre dans d'autres pays, et enfin sur l'influence de la végétation arborée dans le déclenchement du retrait-gonflement.

La présente synthèse ne portera donc que sur deux points très précis touchant à cette problématique et pour lesquels un état des connaissances est nécessaire avant de mettre en œuvre un système d'instrumentation sur les sites expérimentaux, comme prévu dans le programme. Le premier point touche aux méthodes et outils permettant la mesure in situ et le suivi en continu des teneurs en eau dans le sol. Le second concerne les expérimentations et observations in situ déjà menées dans des conditions comparables à celles projetées dans le présent programme, avec suivi des teneurs en eau ou des déplacements et évaluation de l'influence de la végétation sur la dessiccation des sols en profondeur. Cette revue préliminaire est en effet nécessaire pour faire le point sur les connaissances déjà acquises en la matière et évaluer les difficultés éventuelles à prendre en compte pour la conception et la mise en œuvre des instrumentations.

2.2. METHODES DE MESURE ET SUIVI DES TENEURS EN EAU DU SOL

2.2.1. Mesure par pesée sur échantillon

Cette méthode qui est la plus classiquement utilisée, notamment en géotechnique, est une méthode destructive qui consiste à prélever des échantillons et à en mesurer la teneur en eau au laboratoire. En agronomie, le prélèvement se fait généralement dans une fosse par enfoncement d'un cylindre métallique dans les parois de la fosse. En géotechnique, on peut procéder de même après réalisation d'une fouille à la pelle mécanique ou, plus généralement, on procède à un forage vertical par carottage ou à la tarière, ce qui permet de prélever des échantillons à intervalles réguliers et de tracer ainsi un profil de teneurs en eau (« profil hydrique »).

La qualité du prélèvement des échantillons est déterminante. Le carottage à l'eau ou au moyen d'un fluide de perforation induit une modification artificielle de la teneur en eau dans la partie périphérique de l'échantillon. Un prélèvement par battage ou enfoncement d'un tube rigide provoque généralement un tassement du matériau. A ces réserves près, ces deux types de prélèvements sont néanmoins réputés permettre l'obtention d'échantillons dits « intacts ». Conservés dans une enveloppe rigide et étanche à l'air (avec tubage métallique ou PVC puis ensachage sous film plastique ou

de préférence sous revêtement de paraffine) et à condition d'être transférés rapidement au laboratoire, stockés en chambre humide puis extraits soigneusement, ces types de prélèvement permettent d'accéder à la teneur en eau volumique du matériau, noté U_v et égale au rapport entre le volume d'eau et le volume total de l'échantillon (ce qui suppose la détermination de ce dernier, généralement par pycnométrie ou par pesée hydrostatique).

Habituellement, les géotechniciens utilisent néanmoins plutôt la teneur en eau massique noté U_m et égale au rapport entre la masse d'eau contenue dans le sol et la masse de matière solide (exprimée en pourcentage). Pour cela, des échantillons remaniés, prélevés sous forme de mottes ou à la tarière, sont suffisants. La masse de la fraction solide de l'échantillon est déterminée par pesée après dessiccation à l'étuve à 105 °C (ou 50 °C en présence de matière organique sensible à la chaleur) jusqu'à obtenir un poids constant, et comparée au poids initial du matériau.

Cette méthode, qui est normalisée (NF P 94-050 : AFNOR, 1995) donne des résultats relativement précis, à condition que la dessiccation soit effectivement complète et qu'il n'y ait pas eu de perte par évaporation lors du prélèvement et du transport. Mais elle ne permet pas un suivi en continu des teneurs en eau car elle obligerait à des prélèvements à intervalles réguliers qui ne pourraient se faire toujours au même emplacement puisque l'échantillon est détruit lors de la mesure. C'est cependant une méthode indispensable pour le calage des autres techniques qui ont été développées.

2.2.2. Mesure de la résistivité électrique

Cette méthode géophysique très couramment utilisée pour des investigations portant sur la nature du sous-sol permet une évaluation indirecte de la teneur en eau du sol, sachant que la résistance électrique d'un sol dépend non seulement de sa teneur en eau mais aussi de sa nature lithologique, de sa texture et de la concentration en sels solubles. Des adaptations ont été élaborées en vue de l'utilisation de cette méthode pour le suivi des teneurs en eau dans le sol car il s'agit d'une technique non destructive qui présente par ailleurs l'avantage d'être de mise en œuvre relativement simple et peu coûteuse. Par exemple, les « blocs de Bouyoucos », constitués d'une paire d'électrodes enrobées dans un bloc de plâtre poreux dont l'humidité s'équilibre avec celle du sol, constituent une approche intéressante, mais dont la précision et la durabilité sont limitées.

Cette technique de mesure des résistivités électriques en vue du suivi des teneurs en eau dans le sol a été appliquée notamment pour évaluer la dessiccation du sol en fonction du développement de certaines cultures. La technique de mesure utilisée est généralement celle du panneau électrique en 2 dimensions avec système multiélectrodes en configuration dipôle-dipôle (Michot et al., 2002 ; Goulet et al., 2003). Ce dispositif permet effectivement le suivi des teneurs en eau au moins jusqu'à des profondeurs d'investigation de l'ordre de 1 m à 1,50 m, tant en phase de déshydratation que lors de la réhumidification, et permet de suivre les variations spatiales le long d'un profil en deux dimensions (Illustration 1). Le dispositif s'avère cependant très sensible aux variations de texture du sol ce qui le rend a priori peu adapté pour le cas des sols argileux sujets au phénomène de retrait-gonflement.

Par ailleurs, il demande des interventions régulières sur site pour l'acquisition des mesures, ce qui constitue un handicap pour un suivi en continu sur une longue

période, même si des expériences en ce sens ont déjà été effectuées. Ainsi, Brunet et al. (2003) ont suivi pendant un an un système de sondages électriques verticaux constitué de 21 électrodes équidistantes de 0,5 m avec des mesures après chaque épisode climatique significatif à raison de 18 séries de mesures au cours de l’année. Les résultats obtenus (Illustration 2) montrent cependant que la corrélation entre les résistivités mesurées (qui diminuent lorsque la teneur en eau du sol augmente) et l’humidité effective du sol ne sont pas flagrantes, même après correction des valeurs de résistivité en fonction de la température.

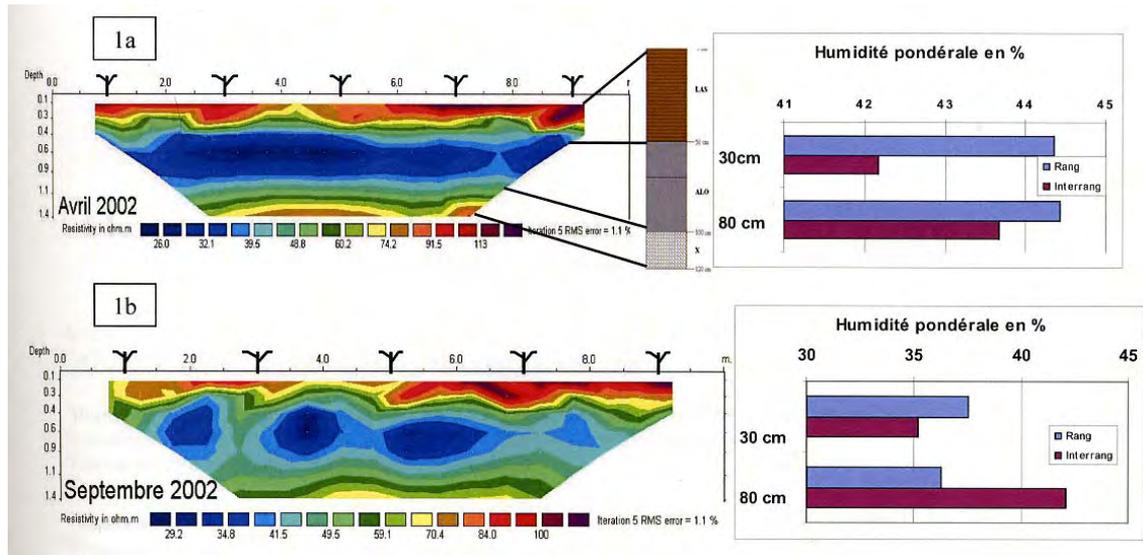


Illustration 1 – Sections de résistivité électrique sous une parcelle de vigne début avril (capacité au champ, 1a) et en septembre (dessiccation sous les rangs de vigne, 1b) (Goulet et al., 2003)

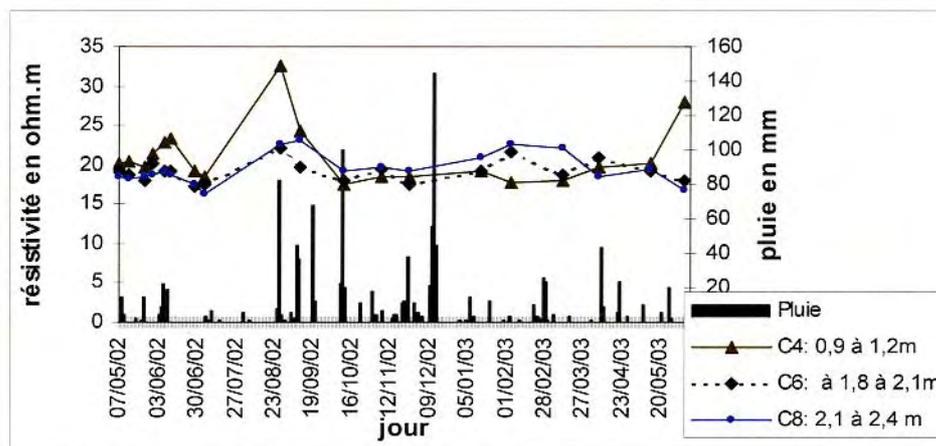


Illustration 2 – Évolution des résistivités (corrignées en température) des couches de sol profondes en fonction de la pluviométrie (Brunet et al., 2003)

Différentes expériences ont été menées pour exploiter en parallèle d’autres techniques géophysiques plus élaborées dont la Résistance Magnétique Protonique (RMP) qui

2.2.4. Mesure par gammamétrie

Comme dans le cas de la mesure neutronique, la mesure par atténuation de rayons gamma repose sur l'utilisation d'une sonde émettrice (constituée habituellement de césium radioactif) et d'un détecteur (généralement un compteur de scintillation formé d'un cristal d'iodure de sodium). L'absorption partielle des rayons gamma dépend à la fois de la nature de la source, de la densité du matériau traversé et de la géométrie du système (angle d'ouverture de la source, distance, taille du détecteur). Lorsque la densité du sol traversé entre la source et le détecteur est constante, le taux d'absorption ne dépend plus que de la teneur en eau. Cette méthode, également indirecte et non destructive, permet une résolution verticale plus fine que la sonde à neutrons et est surtout utilisée en laboratoire pour des mesures précises de profils hydriques lorsque tous les paramètres peuvent être contrôlés (Rolland et al., 2000).

Cette technique est en pratique surtout utilisée avec des sondes dans lesquelles la source et le détecteur sont solidaires : dans ce cas, la mesure porte sur le taux de diffusion du rayonnement et est plutôt destinée à déterminer la densité moyenne du sol investigué (gammadensimètre). Le LRPC de Rouen a ainsi développé dans les années 1970 un système de diagraphie, désormais géré par le Laboratoire de l'Ouest Parisien (LROP), et constitué d'une sonde gamma-gamma et d'une sonde neutron-neutron (Ferber et Delfaut, 2000). La sonde neutron-neutron est munie de deux détecteurs situés respectivement à 0 et 40 cm d'une source de neutrons rapides et permet, après étalonnage, d'obtenir le profil de teneur en eau volumique du sol. Quant à la sonde gamma-gamma, elle comporte deux détecteurs de rayons gamma, situés respectivement à 20 et 40 cm de la source radioactive (placée en tête de sonde). Par une série de comptages effectués tous les 10 cm, cette sonde permet d'obtenir, après étalonnage, un profil vertical de masse volumique du terrain, le rayon d'investigation étant de l'ordre de 15 à 20 cm. L'association des deux détecteurs a pour but de s'affranchir de l'influence des variations éventuelles de diamètre du forage.

2.2.5. Mesure par sondes TDR

L'introduction de la technique TDR (« time domain reflectometry » ou réflectométrie en domaine temporel), dans les années 1980, permet une mesure indirecte et non destructive de l'humidité et de la conductivité électrique des sols, après avoir été initialement développée pour tester des câbles électriques. La technique consiste à émettre une impulsion électromagnétique le long de 2 guides d'ondes (parfois 3) de longueur connue, enfoncés dans le sol, et à mesurer d'une part l'amplitude des réflexions et d'autre part l'intervalle de temps entre la date d'émission et celle du signal de retour. La vitesse de propagation dépend des caractéristiques physiques du milieu traversé et notamment de sa permittivité diélectrique.

Les électrodes de la sonde sont en acier inoxydable, identiques et parallèles (diamètre externe de l'ordre de 3 à 4 mm, espacement de 3 à 5 cm) et leur longueur choisie en fonction de l'épaisseur de sol à explorer (Illustration 4). Un générateur d'impulsions émet un courant alternatif à une fréquence de l'ordre de 1 GHz (domaine des hyperfréquences) par l'intermédiaire d'un câble coaxial auquel est relié un échantillonneur qui est composé d'un voltmètre et d'un chronomètre de haute

précision. Les mesures peuvent être prises par multiplexage, à des pas de temps réguliers, et automatisées.

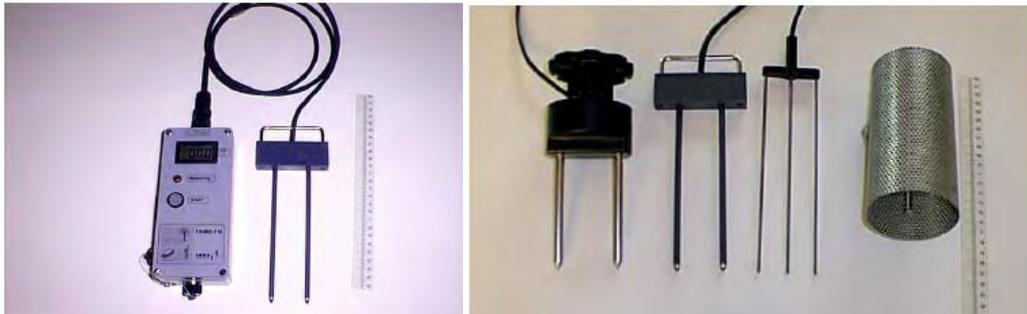


Illustration 4 – Différentes sondes TDR et appareil de mesure (Pereira dos Santos, 1997)

La vitesse de propagation de l'impulsion électrique délivrée par le générateur dépend du milieu diélectrique dans lequel elle se propage. Par rapport au vide où l'onde se propage à la vitesse de la lumière ($c = 3 \times 10^8$ m/s), les pertes électriques et le phénomène de relaxation (lié à l'énergie absorbée par les molécules polaires d'eau sous l'effet du champ électrique alternatif) provoquent un ralentissement de la vitesse de propagation de l'onde selon la relation : $v = c / \sqrt{k}$, k étant la permittivité ou constante diélectrique apparente du milieu. En pratique, on calcule la vitesse v en mesurant le temps de propagation Δt entre le début et la fin de la sonde de longueur L placée dans le sol.

La permittivité de l'air est égale à 1 (sous 1 atm et à 20°C) et celle de la plupart des particules solides est de l'ordre de 2 à 12 tandis que celle de l'eau est de 80 (à 20°C), ce qui signifie qu'une faible modification de la teneur en eau du sol se traduira par une évolution significative de la permittivité globale du milieu (Zakri, 1997). La conversion des permittivités en teneurs en eau se fait par étalonnage ou par inversion du signal temporel enregistré (Pereira Dos Santos, 1997). On peut aussi pour cela utiliser des formules de conversion dont la plus courante est celle développée par Topp et al. (1980) et qui montre que pour plusieurs types de sols il existe une relation empirique stable entre la teneur en eau volumique du sol \mathcal{U}_v et sa constante diélectrique k , de la forme :

$$\mathcal{U}_v = -0,053 + 0,029 k - 5,5 \times 10^{-4} k^2 + 4,3 \times 10^{-6} k^3$$

Cette formule est a priori indépendante de la température, au moins pour une gamme de température comprise entre 10 et 36°C.

Des mesures réalisées sur différents types de sol dont certains riches en argile (Gaidi et Alimi-Ichola, 2000) ont permis de vérifier que la relation entre teneur en eau volumique et constante diélectrique du matériau était bien indépendante de la nature du matériau alors que l'utilisation de l'impédance (qui est également accessible à l'aide de la sonde TDR) demande un étalonnage spécifique des sondes en fonction de la nature du sol et de celle du fluide interstitiel. Ces auteurs ont analysé différentes relations rencontrées en bibliographie et ont proposé une nouvelle relation empirique,

proche de celle de Topp et al. mais plus en accord avec les observations expérimentales. Cette relation est la suivante :

$$\mathcal{U}_v = 0,0548 + 0,0153 k - 5 \times 10^{-5} k^2 + 8 \times 10^{-8} k^3$$

Elle s'applique également à des matériaux de type bentonite, très sensibles au phénomène de retrait-gonflement, y compris à des teneurs en eau élevées.

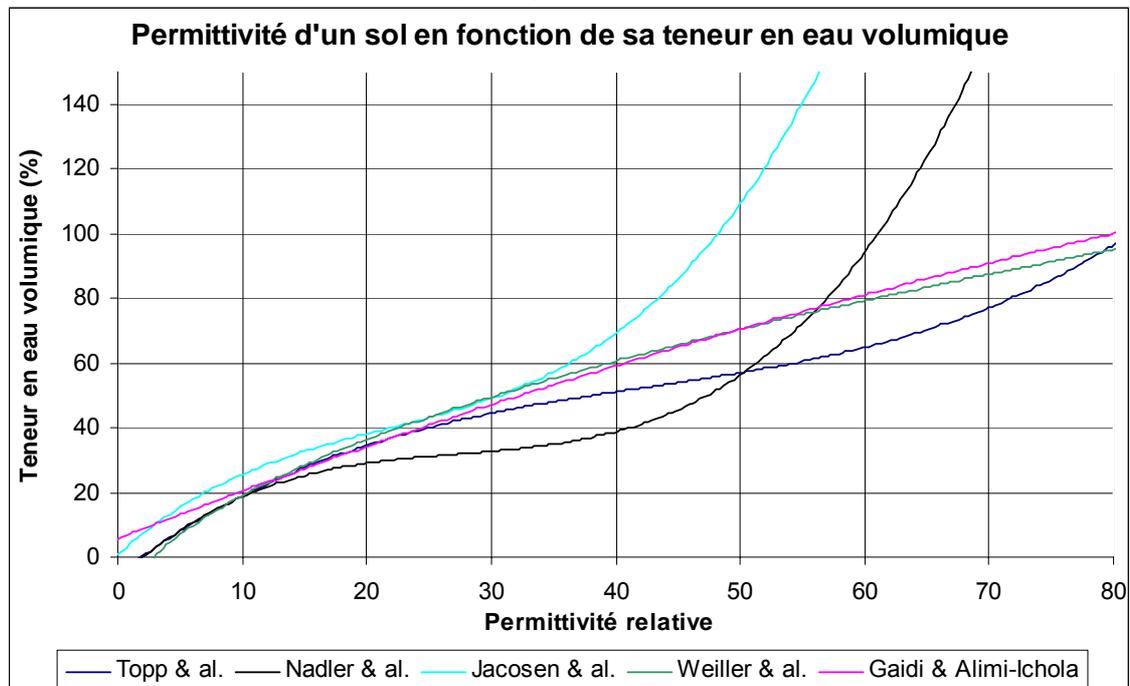


Illustration 5 – Relations expérimentales entre la permittivité relative et la teneur en eau volumique du sol (d'après Gaidi et Alimi-Ichola, 2000)

Ces observations confirment que la formule de Topp, utilisée classiquement, est effectivement bien adaptée et en accord avec les mesures expérimentales, au moins pour des teneurs en eau inférieures à 40 %. Au-delà, la formule proposée par les auteurs (qui paraît cependant peu convaincante pour des teneurs en eau faibles, inférieures à 20 %), ainsi que celle proposée par Weiller et al. (1998), sont manifestement plus en adéquation avec la réalité. Cette dernière formule, de la forme $k = (7,62 \mathcal{U}_v + 1,71)^2$, semble être la relation la plus proche des valeurs expérimentales sur l'ensemble de la gamme utile des teneurs en eau.

De manière générale, l'utilisation des sondes TDR pour l'évaluation des teneurs en eau d'un sol in situ présente moins de difficultés pratiques que celle des sondes à neutrons et semble conduire à une bonne précision des mesures, indépendante de la salinité et de la texture du sol, du moins jusqu'à un certain niveau de salinité du fluide interstitiel. La précision est cependant limitée pour de faibles teneurs en eau (en deçà de 6 à 7 %) et pour des milieux stratifiés. Il est possible de procéder à une acquisition automatisée des mesures à un pas de temps réglable, ce qui autorise l'utilisation de cette technique pour un suivi des teneurs en eau en continu, mais qui semble poser néanmoins certaines difficultés pratiques de maintenance. Par ailleurs, la mise en place du matériel s'avère difficile au-delà d'une certaine profondeur.

2.2.6. Mesure par sondes capacitives

Comme pour les techniques TDR, les sondes capacitives sont basées sur la caractérisation de la constante diélectrique du sol. Le principe de la méthode consiste à mesurer la capacité d'un condensateur, qui se forme quand on introduit deux électrodes dans le sol et qu'on applique un champ électrique sinusoïdal par leur intermédiaire. On mesure ainsi la fréquence d'oscillation liée au sol qui constitue le diélectrique d'un condensateur dont les armatures sont les électrodes situées dans le

capteur. Cette capacité est donnée par la relation $C = a k \varepsilon_0$, où ε_0 est la constante diélectrique du vide, k la permittivité électrique relative du sol et a est un coefficient lié à la géométrie de la sonde capacitive employée (Illustration 6).

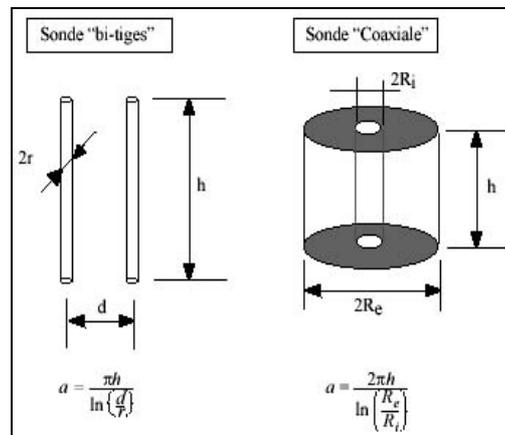


Illustration 6 – Coefficient a pour deux géométries de sondes capacitives (Pereira dos Santos, 1997)

Ce type de sonde a été développé initialement pour des usages agronomiques afin de suivre l'évolution de l'humidité dans des parcelles agricoles, généralement à faible profondeur (Chanzy et al., 1997). Un modèle de capteur développé par l'INRA avait été installé par le BRGM en 1994 sur le site expérimental de Boulc-en-Diois (Drôme) dans le cadre d'un programme de recherche en vue d'une meilleure compréhension du rôle de l'eau dans le déclenchement de mouvements de terrain (Leroi, 1995). Ces capteurs, commercialisés sous le nom d'Humicap, ont été mis en place à une profondeur de 30 à 50 cm et reliés à une centrale permettant une acquisition automatisée à raison de deux mesures quotidiennes. Des défauts d'étanchéité et une certaine fragilité du matériel le rendant peu adapté à une mise en place en forage ont conduit le BRGM à développer en 1994-95 un matériel spécifique sous le nom d'Humilog, en collaboration avec ses filiales ANTEA et Iris Instruments.

La sonde Humilog a été conçue sur le même principe que les sondes capacitives déjà existantes mais avec une résistance accrue aux sollicitations hydriques et mécaniques, afin de permettre sa mise en place en forage à des profondeurs de plusieurs mètres et son maintien dans le terrain sur une longue durée même dans un environnement agressif. La sonde est un cylindre de 250 mm de longueur et 40 mm de diamètre (Leroi et al., 2000). Elle comprend une électrode annulaire de même diamètre et une électrode de pointe conique, séparées par un isolant et reliées à une carte électronique

qui délivre en sortie un signal de type 4-20 mA. Le volume de sol concerné par la mesure est une sphère centrée sur la sonde et dont le diamètre est évalué à 30 cm environ. La sensibilité est de l'ordre de 1 % de la gamme de mesure qui s'étend jusqu'à la saturation complète du sol. La sonde comprend également un capteur de température qui délivre en sortie le même type de signal et qui permet d'enregistrer en parallèle la température du sol, non pas pour corriger une éventuelle dérive du capteur mais pour tenir compte de la variation de la permittivité des sols et de l'eau avec la température. La sonde est alimentée par une source de tension externe (comprise entre 12 et 24 V) et reliée par l'intermédiaire d'un multiplexeur à une centrale d'acquisition de type Osiris (développée par Iris Instruments, sur la base d'un cahier des charges établi par le BRGM), laquelle pilote l'acquisition des mesures à un pas de temps réglable (prenant en compte le temps de préchauffage d'environ 25 s, nécessaire au capteur de permittivité pour stabiliser la mesure).

L'étalonnage de ces capteurs a fait l'objet d'un travail de calibrage en laboratoire dans des cuves de grand volume remplies d'un mélange de matériau de granulométrie soigneusement contrôlée, compactées à l'optimum Proctor et présentant des teneurs en eau variables (Monge et Leroi, 1997). La permittivité apparente est déterminée à partir de l'intensité du signal délivré par une relation linéaire dont les coefficients de pente et d'ordonnée sont fournies pour chaque capteur après étalonnage. Une relation empirique, issue de ces travaux préliminaires de calibration, permet de déterminer la permittivité corrigée du sol ϵ_c en fonction de cette permittivité apparente ϵ_a , de la température du sol T et de la teneur en sable S (en %) du sol :

$$\epsilon_c = 1,213 \times (\epsilon_a - (0,1695 T - 2,66)) \times (1 - 0,0014 S)$$

La teneur en eau volumique du sol U_v (en %) est alors déduite de cette permittivité corrigée par la relation suivante : $U_v = 1,0277 \epsilon_c - 1,064$. Avec ce type d'appareillage, une mesure dans l'air (permittivité théorique $\epsilon = 1$) donne théoriquement une intensité de sortie de 5,26 mA. Une mesure dans l'éthanol ($\epsilon = 25$) donne une intensité de 9,05 mA et une mesure dans l'eau bi-distillée aboutit à une intensité de 15,1 mA.

Ce type de capteur a été installé par le BRGM en 1996 sur les sites expérimentaux de Salins-les-Bains et de Léaz (Jura), instrumentés dans le cadre d'un programme de recherche sur le déclenchement des mouvements gravitaires (Monge et Leroi, 1997). Les capteurs sont répartis sur 6 stations, à raison de 3 capteurs par stations, disposés selon un profil vertical à des profondeurs comprises entre 0,35 et 1,30 m. L'observation n'a duré qu'une année et a connu de nombreux dysfonctionnements. Elle a néanmoins permis de mettre en évidence une augmentation rapide de la permittivité mesurée en cas de pluie et des phases de diminution progressive de la teneur en eau en période sèche. Elle a aussi mis en évidence une saturation des capteurs lorsque la teneur en eau du sol dépasse un certain seuil.

Afin de permettre des mesures à différentes profondeurs le long d'un même profil vertical, a été développé en 1998 un système de canne cylindrique formée d'une succession de plusieurs sondes capacitatives, chacune d'entre elle étant formée d'un capteur de température et d'un capteur de permittivité constitué de deux électrodes annulaires séparées par un isolant (Illustration 7). Cette canne, dénommée Humitub, a fait l'objet d'un dépôt de brevet de la part du BRGM en mai 2001.

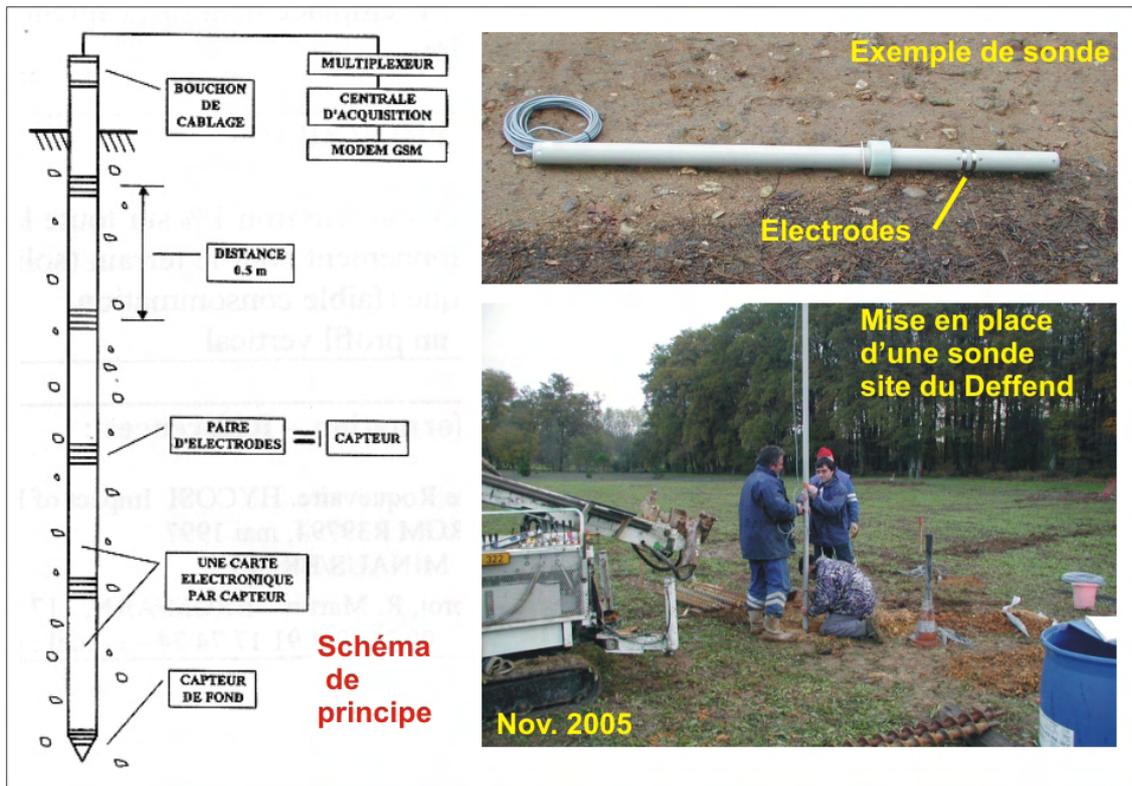


Illustration 7 – Schéma de principe d'une canne Humitub (Leroi et al., 2000) et mise en place d'une sonde sur le site du Deffend (canne à capteur unique) en 2005

Ce type de capteur a été mis en place pour la première fois en vue de réaliser une station autonome de suivi des teneurs en eau selon un profil vertical de sol par le BRGM sur le site de Roquevaire (13) en septembre 1999 (Martin et Meillier, 2002). La canne de mesure comporte 5 capteurs, espacés régulièrement de 50 cm, entre 0,30 et 2,30 m de profondeur, et a été mise en place dans un sondage effectué à la tarière avec remblaiement de l'espace annulaire par les matériaux extraits lors de la perforation. Le sol est constitué d'alluvions récentes à dominante argilo-sableuse, plus graveleuses vers la base, et les teneurs en eau mesurées lors de la mise en place sont comprises entre 6 et 13 %. Les paramètres météorologiques sont enregistrés en parallèle par des capteurs solidaires de la station de mesure (Illustration 8).

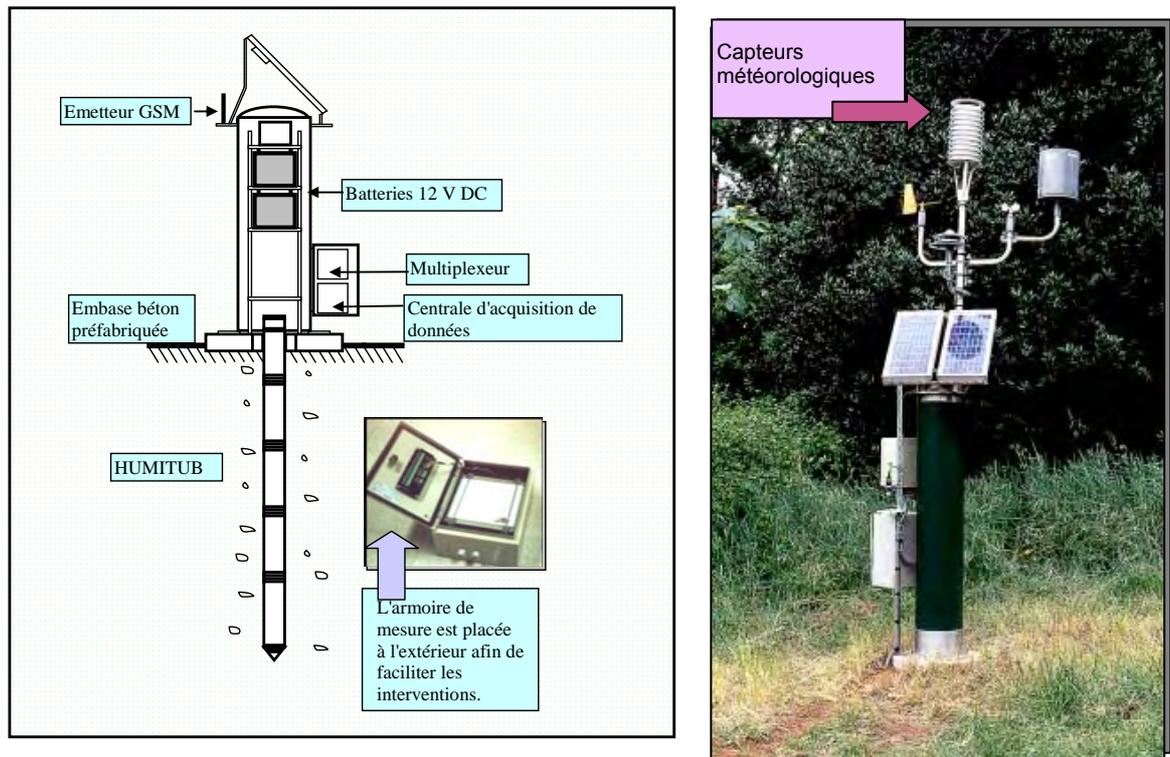


Illustration 8 – Station de mesure avec canne Humitub installée par le BRGM à Roquevaire : schéma de principe et vue de l'installation (Martin et Meillier, 2002)

Sur ce site, l'instrumentation s'est poursuivie jusqu'à fin 1999 à raison de 4 mesures quotidiennes et a permis de confirmer le bon fonctionnement du système d'instrumentation avec une corrélation étroite entre l'occurrence des pluies et l'augmentation de la teneur en eau dans les horizons les plus superficiels, la vitesse de propagation de l'eau dans le sol augmentant avec sa teneur en eau, ce qui est conforme à la théorie. Les observations permettent effectivement de suivre la propagation du front de réhumidification dans le sol au cours de l'automne 1999 et l'évolution régulière du profil de teneur en eau. Les capteurs les plus profonds sont cependant régulièrement saturés du fait de l'apport latéral d'eau dans les alluvions graveleuses en contact avec la nappe.

Ce type d'instrumentation a été ensuite installé sur d'autres sites, soit dans le cadre de programmes de recherche (notamment sur l'évolution de falaises côtières en Normandie), soit pour le suivi de sites instables (glissement de la Médaille en Martinique, glissement de Gorbio à Menton, site côtier instable de Guétarry, etc.). Le cas de Menton (Bernardie et al., 2002) est intéressant car l'instrumentation s'est poursuivie de juillet 2002 à juillet 2005, même si les valeurs enregistrées après mars 2004 sont difficilement exploitables et si le calibrage en teneurs en eau est imprécis. La canne Humitub, mise en place dans un sol limoneux (matériaux d'altération superficielle) en site boisé, comporte 4 cellules de mesure espacées tous les 50 cm à des profondeurs comprises entre 0,40 et 1,90 m, un cinquième capteur placé à 2,40 m s'étant révélé défaillant. Les premières mesures enregistrées en 2002-03 ont fait l'objet d'une ré-interprétation partielle dans le cadre du présent projet (Illustration 9) qui

permet de suivre à la fois la réhumidification au cours de l'automne 2002 et la dessiccation progressive pendant le printemps et l'été 2003. La pluviométrie figurant sur le graphique est celle enregistrée sur le site, à l'exception du dernier trimestre de l'année 2003 pour lequel elle a été reconstituée à partir des données de la station Météo-France de Nice-Aéroport.

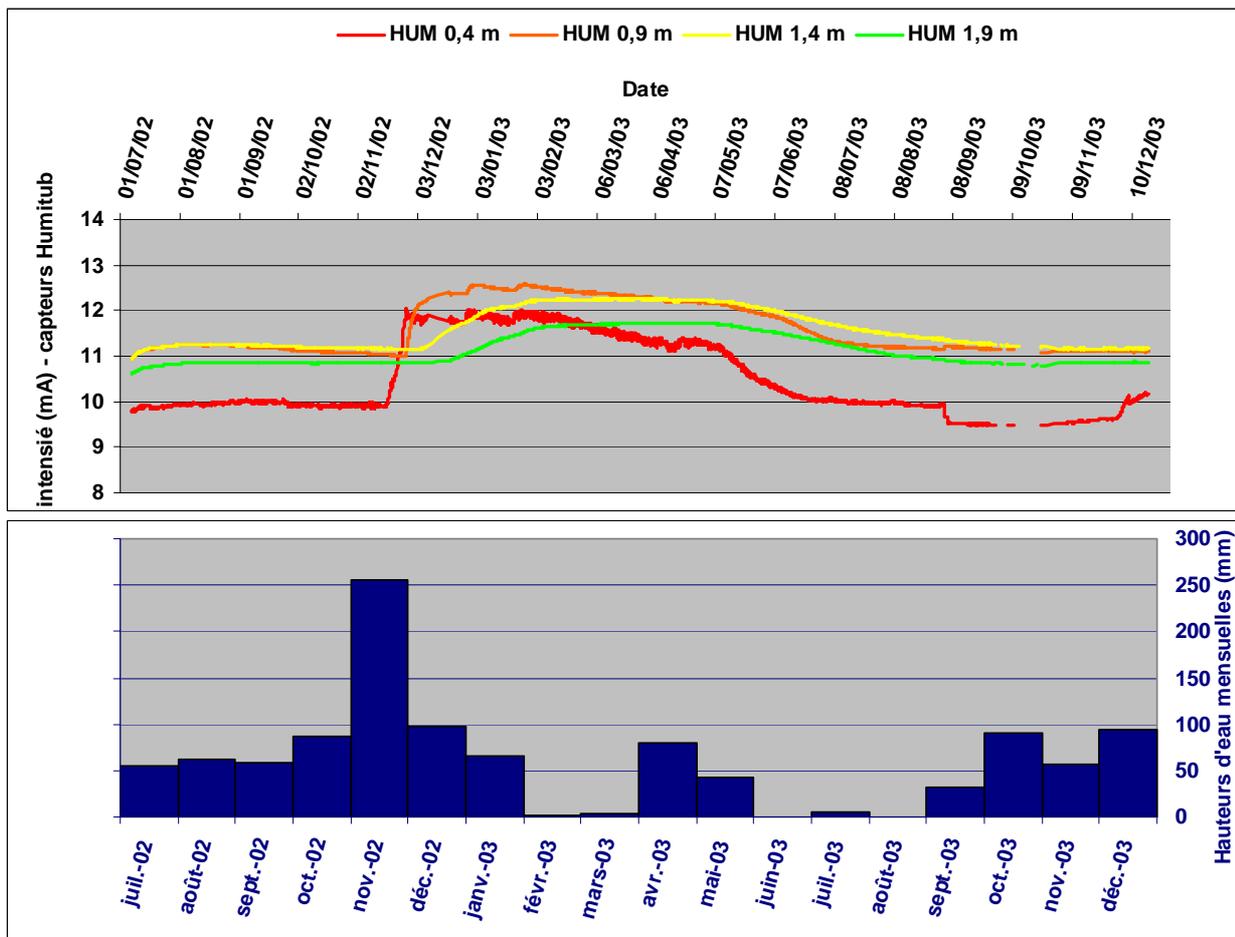


Illustration 9 – Teneurs en eau suivies par Humitub sur le site de Menton et corrélation avec la pluviosité

Ce graphique montre que les fluctuations de teneurs en eau sont évidemment plus rapides et de plus forte amplitude en surface, mais ne sont néanmoins pas négligeables même à une profondeur de 1,90 m. Les orages survenus au cours de l'été 2002 et les premières pluies automnales ont peu d'impact sur la réhumidification du sol. Celle-ci ne s'amorce réellement en surface qu'au cours du mois de novembre (caractérisé par un cumul mensuel très élevé de 256 mm) et courant décembre en profondeur, soit avec un décalage dans le temps de plus d'un mois. La dessiccation commence dès le mois de janvier 2003 pour les horizons superficiels alors qu'il faut attendre le début du mois de mai pour en voir les effets à une profondeur de 1,90 m. Le calibrage des mesures sous forme de teneurs en eau volumique n'ayant pu être établi avec précision du fait d'un défaut d'échantillonnage, les résultats ont été

représentés ici sous forme de données brutes en intensité de sortie. Sur la base du calage réalisé lors de la mise en place du système d'instrumentation, il apparaît néanmoins que les teneurs en eau atteintes en été 2003 sont assez comparables à celle mesurées en 2002, sauf en surface où elles sont légèrement inférieures à partir de la fin août. A une profondeur de 0,40 m, l'écart maximal annuel de teneur en eau volumique est de l'ordre de 20 % entre un maximum de 36 % en janvier 2003 et un minimum de 30 % observé en septembre 2003. A 1,90 m de profondeur, cet écart ne dépasse pas 8 % avec un pic à 35,5 % en avril 2003 et un creux à 33 % en octobre 2003.

L'évolution des températures enregistrées dans le sol avec les sondes Humitub conduit à des résultats classiquement observés avec une fluctuation des températures qui s'atténue sensiblement en profondeur (Illustration 10). A une profondeur de 40 cm, l'enregistrement est sensible aux variations diurnes et montre une amplitude thermique maximale de 22,9 °C entre un minimum de 5,4 °C le 18 février 2003 et un maximum de 28,3 °C le 7 août 2003, très nettement supérieur au pic observé durant l'été 2002 qui était de 24,7°C le 13 juillet, soit un écart de 3,6 °C. En profondeur, les courbes sont beaucoup moins irrégulières même si elles présentent également une forme générale de sinusoïde, mais décalée dans le temps et avec une amplitude annuelle très inférieure. Ainsi, à une profondeur de 2,40 m, la température maximale est enregistrée le 4 septembre 2003 (soit un mois plus tard qu'à 0,40 m) et ne dépasse pas 20,7 °C (soit une perte de 7,6 °C en 2 m). La température minimale est celle du 3 mars 2003 et atteint 12,8 °C (soit 7,4 °C de plus que la température minimale enregistrée dans l'horizon le plus superficielle). L'amplitude thermique annuelle à cette profondeur (7,9 °C) est donc près de trois fois moindre qu'à la profondeur de 0,40 m.

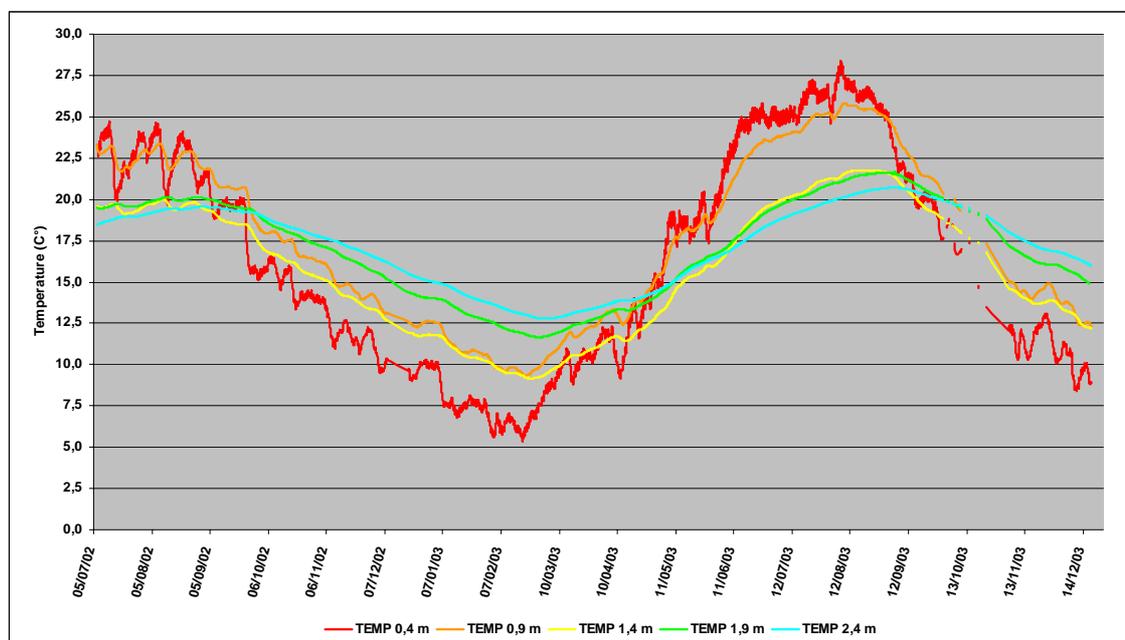


Illustration 10 – Suivi des températures dans le sol avec la sonde Humitub sur le site de Menton entre juillet 2002 et novembre 2003

2.3. METHODES DE MESURE ET SUIVI DE LA SUCCION

2.3.1. Principe général

Dans les sols non saturés, l'existence conjointe d'une phase gazeuse et d'une phase liquide provoque le développement de ménisques capillaires, ce qui se traduit par le fait que la pression de l'eau est négative, du fait de la tension gravitaire exercée sur l'eau. Cette pression négative appelée succion correspond au déficit de pression de l'eau par rapport à la pression d'air (Delage, 1988). Classiquement en agronomie, les auteurs expriment la succion en pF (potentiel of free energy), correspondant au logarithme décimal de la succion exprimée en centimètres de colonne d'eau. A titre d'exemple, une succion de 100 kPa (1 000 cm de colonne d'eau) équivaut à un pF=3.

En zone non saturée, ce potentiel de pression est intimement lié à la teneur en eau dans le sol, selon une relation non linéaire dont il existe différentes formules caractéristiques des sols et appelées courbes de rétention d'eau. La tensiométrie, qui mesure le potentiel de l'eau dans le sol, constitue donc un moyen indirect d'évaluer la teneur en eau du sol, même si l'étalonnage n'est pas immédiat car la relation entre ces deux grandeurs n'est pas univoque. Il existe en effet un phénomène d'hystérésis, lié à la morphologie du réseau des pores et aux variations de l'angle de mouillage de telle sorte que la courbe de dessiccation (obtenue par drainage d'un matériau initialement saturé) et celle d'humidification (issue du mouillage d'un sol initialement sec) sont assez nettement décalées (Mantho, 2005).

2.3.2. Mesure tensiométrique de la succion

Un tensiomètre est constitué d'une pierre poreuse en céramique fine qui reste saturée à tout niveau de succion (avec de l'eau désaérée et déminéralisée) et qui assure la continuité de l'eau entre le sol non saturé et la chambre du capteur qui est pleine d'eau. La mesure de la pression négative de l'eau sous tension se fait soit à l'aide d'un manomètre mécanique classique à cadran, soit avec un capteur de pression électronique. Les tensiomètres permettent classiquement de mesurer la succion dans une gamme de 0 à 80 kPa, valeur au-delà de laquelle apparaissent souvent des phénomènes de cavitation. Des systèmes plus performants, développés notamment par Ridley et Burland en 1993 puis améliorés en 1999, permettent d'étendre la gamme de mesure jusqu'à des succions de 1,5 voire 3 MPa.

Ce type de matériel peut être installé in situ dans un profil de sol et permet de suivre les variations de la pression matricielle au cours du temps, sachant qu'il existe un décalage temporel entre la variation du potentiel dans le sol et la mesure tensiométrique du fait de la résistivité hydraulique de la pierre poreuse et d'éventuels défauts de contact entre le tensiomètre et le sol. Par ailleurs, toute désaturation de la pierre poreuse due à la vaporisation de l'eau du tensiomètre provoque un défaut de mesure. Avec un dispositif développé spécifiquement, Mantho (2005) a ainsi réalisé des mesures de succion en continu (à raison d'une périodicité de mesure de 5 mn) pendant 2 mois (mai-juin 2004) dans un sol limoneux à des profondeurs de 25 et 40 cm. Sur cette période et à ces profondeurs, la gamme de valeurs enregistrées est comprise entre 30 et 160 kPa. La corrélation entre la succion et les teneurs en eau volumiques (mesurées par sondes TDR) est satisfaisante et on observe nettement une diminution de la succion en cas de pluie (Illustration 11). Les contraintes liées aux

difficultés de mise en œuvre et de maintenance de ce type de matériel (changement périodique des tensiomètres pour limiter tout risque de cavitation) le rendent toutefois peu adapté pour des suivi in situ de longue durée.

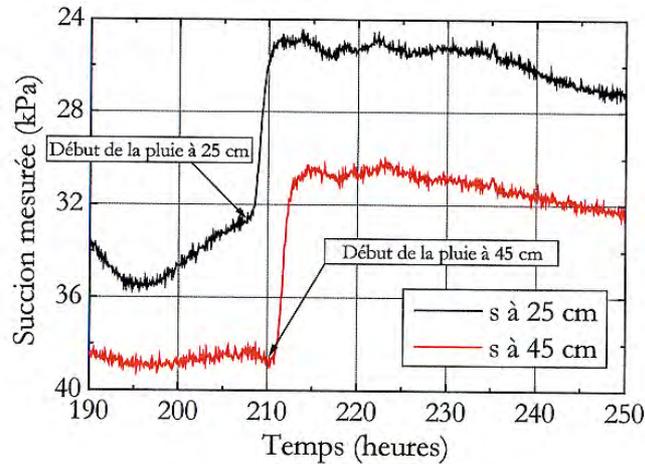


Illustration 11 – Évolution de la succion dans des limons à 25 et 40 cm de profondeur lors de l'épisode pluvieux du 7 au 9 mai 2004 (Mantho, 2005)

2.3.3. Méthode du papier filtre

Le principe de la méthode est basé sur l'emploi d'un papier-filtre dont la courbe de rétention d'eau a été préalablement déterminée au laboratoire : à l'équilibre, le potentiel du sol est égal à celui du papier filtre avec lequel il est en contact et la succion du sol peut alors être évaluée par la détermination de la teneur en eau du papier filtre (Mouroux et al., 1988).

La détermination de la courbe de rétention d'eau du papier-filtre à utiliser est assurée à l'aide d'appareillage classique (plaques tensiométriques, psychromètre, solutions salines). L'humidification préalable du papier-filtre est importante afin d'éviter les phénomènes d'hystérésis, ce qui permet de rester sur la branche drainage de la courbe de rétention d'eau du papier. En pratique, on insère dans un échantillon de sol de forme cubique d'environ 3 cm d'arête une triple épaisseur de papier-filtre (Whatman n°42), puis on attend l'équilibre des succions entre le sol et le papier-filtre (ce qui nécessite plusieurs jours, dans une atmosphère hermétique pour éviter toute évaporation). Après déballage de l'échantillon, le papier-filtre central est pesé avec une précision de 1/10 000 gramme puis séché pour déterminer sa teneur en eau. La lecture sur la courbe d'étalonnage du papier-filtre permet d'obtenir directement le pF de l'échantillon. Cette technique, très simple et peu coûteuse permet de mesurer la succion dans une gamme très large mais n'est pas adaptée à des mesures in situ.

2.3.4. Mesure par psychrométrie

Ce dispositif permet de mesurer l'humidité relative d'un sol non saturé, ce qui permet d'en déduire sa succion totale par application de la loi de Kelvin qui est indépendante du sol (Delage et Cui, 2000). Le principe consiste à mesurer la température d'une

goutte d'eau qui s'évapore, cette température étant inférieure à la température ambiante et la différence entre les deux est fonction de l'humidité relative (Cuisinier, 2002). La technique la plus employée est celle du psychromètre à thermocouple : le passage d'un courant continu par la jonction thermocouple permet de créer un contraste de température entre les deux thermomètres (sec et humide) par effet Peltier. Cet écart de température permet la création d'une force électromotrice au niveau de la jonction (effet Seebeck) ce qui permet d'accéder à la valeur de l'humidité relative. Cette méthode, assez sophistiquée, permet de mesurer des succions jusqu'à une valeur maximale de 7 MPa. D'autres méthodes (psychromètre à miroir) permettent des investigations jusqu'à plusieurs dizaines de MPa, mais ces techniques sont en tout état de cause réservées aux mesures de laboratoire.

2.4. EXPERIENCES CONDUITES IN SITU

2.4.1. Objectifs et remarques générales

Un des objectifs de la bibliographie était de faire une synthèse des études déjà menées sur des expériences de suivi de teneurs en eau ou de déplacements dans les sols argileux, afin d'étudier les résultats déjà obtenus.

En premier lieu, il est important de préciser que ce type d'expérience se trouve en nombre relativement limité dans la bibliographie. Par ailleurs, il faut noter que les contextes et les objectifs de chacune de ces expériences, de même que les paramètres mesurés et leur mode d'acquisition, sont variés.

Ainsi, afin d'analyser de façon pertinente ces différentes expériences, il est important de bien considérer le contexte et les grandeurs mesurées que l'on cherche en général à corrélérer, sachant qu'étant donné le nombre important de paramètres entrant en ligne de compte, les expériences ont généralement cherché à se focaliser sur quelques paramètres tout en ayant une approche plus simplificatrice par rapport aux autres. On peut ainsi mettre en évidence les éléments suivants :

- le contexte géologique : coupe de sol, hétérogénéité, lithologie, argilosité, minéralogie des argiles, comportement mécanique des matériaux, etc. ;
- le contexte climatique : type de climat du site instrumenté, particularités météorologiques des années de suivi (sécheresse, année pluvieuse,...), suivi de quelques paramètres météorologiques (précipitation, température, vent, insolation, évapo-transpiration potentielle ou réelle, etc.) ;
- l'influence de la végétation : présence de végétation sur le site, type de végétation (espèce, taille, période de croissance, type de développement racinaire,...), prise en compte ou non des variations saisonnières ou de l'évolution au fil des années ;
- l'état hydrique du sol (teneur en eau et/ou succion) ;

- les déformations du sol (en surface et/ou en profondeur), ainsi que les désordres éventuels sur le bâti.

Suivant le paramètre mesuré et le contexte, la localisation des mesures (en surface, en profondeur, à plus ou moins grande distance de la végétation), la fréquence des mesures et la durée de la période de suivi, ainsi que le type de matériel d'acquisition des données, sont également des éléments essentiels pour bien comprendre les expériences menées.

Les paragraphes qui suivent présentent ainsi différentes expériences détaillées en bibliographie et s'efforcent de mettre en évidence les éléments propres à chacune d'entre elles, les objectifs et les résultats obtenus, avec pour finalité d'apporter des éléments de réponse complémentaires au programme de suivi de teneur en eau dans les sols mené dans le cadre du présent projet.

2.4.2. Expériences en Angleterre

Synthèse de Driscoll (1983)

Ward (1953), cité par Driscoll (1983), a mesuré, sur trois sites caractérisés par des argiles fortement expansives du sud-ouest de l'Angleterre, un tassement vertical allant de 4,1 à 5,8 cm. De son côté, le Building Research Station a mesuré un soulèvement vertical de 3,5 cm lors de l'hiver 1976, toujours en Angleterre (Driscoll, 1983).

Samuels et Cheney (1975) ont étudié un sinistre survenu sur la terrasse d'une maison d'un étage fondée à 1,2 m de profondeur dans des Argiles de Londres (Indice de plasticité de 45 à 60 %, pourcentage de la fraction inférieure à 2 μm de 60 à 70 %). De grands ormes plantés à proximité avaient été abattus avant la construction, ce qui a provoqué un soulèvement de la terrasse qui s'est poursuivi pendant une vingtaine d'années, avec une amplitude totale estimée à 10 cm. La dessiccation du sol à proximité des arbres avait été détectée jusqu'à une profondeur de 5 m.

La Building Research Station a suivi les mouvements du sol sur un site entre 1959 et 1980 (Cheney et Burford (1975)). Un bâtiment de 3 étages fondé à 1,3 m de profondeur a été construit immédiatement après que des chênes de grande taille aient été abattus, dans un contexte d'argiles de type « Boulder clay », caractérisées par un indice de plasticité de 22 à 29 %. Le maximum du soulèvement induit a été observé huit ans après l'abattage et atteint 2,2 cm, mais les dommages sur le bâtiment ont été limités.

Driscoll (1983) présente des mesures de déplacements sur des bâtiments sinistrés par le retrait-gonflement des argiles. Dans le cas d'une maison d'habitation de deux étages, construite en 1972, fondée à 1,25 m de profondeur et caractérisée par de larges ouvertures sur sa façade en pignon, l'abattage d'arbres a provoqué un soulèvement différentiel, à l'origine de désordres importants (distorsion des ouvertures, fissures de 2,5 mm d'ouverture). Les premières mesures de nivellement conduites sur l'ensemble du bâtiment, ont montré un soulèvement maximal de 5,9 cm dans un angle de la façade en pignon la plus endommagée. Le suivi régulier du soulèvement de cet

angle dans les deux années qui ont suivi (1980 et 1981) a montré un soulèvement total de 0,5 cm et une tendance à l'atténuation du mouvement.

Expérience de Culter et Richardson

Culter et Richardson (1981), cités par Driscoll, ont analysé des données du Royal Botanic Gardens, Kew, concernant la période 1971-79. Les données sont issues de questionnaires envoyés à des particuliers sinistrés par le phénomène de retrait-gonflement des argiles et concernent notamment les caractéristiques de la végétation située à proximité des bâtiments (espèce, hauteur de l'arbre, distance au bâtiment sinistré) et des sols argileux. Elles se basent sur 2 600 réponses exploitées.

Le tableau de l'illustration 12 présente les résultats obtenus pour chaque espèce d'arbre. Les colonnes intitulées « distance maximale enregistrée » indiquent les distances maximales entre les arbres et les maisons sinistrées, respectivement pour l'ensemble des cas enregistrés, pour 75 % et 90 % des cas.

Rang	Espèce	Hauteur maximale de l'arbre (m)	Distance maximale enregistrée (m)	Distance maximale pour 75% des cas (m)	Distance maximale pour 90% des cas (m)
1	chêne	16-23	30	13	18
2	peuplier	25	30	15	20
3	tilleul	16-24	20	8	11
4	frêne	23	21	10	13
5	platane	25-30	15	7,5	10
6	saule	15	40	11	18
7	orme	20-25	25	12	19
8	aubépine	10	11,5	7	9
9	érable/sycomore	17-24	20	9	12
10	cerisier/prunier	8	11	6	7,5
11	hêtre	20	15	9	11
12	bouleau	12-14	10	7	8
13	alisier blanc/sorbiers	8-12	11	9,5	11
14	cyprès de Monterrey (cupressus macrocarpa)	18-25	20	3,5	5

Illustration 12 – Caractéristiques des espèces arborées à l'origine des désordres d'après Culter et Richardson (1981)

La classification des espèces est basée sur le rang obtenu en considérant le nombre de cas par espèce pondéré par le pourcentage que représente l'espèce dans l'échantillon total, qui peut être considéré comme une estimation de la population totale de l'espèce. Cette méthode d'évaluation de la nocivité des arbres est bien sûr discutable dans la mesure où rien n'indique que l'échantillon considéré soit représentatif de la situation réelle et que, par ailleurs, l'influence d'autres facteurs

importants (gravité des désordres, caractéristiques des sols, qualité des constructions, autres facteurs locaux, etc.) n'est pas prise en compte.

Les résultats obtenus sont néanmoins extrêmement intéressants, d'autant qu'ils se basent sur un échantillon de 2 600 cas. On peut par ailleurs pousser l'analyse plus loin en calculant le rapport de la distance maximale à la maison endommagée sur la hauteur maximale moyenne de l'arbre (soit pour la totalité des cas, soit pour 75 % ou 90 % d'entre eux) : ces traitements et classification ont été réalisés dans le cadre de la présente étude à partir des données de Cutler et Richardson, et sont présentés dans les tableaux suivants. Cela permet d'estimer, pour chaque espèce prise en compte, la distance d'influence des arbres sur la dessiccation des sols à l'origine de dommages sur les bâtiments. Cela fait aussi apparaître une autre classification de la dangerosité des espèces, tenant compte de ce rapport hauteur maximale de l'arbre / distance maximale au bâtiment endommagé, ce qui met en évidence que certaines espèces ont un rayon d'influence élevé rapporté à leur hauteur.

Rang	Espèce	Hauteur maximale de l'arbre (m)	Distance maximale enregistrée (m)	Rapport de la distance maximale à la maison endommagée sur la hauteur maximale moyenne de l'arbre
1	saule	15	40	2,67
2	chêne	16-23	30	1,54
3	cerisier/prunier	8	11	1,38
4	peuplier	25	30	1,20
5	aubépine	10	11,5	1,15
6	orme	20-25	25	1,11
7	alisier blanc/sorbiers	8-12	11	1,10
8	tilleul	16-24	20	1,00
9	érable/sycomore	17-24	20	0,98
10	cyprés de Monterrey (cupressus macrocarpa)	18-25	20	0,93
11	frêne	23	21	0,91
12	bouleau	12-14	10	0,77
13	hêtre	20	15	0,75
14	platane	25-30	15	0,55

Illustration 13 – Classification des espèces en fonction du rapport de la distance maximale à la maison endommagée sur la hauteur maximale moyenne de l'arbre pour la totalité des cas (traitement réalisé à partir des données de Cutler et Richardson, 1981)

Rang	Espèce	Hauteur maximale de l'arbre (m)	Distance maximale pour 90% des cas (m)	Rapport de la distance maximale à la maison endommagée sur la hauteur maximale moyenne de l'arbre pour 90% des cas
1	saule	15	18	1,20
2	alisier blanc/sorbiers	8-12	11	1,10
3	cerisier/prunier	8	7,5	0,94
4	chêne	16-23	18	0,92
5	aubépine	10	9	0,90
6	orme	20-25	19	0,84
7	peuplier	25	20	0,80
8	bouleau	12-14	8	0,62
9	érable/sycomore	17-24	12	0,59
10	frêne	23	13	0,57
11	tilleul	16-24	11	0,55
12	hêtre	20	11	0,55
13	platane	25-30	10	0,36
14	cyprés de Monterrey (cupressus macrocarpa)	18-25	5	0,23

Illustration 14 – Classification des espèces en fonction du rapport de la distance maximale à la maison endommagée sur la hauteur maximale moyenne de l'arbre pour 90 % des cas (traitement réalisé à partir des données de Culter et Richardson, 1981)

Rang	Espèce	Hauteur maximale de l'arbre (m)	Distance maximale pour 75% des cas (m)	Rapport de la distance maximale à la maison endommagée sur la hauteur maximale moyenne de l'arbre pour 75% des cas
1	alisier blanc/sorbiers	8-12	9,5	0,95
2	cerisier/prunier	8	6	0,75
3	saule	15	11	0,73
4	aubépine	10	7	0,70
5	chêne	16-23	13	0,67
6	peuplier	25	15	0,60
7	bouleau	12-14	7	0,54
8	orme	20-25	12	0,53
9	hêtre	20	9	0,45
10	érable/sycomore	17-24	9	0,44
11	frêne	23	10	0,43
12	tilleul	16-24	8	0,40
13	platane	25-30	7,5	0,27
14	cyprés de Monterrey (cupressus macrocarpa)	18-25	3,5	0,16

Illustration 15 – Classification des espèces en fonction du rapport de la distance maximale à la maison endommagée sur la hauteur maximale moyenne de l'arbre pour 75 % des cas (traitement réalisé à partir des données de Culter et Richardson, 1981)

Suivant les classifications, certaines espèces apparaissent comme particulièrement dangereuses pour les bâtiments situés à proximité, en cas de sécheresse :

- si l'on raisonne en termes de nombre de sinistres parmi ceux étudiés, les espèces les plus fréquemment en cause sont le chêne, le peuplier, le tilleul, le frêne et le platane ;
- si l'on raisonne en termes de distance maximale aux bâtiments endommagés (en prenant en compte la totalité, 90 % et 75 % des cas), ce sont les peupliers, les chênes, les saules, les ormes qui apparaissent les plus dangereux, avec des distances maximales d'influence de 25 à 40 m si l'on considère la totalité des cas, et de 11 à 15 m si l'on considère 75 % des cas ;
- si l'on raisonne en fonction du rapport de la distance maximale au bâtiment endommagé sur la hauteur maximale moyenne de l'arbre (en prenant en compte la totalité, 90 % et 75 % des cas), ce sont les saules, les chênes, les cerisiers et pruniers, les alisiers blancs et sorbiers, les aubépines et les peupliers qui apparaissent les plus dangereux. Cette classification fait apparaître à la fois des arbres qui ont un large rayon d'influence en partie associée à leur grande taille (chênes, peupliers, saules), mais également des arbres de taille plus limitée (cerisiers, pruniers, alisiers blancs, sorbiers, aubépines) qui, rapportés à leur taille, ont un rayon d'influence conséquent : ces derniers peuvent donc être particulièrement dangereux, car ils auront tendance à être plantés plus près des maisons du fait de leur moindre développement.

Ces chiffres donnent des éléments quant à la distance d'influence des arbres rapportée à leur taille adulte. On peut noter la particularité du saule dont la zone d'influence maximale enregistrée est de plus de 2,5 fois sa hauteur. Pour de nombreuses espèces, l'influence maximale enregistrée est comprise entre 1 et 1,5 fois la hauteur de l'arbre. Si l'on se restreint aux dommages pour les 75 % de cas où l'arbre est le moins éloigné de la maison, la distance maximale entre le bâtiment endommagé et l'arbre est généralement comprise entre 0,4 et 1 fois la hauteur de ce dernier, suivant les espèces.

Expérience de Biddle

• Présentation de l'expérience

Biddle (1983) a également travaillé sur le suivi des teneurs en eau dans les argiles à proximité de différentes espèces d'arbres, dans le cadre d'un projet mené en Angleterre par le National House-Building Council (NHBC). L'expérience se base sur un échantillon de 36 arbres, dont 12 sont issus d'une précédente expérience conduite par le Miltion Keynes Development Corporation (MKDC). Le suivi des teneurs en eau se fait à partir de mesures régulières réalisées avec des sondes à neutrons descendues à différentes profondeurs dans des sondages tubés situés à des distances de l'arbre de 0,1, 0,2, 0,4, 0,8 et 2 fois sa hauteur pour l'expérience du MKDC et à des distances du même ordre pour le NHBC. Différentes espèces d'arbres ont été

étudiées : peuplier (*Populus x euramericana*), marronnier d'Inde (*Aesculus hippocastanum*), bouleau (*Betula pendula*), cyprès de Leyland (*x Cupressocyparis leylandii*) et tilleul de Hollande (*Tilia x europaea*).

Quatre types de sols ont été distingués :

- « Gault clay » (Crétacé) : indices de plasticité (Ip) entre 31 et 51 %, 3 sites ;
- « London clay » (Éocène), Ip entre 41 et 60 %, 2 sites
- « Oxford clay » (Jurassique supérieur), Ip entre 29 et 31 %, 2 sites
- « Boulder clay » (Néogène), Ip entre 18 et 26 %, 9 sites.

Les résultats sont présentés sous forme de graphiques, dont certains sont repris ci-après. Pour chaque cas est présenté :

- (a) : la réduction de la teneur en eau (volumique) du sol entre l'automne et le printemps : plus les hachures sont sombres, plus l'assèchement est grand ;
- (b) : les contours de déficit d'humidité du sol (mm), calculés en multipliant la variation de teneur en eau par l'épaisseur de la couche concernée (généralement 10 cm) : les déficits sont cumulés en partant de la base de la zone de dessiccation pour déterminer le déficit de chaque niveau.

Les graphiques présentent en axe des ordonnées la profondeur du sol et en abscisse la distance à l'arbre, représentée à la fois sous forme de rapport à la hauteur de l'arbre (h) et de distance totale (en m)

A partir des nombreuses données recueillies auprès des 36 arbres, Biddle analyse les résultats sous différents aspects : comparaison entre espèces plantées sur des sols de la même formation géologique, influence de la géologie, existence de déficits permanents d'humidité, moyenne des résultats par espèce, variation d'une saison à une autre, etc.

• Comparaison d'une espèce à l'autre :

Parmi les différentes espèces, pour des sols de type « Boulder clays », le peuplier se distingue par une plus forte influence sur la dessiccation du sol, à la fois en profondeur et sur la distance d'influence. Comme cela est montré sur l'illustration 16, les effets saisonniers se font ressentir jusqu'à 2,9 m de profondeur à une distance de 0,2 fois la hauteur de l'arbre (h), jusqu'à 1,5 m de profondeur à 0,6 h et de façon superficielle à 0,8 h. Le déficit d'humidité à 1 m de profondeur est de 100 mm à proximité de l'arbre. Les autres espèces donnent des rayons et profondeurs d'influence plus limités : par exemple, le tilleul sur un sol de type « Boulder clay » (Illustration 17) n'engendre une dessiccation que jusqu'à 1,6 m de profondeur à une distance de 0,2 h ou 0,4 h, et n'a plus d'effet à une distance de l'arbre de 0,8 h (10 m). A proximité de l'arbre, le déficit hydrique s'élève à 25 mm à 1 m de profondeur. Toujours sur un sol de type « Boulder clay », le bouleau se caractérise par une distance latérale d'influence réduite (pas

d'effet à partir de 0,4 h), tandis que le cyprès présente un effet surtout à faible profondeur (pas d'influence au-delà de 1 m de profondeur, même à proximité de l'arbre). Les résultats moyennant les données obtenues pour les différents types de sols espèce par espèce confirment ces résultats.

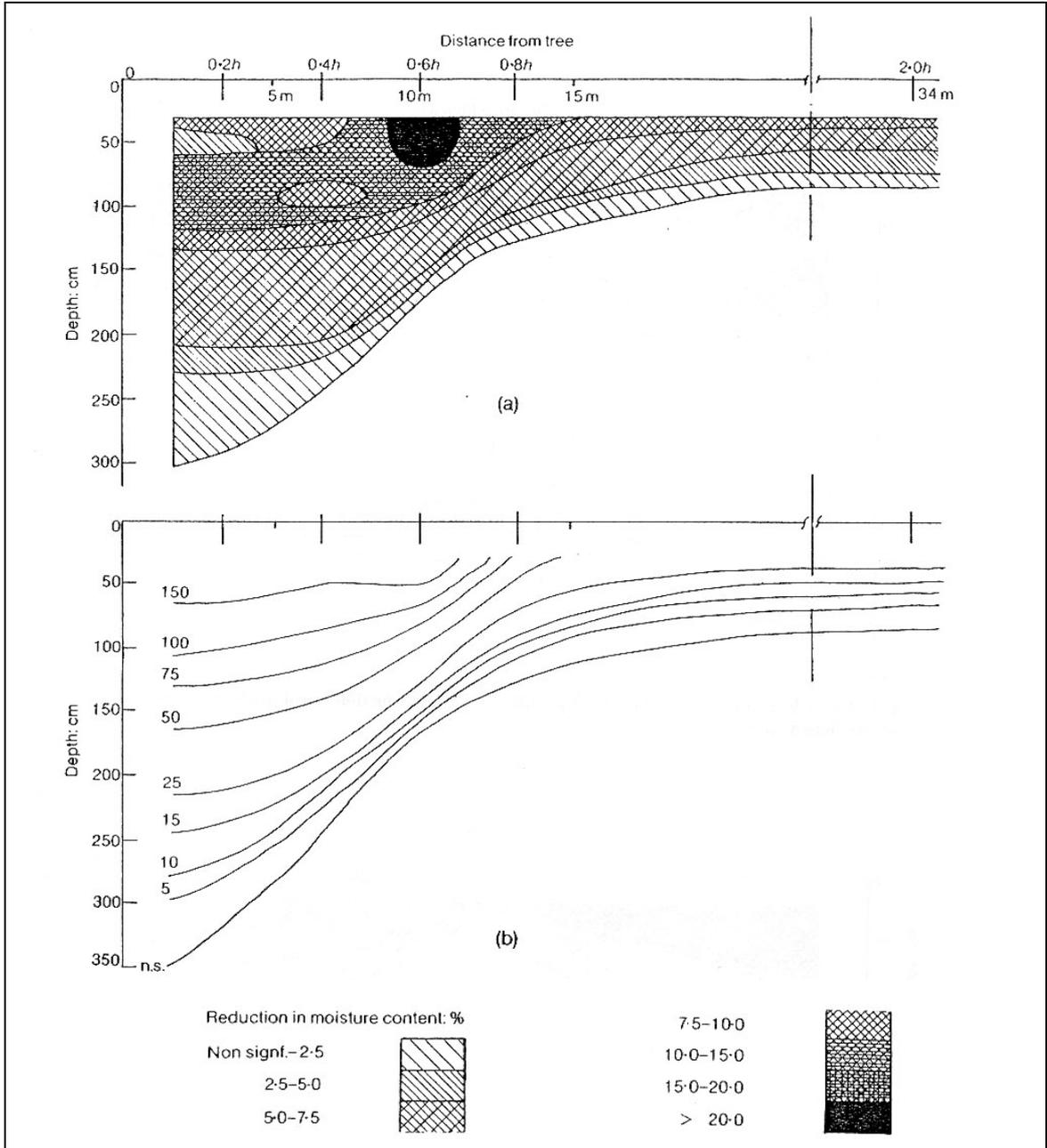


Illustration 16 – Dessiccation engendrée par un peuplier sur un sol de type boulder clay, au 14 septembre 1982 : (a) réduction de teneur en eau volumique (%), (b) déficit d'humidité (mm) d'après Biddle, 1983

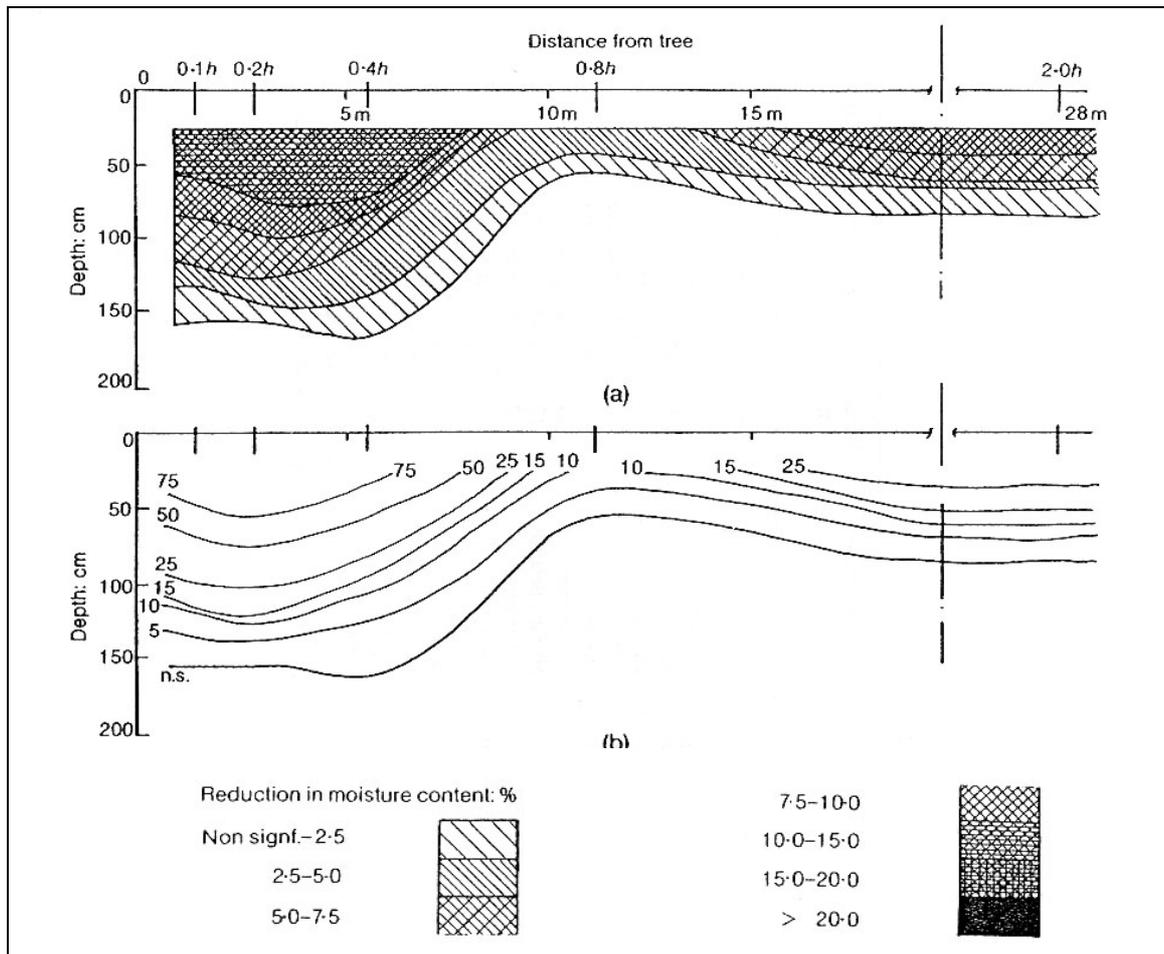


Illustration 17 – Dessiccation engendrée par un tilleul sur un sol de type boulder clay, au 1^{er} septembre 1982 : (a) réduction de teneur en eau volumique (%), (b) déficit d'humidité (mm) d'après Biddle, 1983

• **Influence de la géologie et de l'hétérogénéité des sols :**

Sur les différents exemples étudiés, le type d'argile ne semble pas avoir d'effet très significatif sur les résultats en termes de déficit engendrés par les arbres, si ce n'est les différences en termes de perméabilité. Par exemple, des niveaux plus perméables (notamment des niveaux de sables intercalés) provoquent une plus grande capacité de drainage des niveaux sus-jacents.

• **Déficits permanents d'humidité :**

En plus des effets saisonniers (différences de teneur en eau entre l'automne et le printemps), Biddle a également analysé les déficits permanents d'eau, c'est-à-dire l'effet persistant que peut avoir la dessiccation engendrée par l'arbre sur plusieurs années consécutives (cf. Illustration 18). En l'absence de données acquises avant la plantation de l'arbre, la comparaison s'est faite entre le point de mesure le plus éloigné

de l'arbre (2 h ou 3 h), dont la teneur en eau a été prise comme valeur de référence en l'absence d'arbre, et le point de mesure le plus proche de l'arbre (0,2 h ou 0,25 h). Parmi l'ensemble des cas étudiés, seuls ceux concernant un peuplier planté sur des sols argileux montrent des effets à long terme.

La comparaison des valeurs de teneurs en eau volumiques à proximité de l'arbre et hors de son rayon d'influence montre que les peupliers ont une influence jusqu'à 2,9 m de profondeur sur les argiles de type « Boulder clay » et jusqu'à 3,5 m sur les « Oxford clay ». Les courbes présentées pour les peupliers plantés sur les « London clay » et « Gault clay » suggèrent même une influence au-delà de 3,5 m de profondeur.

La comparaison des courbes obtenues pour les mesures en automne et au printemps à une distance éloignée de l'arbre montre notamment que l'effet de la végétation herbeuse ne descend pas au-delà de 1 m de profondeur en termes de dessiccation.

Pour le peuplier implanté dans les argiles de type « Boulder clay », la courbe à 0,2 h au printemps est située entre celle mesurée à l'automne à la même distance de l'arbre et celle observée au printemps loin de l'arbre, ces trois courbes se rejoignant au-delà d'une profondeur de 2,9 m. Cela peut être interprété comme la résultante d'une réhumidification hivernale qui se propage bien jusqu'à 2,9 m de profondeur, mais qui reste insuffisante pour que le sol retrouve la teneur en eau en l'absence d'arbre, c'est-à-dire la capacité au champ. Par contre, la même analyse pour le peuplier situé sur les « Oxford clay » montre que la réhumidification hivernale ne pénètre que jusqu'à 1,7 m à proximité de l'arbre : au-delà de cette profondeur, les profils de l'automne et du printemps se superposent, montrant que le déficit hydrique reste persistant durant toute l'année entre 1,5 m et 2,5 m de profondeur. Ce déficit est de l'ordre de 5 à 8 % de teneur en eau volumique entre le profil à proximité de l'arbre et celui qui en est éloigné.

Pour les expériences menées avec des peupliers sur des argiles de types « London clay » et « Gault clay », l'analyse est similaire : la réhumidification hivernale est limitée à une certaine profondeur variant de 1,6 à 2,2 m. On peut donc en déduire que la réhydratation hivernale des sols est facilitée dans les terrains plus perméables des « boulder clay », tandis qu'elle est plus lente et donc plus limitée pour les autres types d'argiles moins perméables. Cela peut expliquer que la dessiccation ne dépasse pas 2,9 m de profondeur pour les « boulder clay » où la recharge hivernale permet à l'arbre de trouver des ressources en eau disponibles à proximité, tandis que dans les autres terrains moins perméables, le déficit hydrique étant permanent durant l'année, l'arbre est contraint à puiser des ressources en eau complémentaires à plus grande profondeur ou à une distance latérale plus grande.

Parmi les enseignements que l'on peut tirer de ces résultats, on peut expliquer le fait que, dans le cas des arbres consommant de grandes quantités d'eau comme les peupliers, l'abattage puisse entraîner un gonflement sur le long terme, le temps que le déficit permanent soit comblé, d'où le risque de désordres sur des bâtiments.

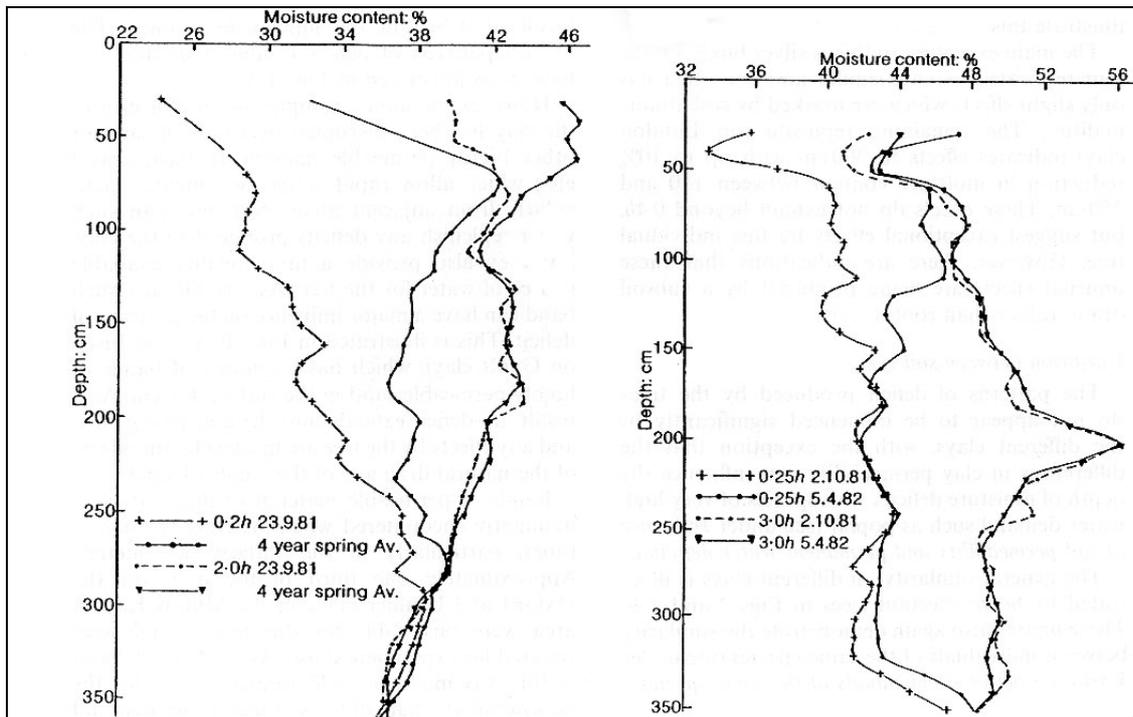


Illustration 18 – A gauche, peuplier sur un sol de type Boulder clay : profils de teneur en eau à proximité de l'arbre (0,2 h) et éloigné de l'arbre (2 h) en automne et au printemps (moyennes sur 4 ans) – A droite, peuplier sur un sol de type Oxford clay : profils de teneur en eau à proximité (0,25 h) et loin (3 h) de l'arbre, en automne et au printemps (Biddle, 1983)

• **Différences de profils de teneurs en eau d'une année à l'autre**

La comparaison des profils de teneur en eau obtenus pour les quatre années de mesure en automne montre que l'intensité de la dessiccation peut varier en fonction notamment des conditions météorologiques propres à chaque année. Biddle souligne cependant qu'aucune des années de mesure n'est particulièrement sèche : une sécheresse pourrait donc avoir des conséquences plus marquées sur les profils de dessiccation enregistrés.

2.4.3. Études de cas en Australie

Richards, Peter et Emerson (1983) ont présenté des travaux réalisés au sein du Commonwealth Scientific Industrial Research Organization (CSIRO), à partir d'études menées en Australie, notamment à Adélaïde. Un des intérêts de leurs recherches est d'analyser l'influence de la végétation, à la fois en termes de dessiccation des sols (suivis de profils de succion) et en termes de mouvements verticaux du sol et de dommages sur les bâtiments.

Un des exemples de cas réels est celui du Musée national d'art (National Art Gallery). Le bâtiment a été construit à la fin des années 1890 sur des sols argileux et n'a connu aucun désordre significatif pendant une soixantaine d'années. La plantation d'arbres le

long de la façade orientale dans les années 1960 a entraîné la fissuration du bâtiment à partir de l'année 1969 (cf. plan de situation sur l'illustration 19). Des mesures de succion dans le sol réalisées en février 1971 ont clairement montré l'influence des arbres sur la dessiccation des sols en profondeur (cf. Illustration 20) : au voisinage des arbres, la dessiccation est significative jusqu'à plus de 3 m de profondeur. Les mesures de tassements en surface sur le même profil entre fin 1968 et mi-1971 ont montré des tassements allant jusqu'à plus de 3 cm au voisinage des arbres, tandis qu'à une distance latérale de plus de 10 m des arbres, les tassements ne dépassent pas 1 cm.

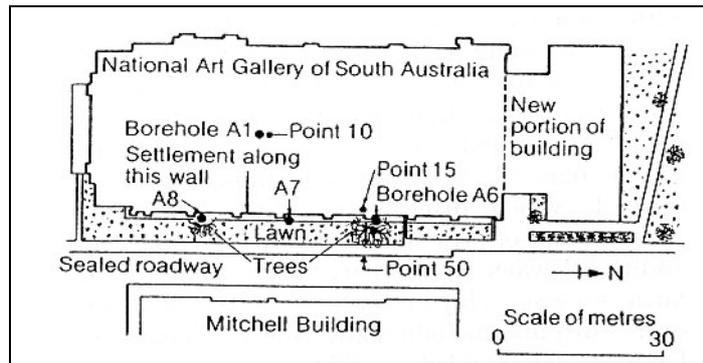


Illustration 19 – Plan de localisation du Musée national d'art (Richards et al., 1983)

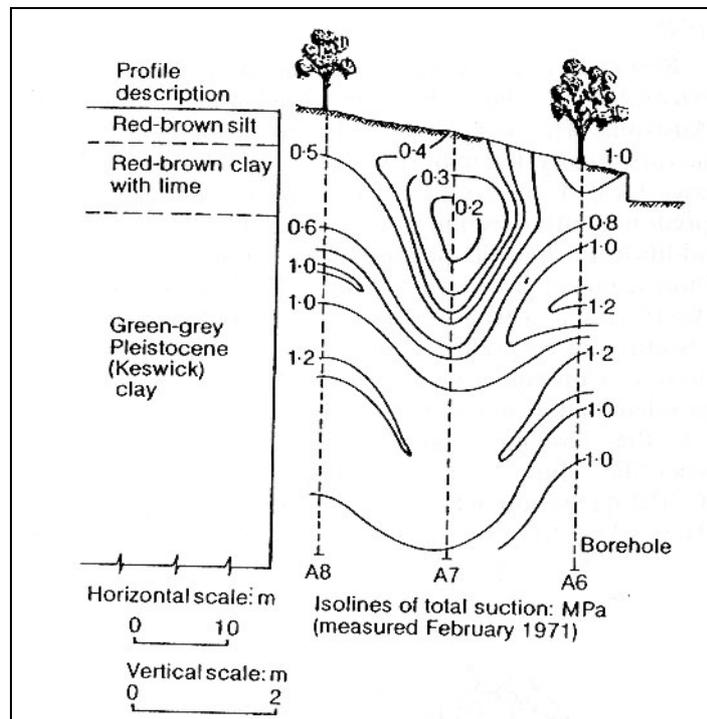


Illustration 20 – Profils des succions le long de la façade orientale du Musée avant l'abattage des arbres (Richards et al., 1983)

L'abattage des arbres a alors été décidé fin 1971. Le suivi des mouvements verticaux au-delà de cette date montre une élévation des points situés à proximité des anciens arbres, mais l'ampleur de ce gonflement est très variable entre les deux points présentés (cf. Illustration 21) : en effet, pour le point 15, près de l'arbre, au niveau du bâtiment, l'élévation est lente et d'ampleur limitée (un peu plus de 1 cm) ne compensant qu'un tiers des tassements engendrés par la dessiccation due aux arbres, tandis que pour le point 50, situé près de l'arbre, au niveau de la route, l'élévation atteint environ 5 cm, alors que le tassement dû à la dessiccation des arbres n'avait pas dépassé 3 cm. Même si Richards et al. ne formulent pas d'hypothèse pour expliquer cette différence de comportement, on peut supposer que c'est l'influence du bâtiment qui est à l'origine de cette élévation lente et d'ampleur limitée enregistrée au point 15, soit en raison de son poids, soit en raison de l'imperméabilisation locale qu'il induit.

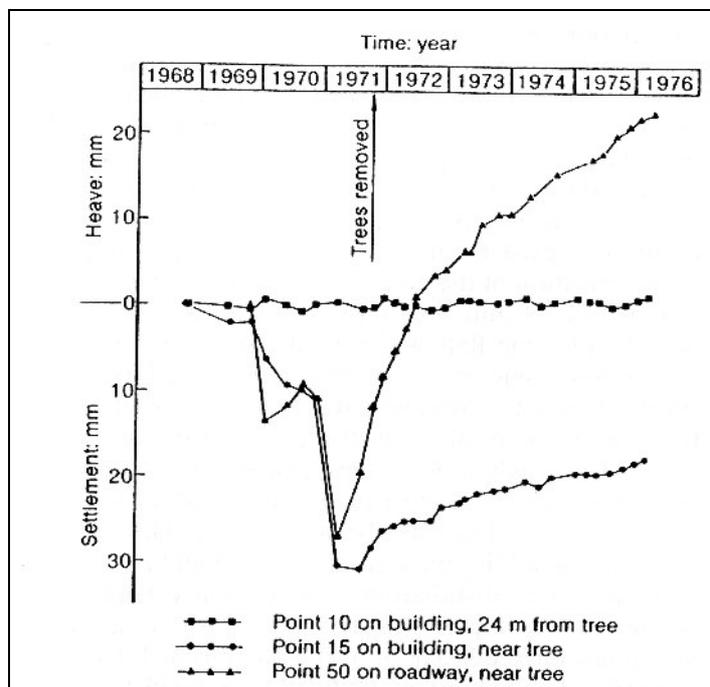


Illustration 21 – Mouvements verticaux en surface au niveau de différents points à l'intérieur et à l'extérieur du musée national d'art (Richards et al., 1983)

D'autres expériences menées par le CSIRO (Richards et al., 1983) ont consisté à établir des profils de succion comparatifs à proximité d'un eucalyptus (red gum tree), d'un pin (*pinus palustris*) et en l'absence de végétation dans des terrains argileux considérés comme modérément expansifs (cf. Illustration 22). Il est important de noter que la répartition des précipitations est différente de celle des climats français, la période des pluies débutant généralement autour du mois d'avril (Illustration 23). Les résultats montrent que l'influence des arbres sur la dessiccation du sol s'étend au-delà de 5 m de profondeur et que l'eucalyptus provoque une succion plus forte que le pin, alors que les deux arbres ont des tailles similaires. Il faut cependant noter que les périodes de mesures sont différentes et qu'une des causes des fortes succions enregistrées à proximité de l'eucalyptus en mai 1980 peut être la quasi-absence de

précipitations au cours du premier trimestre 1980, alors que ce n'a pas été le cas en 1982, date des mesures au voisinage du pin et de la zone dépourvue d'arbres.

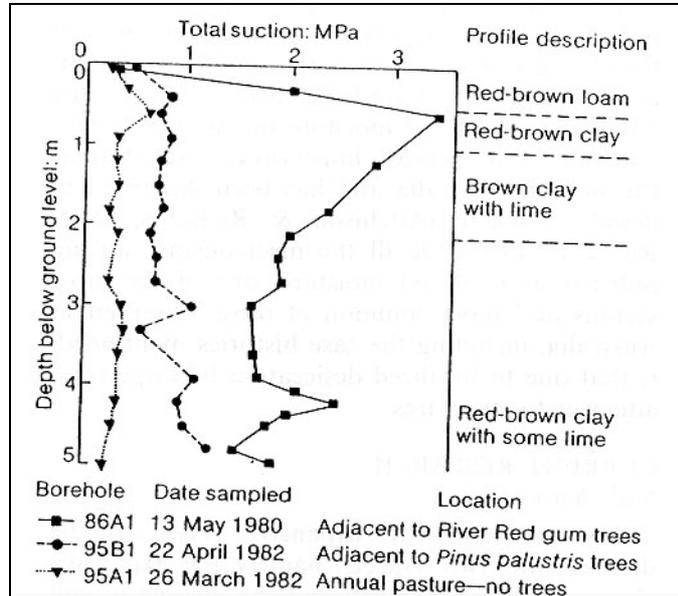


Illustration 22 – Profils de succion dans un sol de type red-brown respectivement au voisinage d'un eucalyptus, d'un pin et en l'absence d'arbres (Richards et al., 1983)

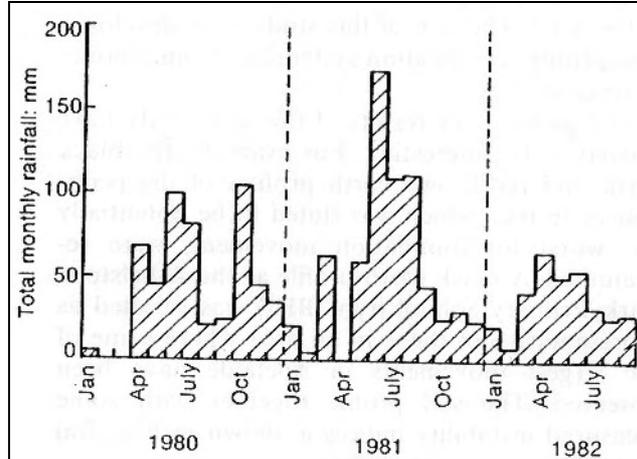


Illustration 23 – Pluviométrie mensuelle enregistrée à Adélaïde entre janvier 1980 et septembre 1982 (Richards et al., 1983)

Des expériences ont également été menées au South Parklands d'Adélaïde, sur l'influence d'un groupe d'eucalyptus de grande taille (hauteur moyenne 17 m) sur la dessiccation du sol, dans des terrains argileux (« red-brown soil » recouvrant des argiles du Pléistocène). La position des arbres et des points de mesure est présentée sur l'illustration 24, et les résultats (profils de succion) sur l'illustration 25, tandis que

les précipitations moyennes mensuelles de l'illustration 23 correspondent également à ce site et à cette période.

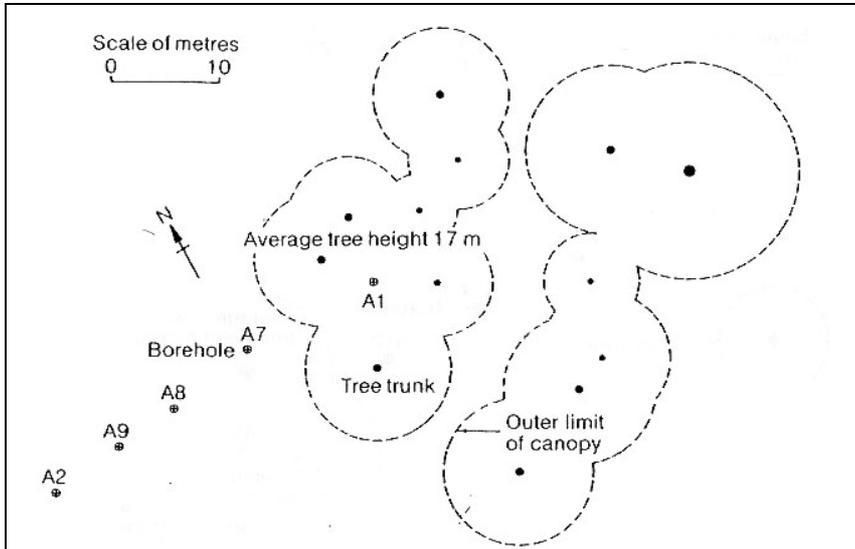


Illustration 24 – Plan d'implantation des arbres (groupe d'eucalyptus) et des points de mesures (d'après Richards et al., 1983)

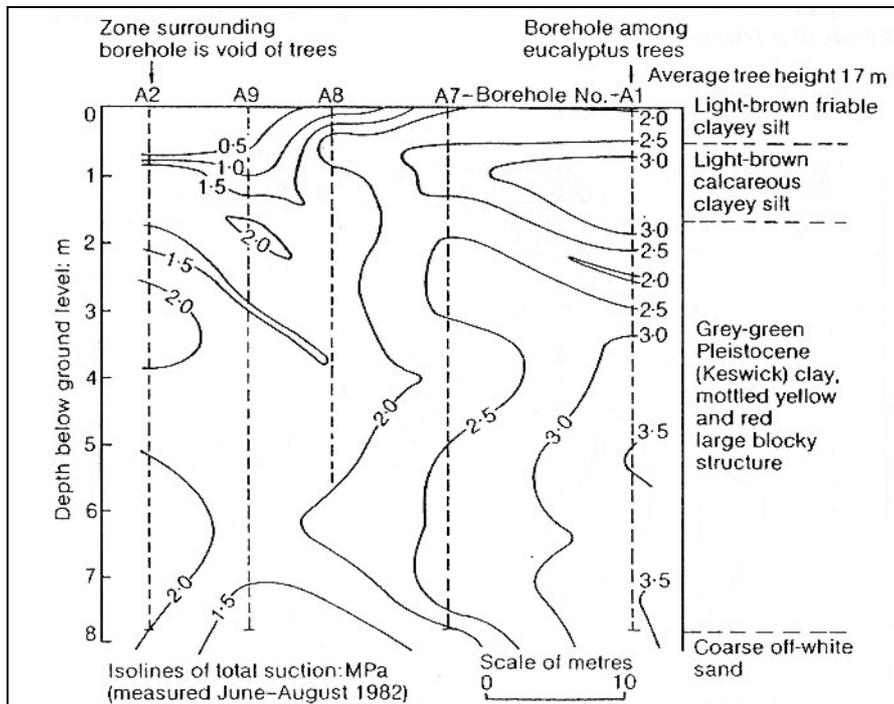


Illustration 25 – Profils de succion mesurés au voisinage d'un groupe d'eucalyptus (d'après Richards et al., 1983)

Les résultats qui correspondent à une période de précipitations (juin à août 1982) montrent notamment qu'à proximité immédiate des arbres, des succions de -3 à -3,5 MPa sont enregistrées entre 0,8 et 2 m et entre 3,5 et plus de 8 m de profondeur, ce qui montre que la dessiccation due au groupe d'eucalyptus s'étend jusqu'à une profondeur de plus de 8 m (la succion à 8 m de profondeur pour le profil le plus éloigné des arbres est de -2 MPa contre -3,5 MPa pour la même profondeur au droit de l'arbre). Par ailleurs, la distance latérale d'influence de la dessiccation de ce groupe d'eucalyptus est de plus d'une vingtaine de mètres pour l'horizon superficiel (0 à 1 m de profondeur), soit plus que la hauteur moyenne du groupe d'arbres (17 m).

2.4.4. Expériences menées en Afrique du Sud

Williams et Pidgeon (1983) ont travaillé sur les problèmes de retrait-gonflement des sols en Afrique du Sud : les conditions climatiques propres à ce pays, ainsi que la présence d'argiles montmorillonitiques fortement gonflantes sont à l'origine de mouvements verticaux du sol d'ampleur supérieure à celle des études menées en Angleterre par exemple. Ils citent ainsi des tassements de 20 cm survenus sur une maison à Allanridge, dans l'état libre d'Orange (Pidgeon et Tromp, 1983). Les mouvements ont été attribués à la dessiccation engendrée par un eucalyptus planté à 5 m de la maison. Williams et Pidgeon indiquent par ailleurs que le gonflement maximum du sol enregistré en Afrique du Sud suite à l'abattage d'un arbre est de 37,4 cm (site de Kimberley).

Williams et Pidgeon citent également les travaux de De Bruijn (1973), qui a suivi les mouvements verticaux mesurés en surface, pour des terrains de type « black expansive clay », particulièrement gonflants, à Onderstepoort. L'expérience, qui s'est déroulée sur une période de 7 ans (1964 à 1970) avait pour but de comparer le gonflement des sols en fonction du recouvrement de surface, après mise en oeuvre d'un défoliant : ont ainsi été comparées des surfaces enherbée (open field), laissée en jachère (fallow area), recouverte d'un film plastique (plastic cover), recouverte d'un géotextile en polyester et fibres de verre (glassreinforced polyester cover) et sableuse (sand cover).

Les résultats, présentés sur l'illustration 26, montrent que la parcelle naturelle donne des soulèvements cycliques irréguliers, qui atteignent généralement une ampleur de 1 à 5 cm, excepté pour l'année 1967, particulièrement pluvieuse, où l'ampleur du mouvement atteint 8,5 cm. Pour les autres terrains, où aucune végétation ne participe à la dessiccation du sol, le gonflement atteint au total entre 10 et 15 cm et se produit au cours des quatre premières années, pour se stabiliser ensuite. Cela montre donc que ces sols particulièrement gonflants étaient dans un état initial de forte dessiccation, qui correspond à l'évapo-transpiration induite par la couverture herbeuse présente avant le début de l'expérience, et, qu'en l'absence de celle-ci, les terrains se réhumidifient progressivement pour atteindre un équilibre qui nécessite plusieurs années. Il faut par ailleurs insister sur l'influence notable de l'année 1967, particulièrement pluvieuse, qui provoque un fort gonflement.

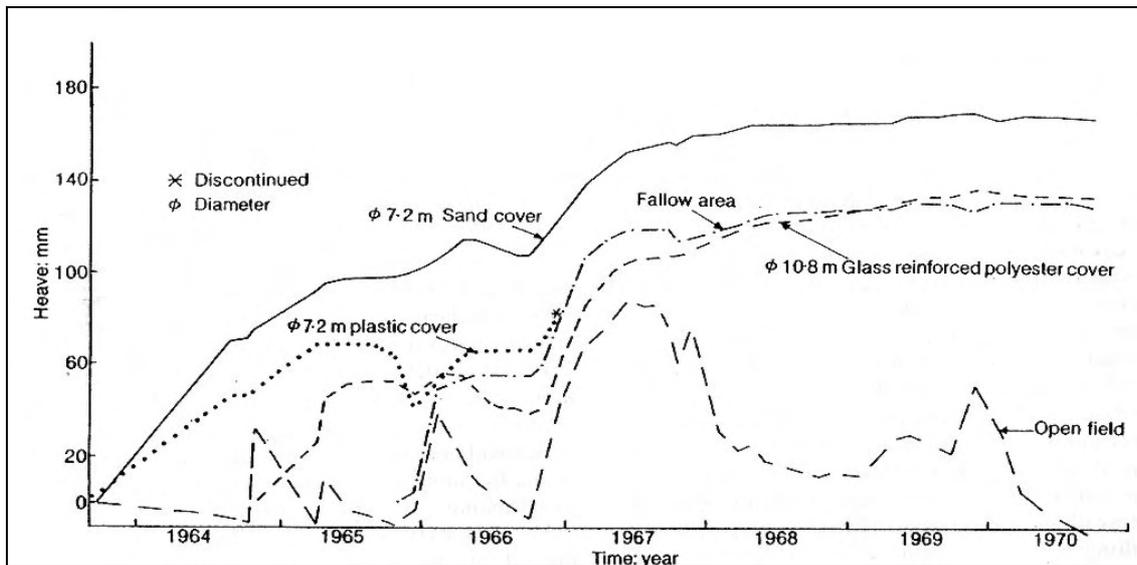


Illustration 26 – Mouvements verticaux du sol en fonction du temps pour différents types de recouvrement de surface (d'après De Bruijn, 1973, cité par Williams et Pidgeon, 1983)

2.4.5. Expériences menées en Israël

Ravina (1983) a également mené des expériences de suivi in situ de teneurs en eau volumique et de déplacement dans des sols argileux (« grumusolic soil »). Les teneurs en eau volumique ont été mesurées par une sonde à neutrons sur une durée de 5 ans. Les résultats, présentés sur l'illustration 27, montrent de très fortes différences de teneurs en eau dans les horizons superficiels entre les situations au printemps (teneur en eau de l'ordre de 50 %) et en automne (teneurs en eau comprises entre 10 et 30 % dans le premier mètre). L'influence de la dessiccation se fait ressentir jusqu'à plus de 1,5 m de profondeur.

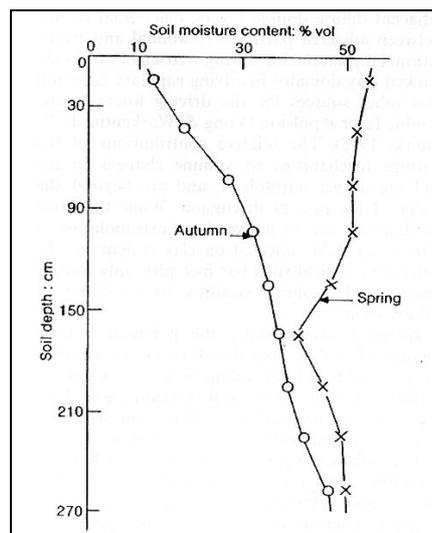


Illustration 27 – Profils de teneurs en eau en automne et au printemps (Ravina, 1983)

Ravina cite également 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.

Kalmar (1979), cité par Ravina, a également mis en évidence l'influence de la végétation sur la dessiccation de sols argileux en Israël. La comparaison entre une parcelle non végétalisée et une plantée d'un citronnier (citrus orchard) a montré que pour obtenir le même retrait, il avait fallu 160 jours dans le premier cas (sans végétation) et seulement 42 dans le deuxième (avec le citronnier).

Bozozuk et Burn (1960), cités par Ravina, se sont également intéressés aux tassements dans des sols argileux, dans le voisinage d'un orme de 16,5 m de hauteur. A 30 cm de profondeur, le mouvement vertical a atteint 5,2 cm à une distance de 1,5 m de l'arbre, tandis qu'à 12 m de l'arbre, il n'était plus que de 1,2 cm, ce qui correspondait aux mesures effectuées dans les secteurs uniquement enherbés, donc hors influence de l'arbre. A une profondeur de 3,75 m, le mouvement vertical mesuré à des distances de 1,5 m et 6 m de l'arbre était de 1,2 cm.

Kalmar (1979), cité par Ravina (1983), a mené une expérience sur des « grumusolic soil » contenant plus de 60 % d'argiles composées principalement de smectites. Il s'est intéressé aux fissures de retrait consécutives à la dessiccation, et en particulier à leur profondeur et leur largeur. Les résultats obtenus montrent que, même si la teneur en eau présente des variations jusqu'à une profondeur de 1,8 m, les fissures de retrait, à la fin de la saison sèche, ne dépassent pas la profondeur de 0,8 m et 90 % d'entre elles ont une profondeur inférieure à 0,4 m. L'apparition des premières fissures a été observée 5 semaines après la fin de la saison pluvieuse et leur volume a augmenté de façon linéaire d'environ 1,2 m³/ha/jour. La largeur de 90 % des fissures de retrait n'excède pas 5,5 cm, mais certaines atteignent 10 cm de large. Cette largeur a atteint son maximum au bout de 12 semaines et est ensuite restée constante jusqu'à la fin de la saison sèche, soit 2 mois plus tard. Cette expérience montre l'importance des fissures de retrait qui apparaissent pendant la période de sécheresse. On peut ainsi imaginer le rôle que ces fissures vont jouer lors des premières pluies, puisqu'elles seront le lieu d'écoulements préférentiels qui vont permettre la réhumidification d'horizons plus profonds. Cela justifie la nécessité de prendre en compte le rôle de ces fissures dans la perméabilité globale des horizons argileux superficiels.

2.4.6. Expériences de l'INRA Nancy

Bréda et al. (1992) ont mené une étude sur les réactions du chêne sessile (*Quercus petraea*) à la sécheresse, à partir du suivi d'un perchis d'arbres d'une trentaine d'années situé dans la région de Nancy (Forêt de Champenoux), notamment entre 1989 et 1991. La pluviométrie a été particulièrement déficitaire durant l'été 1989, ce qui a permis d'étudier la réaction des arbres dans ces conditions de forte sécheresse. La comparaison entre un plateau de cinq arbres soumis à une sécheresse artificielle et un groupe d'arbres irrigués servant de témoins a été réalisée.

La classification pédologique du site correspond à celle d'un sol brun lessivé : horizon superficiel d'argile silteuse jusqu'à 0,6 m de profondeur surmontant un horizon très argileux (45 % d'argile) entre 0,6 m et 0,8 m. La teneur en argile diminue ensuite progressivement avec la profondeur. 75 % des racines sont contenues dans les 60 premiers cm de sol, tandis que très peu sont présentes dans la couche très argileuse (50-70 cm).

Plusieurs grandeurs ont été mesurées pour étudier la réaction des arbres : la densité de flux de sève brute et le potentiel hydrique, qui ont permis de calculer la transpiration de chaque placeau, la conductance de couvert, la conductance hydraulique spécifique des arbres, et la conductance stomatique.

Parmi les résultats obtenus, Bréda et al. (1992), soulignent la réduction de l'évapotranspiration des arbres en période de sécheresse. Le graphique présenté sur l'illustration 28, qui donne la relation entre l'évapotranspiration relative et l'eau extractible relative (valeurs mesurées en 1990, sur des chênes sessiles, et présentées sous forme de moyennes hebdomadaires), montre deux phases : une stabilité de l'évapotranspiration relative entre 70 % et 80 % tant que l'eau extractible relative reste supérieure à 40 %, puis une décroissance rapide de l'évapotranspiration, lorsque l'eau extractible relative passe en dessous de ce pallier, ce qui correspond donc à un stress hydrique. La réhydratation permet de revenir très rapidement à une évapotranspiration très proche des valeurs initiales, avant le stress hydrique.

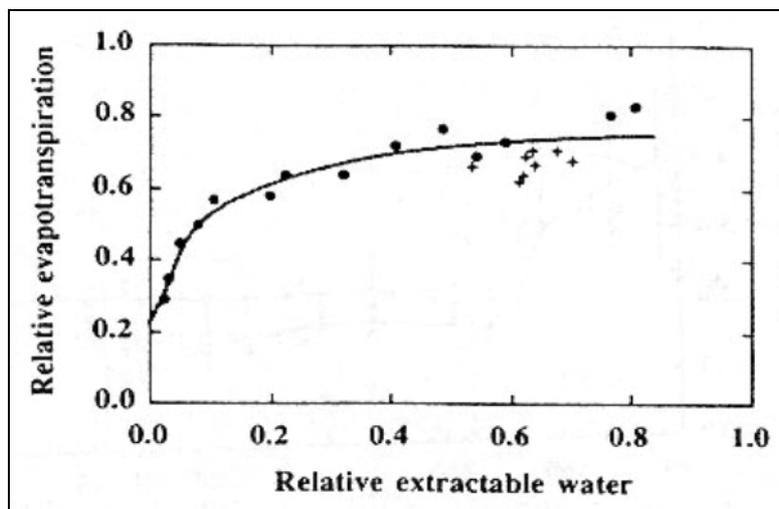


Illustration 28 – Relation entre évapotranspiration relative et eau extractible relative en période de sécheresse (ronds) puis de réhydratation (croix) (Bréda et al., 1992)

Une des conclusions de l'étude est que le chêne sessile apparaît relativement tolérant à la sécheresse, notamment en raison de son enracinement profond, de l'efficacité de son système de transport de sève et de sa capacité à maintenir une ouverture stomatique, donc une transpiration non négligeable jusqu'à des niveaux de dessèchement poussés.

Bréda et al. (1994) ont poursuivi l'expérience sur le même site expérimental. L'illustration 29 donne l'emplacement des chênes (*Quercus petraea* et *Quercus robur*), des sondes à neutrons (mesures de la teneur en eau dans le sol), du micro-psychromètre (mesure de la succion) et de la tranchée (1,6 m de profondeur) qui isole 17 arbres pour lesquels le sol est couvert, afin de créer une sécheresse artificielle (carré appelé lysimètre). L'illustration 30 précise les caractéristiques pédologiques du sol du site expérimental, qui ont déjà été évoquées dans les paragraphes précédents (Bréda et al., 1992).

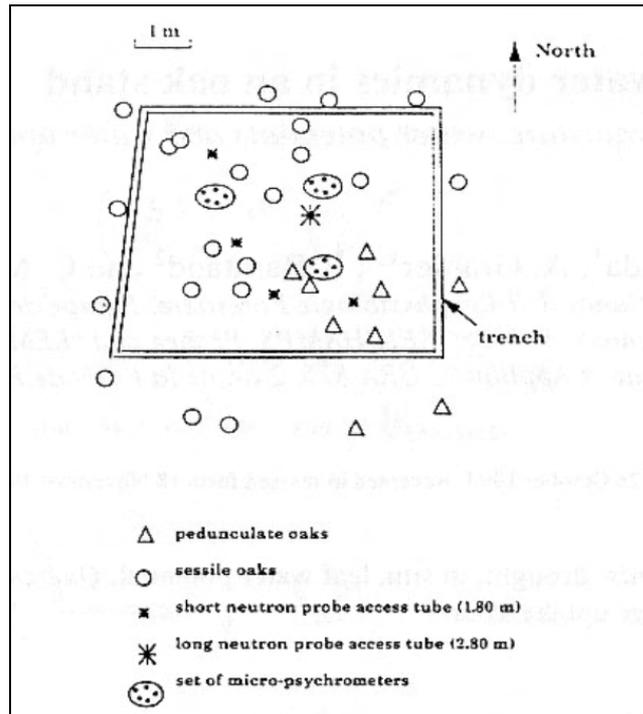


Illustration 29 – Carte de localisation des arbres, de la tranchée et des points de mesure (Bréda et al., 1994)

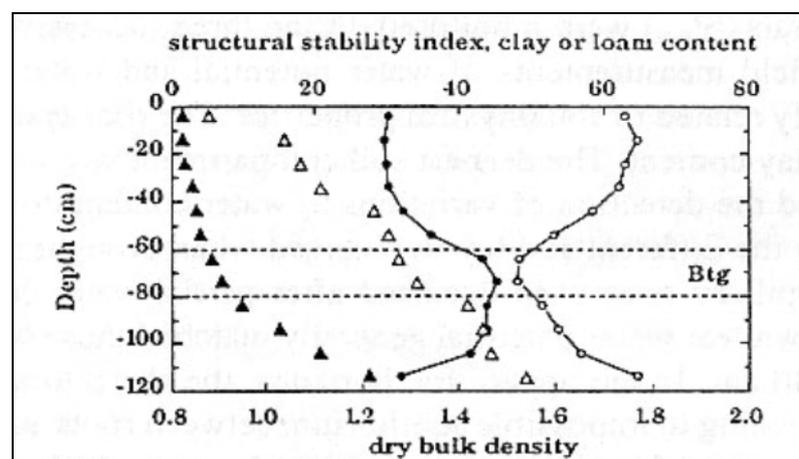


Illustration 30 – Caractéristiques pédologiques du sol du site expérimental (Bréda et al., 1994)

Le suivi expérimental s'étend de 1991 à 1993. L'illustration 31 présente d'une part la répartition des racines (classées par diamètre) pour chaque horizon de sol (jusqu'à 1,6 m) et d'autre part les profils de teneurs en eau volumiques mesurées durant l'année 1992 à partir de la sonde à neutrons implantée au centre du lysimètre (mesures jusqu'à 2,8 m de profondeur), donc dans le secteur où le sol est isolé des précipitations. Il apparaît ainsi qu'entre la période où le sol est le plus humide (profil du 13 mai) et celle où il est le plus sec (profil du 11 septembre), l'écart de teneur en eau est observé jusqu'à une profondeur de 2 m. Bréda et al. précisent que des racines fines peuvent descendre au-delà de 1,6 m, qui est la profondeur d'observation dans la tranchée. L'observation détaillée des résultats montre qu'entre mai et juin, la teneur en eau décroît le plus dans l'horizon superficiel (au-dessus de l'horizon le plus argileux situé entre 0,6 et 0,8 m de profondeur). Ensuite, au fur et à mesure de la progression de la sécheresse, la dessiccation affecte des horizons plus profonds, tandis qu'en surface, les teneurs en eau ne baissent pratiquement plus. Ainsi, en début de saison sèche, les arbres puisent de l'eau dans les horizons superficiels où la plus grande partie de leurs racines sont développées. Lorsque l'eau disponible dans les horizons superficiels se raréfie, les horizons plus profonds sont sollicités, et même au-delà des horizons où la majeure partie des racines a été observée : le prélèvement d'eau se fait par remontées capillaires dues à la succion.

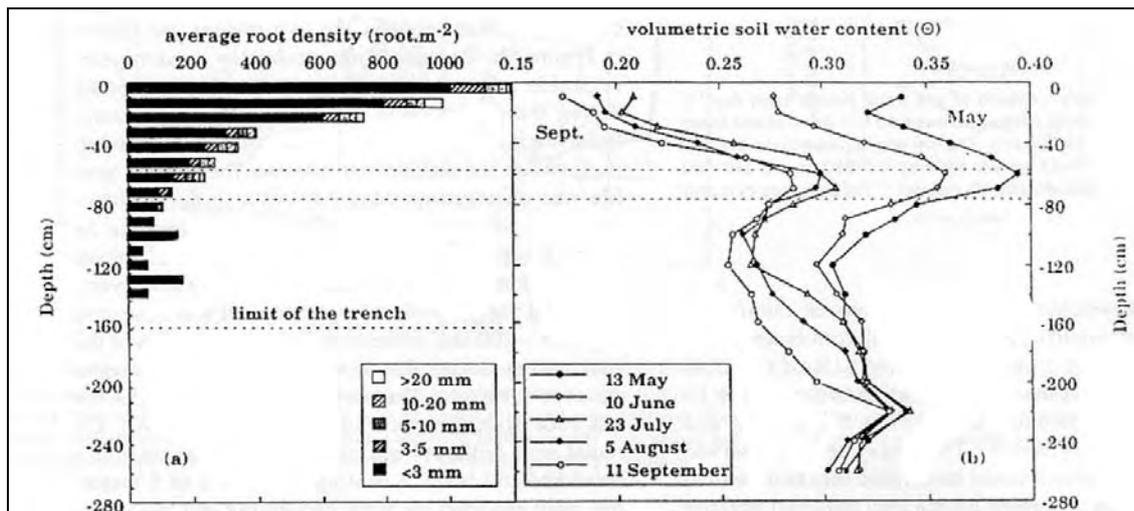


Illustration 31 – Répartition des racines dans les différents horizons (en fonction de leurs diamètres) et profils de teneurs en eau durant l'année 1992 (Bréda et al., 1994)

Des calculs de bilans hydriques ont montré que la quantité d'eau prélevée entre le 10 juin et le 23 juillet est de 2,2 mm par jour, et qu'elle diminue ensuite (2,0 mm par jour entre le 23 juillet et le 5 août puis 0,7 mm par jour entre le 5 août et le 11 septembre). Cette diminution des prélèvements d'eau s'accompagne d'une réduction du flux de sève (qui passe de 1,7 mm à 1 mm par jour).

L'illustration 32 présente les variations de la succion à différentes profondeurs en dehors du lysimètre, d'une part dans une zone témoin boisée (« control plot ») et d'autre part dans une zone de végétation clairsemée (« thinned plot »), ainsi que les

précipitations pendant l'année 1992, dont l'été a été sec. On observe que dans la zone témoin (à proximité des arbres), la succion augmente en valeur absolue dans tous les horizons à partir du mois de juin (de $-0,15$ à $-0,63$ MPa). Les précipitations (71 mm) survenues entre les jours 186 et 194 (début juillet) ne réhumidifient que les horizons superficiels, dont la teneur en eau augmente, mais n'ont pas d'incidence significative plus en profondeur. La période de sécheresse qui suit entraîne une forte augmentation de la succion dans tous les horizons, avec des valeurs supérieures à $-1,5$ MPa (en valeur absolue) pour les horizons superficiels.

Il est également intéressant de noter que la réhumidification (qui se traduit par une diminution de la succion en valeur absolue) se fait avec un certain retard pour les horizons les plus profonds, tandis qu'elle est rapide pour les horizons superficiels. Ainsi, alors que la succion est de $-0,1$ MPa à $0,25$ m de profondeur mi-septembre, elle reste supérieure à $-0,5$ MPa (toujours en valeur absolue) en dessous de $0,8$ m.

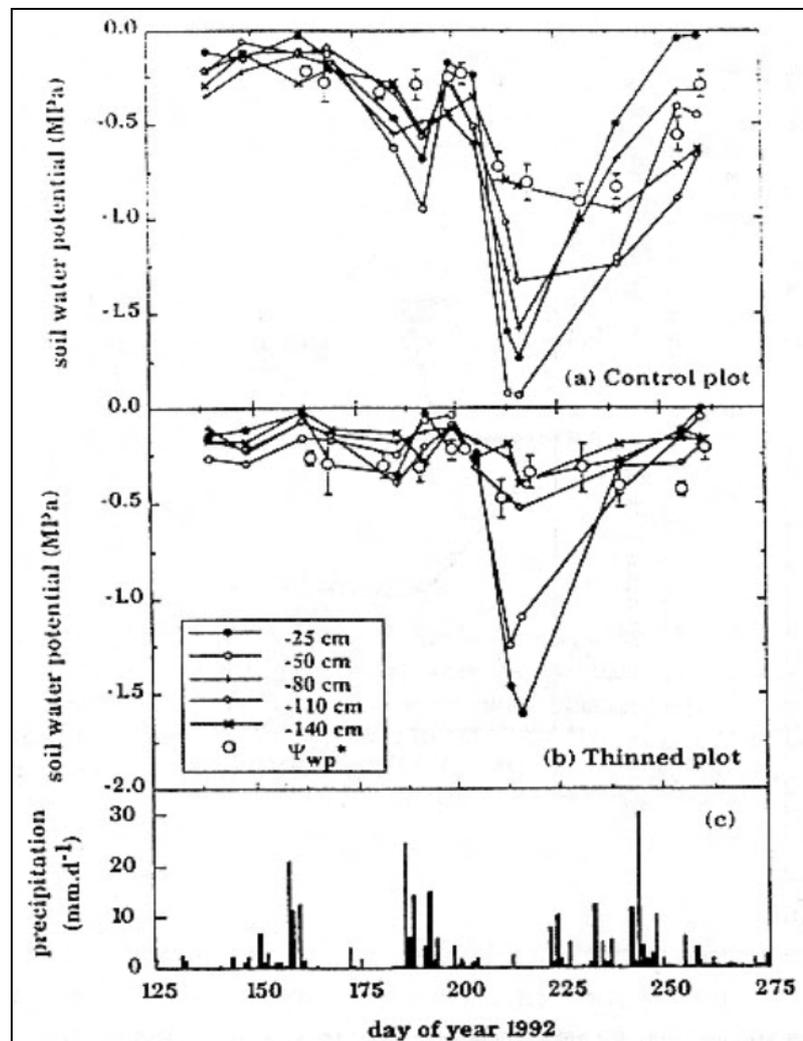


Illustration 32 – Évolution des précipitation et suivi de la succion dans différents horizons pour la zone témoin et la clairière, durant l'année 1992 (Bréda et al., 1994)

La comparaison entre les mesures effectuées dans la zone témoin (proche des arbres) et dans le secteur de végétation clairsemée montre que, pour ce dernier, seuls les horizons superficiels sont concernés par l'augmentation de la succion (en valeur absolue), tandis qu'au-delà de 0,8 m de profondeur, la succion varie peu au cours de la saison (entre -0,1 et -0,5 MPa) : cette comparaison met à nouveau en évidence le rôle de la végétation dans la dessiccation des horizons les plus profonds.

Bréda et al. (2004) ont analysé la sécheresse 2003 dans le contexte climatique des 54 dernières années et son influence sur les arbres forestiers. Ils montrent notamment que les différentes essences d'arbres adoptent des stratégies différentes pour résister à la sécheresse : enracinement profond, contrôle efficace ou précoce de l'ouverture stomatique, système conducteur peu vulnérable à la cavitation, tissus tolérant des potentiels hydriques faibles, capacité d'ajustement de la surface foliaire par chute précoce des feuilles ou des aiguilles. Il est donc important de prendre en compte ces différents paramètres pour comprendre la résistance de chaque espèce à la sécheresse. Cela signifie également que la progression de la dessiccation dans le sol (en profondeur, mais également dans le temps) va être différente suivant le type d'essence, les caractéristiques du sol et celles de la sécheresse. Par exemple, certaines espèces vont, en cas de stress hydrique, réduire leur transpiration et donc leur consommation d'eau, tandis que d'autres vont chercher à maintenir une transpiration élevée en puisant de l'eau plus en profondeur.

Un des points souligné par les auteurs est l'importance de l'indice foliaire sur l'influence du déficit hydrique : en effet, les espèces à fort indice foliaire vont à la fois intercepter une plus grande partie des pluies (ce qui fait que l'apport d'eau pour le sol sera réduit d'autant) et avoir une plus grande capacité de transpiration (donc potentiellement puiser plus d'eau dans le sol). Cela confirme l'intérêt d'élaguer les arbres (donc de réduire leur indice foliaire) pour à la fois mieux les protéger vis-à-vis de la sécheresse, mais également réduire le déficit hydrique dans le sol : cette observation est fondamentale pour les arbres situés près d'une construction et dont l'élagage apparaît ainsi comme un moyen efficace de réduire l'effet sur la dessiccation du sol.

Une des conclusions des différentes expériences menées est que les résineux, du fait de leur feuillage persistant, entraînent un dessèchement du sol plus important que les feuillus en cas de sécheresse, en raison de la plus grande durée de leur période de transpiration et d'une interception plus importante des précipitations pour les conifères.

Breda et al. (2004) proposent par ailleurs différents classements des années de plus forte contrainte hydrique en Lorraine au cours de la période 1950-2003, à partir de simulations conduites dans différentes configurations de peuplement (feuillus à faible ou fort indice foliaire, résineux à fort indice foliaire) et de réserve utile des sols (Illustration 33). Pour les peuplements de feuillus, l'année 2003 apparaît comme la plus sèche des 54 dernières années dans toutes les configurations. Pour les peuplements de résineux, l'année 2003 se classe au 2^{ème} rang pour les sols à réserve utile moyenne et au 5^{ème} rang pour les sols à réserve utile forte. Outre la sévérité de l'année 2003, ces chiffres montrent que suivant les types de sols et de végétation, les déficits hydriques peuvent être plus ou moins importants. Par conséquent, pour une année donnée, cela conduit à des variations en termes de sinistralité sur l'habitat, suivant le

type de végétation à proximité, le type de sols ainsi que d'autres conditions très locales.

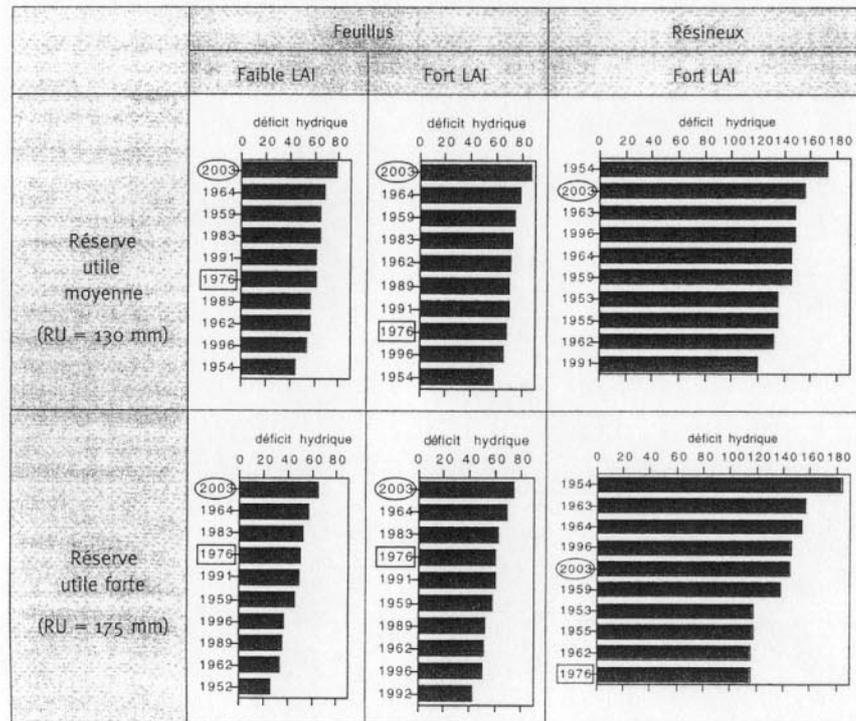


Illustration 33 – Classement par ordre décroissant des 10 années de plus forte contrainte hydrique au cours de la période 1950-2003 (Bréda et al., 2004)

2.4.7. Expériences MUREX (Météo-France)

Calvet et al. (1999) font la synthèse des enseignements tirés de l'expérience MUREX (monitoring the usable soil reservoir experimentally), menée par Météo-France. Le travail, dont l'objectif était d'améliorer et de valider le modèle de calcul SVAT (Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer), s'est basé sur le suivi de nombreux paramètres mesurés sur une parcelle expérimentale située à 30 km de Toulouse, entre 1995 et 1997. Le site est caractérisé par une végétation herbacée et un sol de type sablo-argileux (fraction sableuse de 14 % et argileuse de 28 %, laquelle augmente avec la profondeur pour atteindre 40 % à 1 m de profondeur). Des mesures effectuées à intervalles rapprochés ont porté sur de nombreux paramètres météorologiques (précipitation, température, humidité de l'air, vent, radiation, flux de chaleur,...), ainsi que sur les teneurs en eau dans le sol (par des sondes à neutrons) et les températures dans le sol, tandis que d'autres paramètres ont fait l'objet de mesures plus ponctuelles.

L'illustration 34 présente les précipitations enregistrées sur le site, tandis que l'illustration 35 donne les profils de teneurs en eau volumiques jusqu'à une profondeur de 1,35 m.

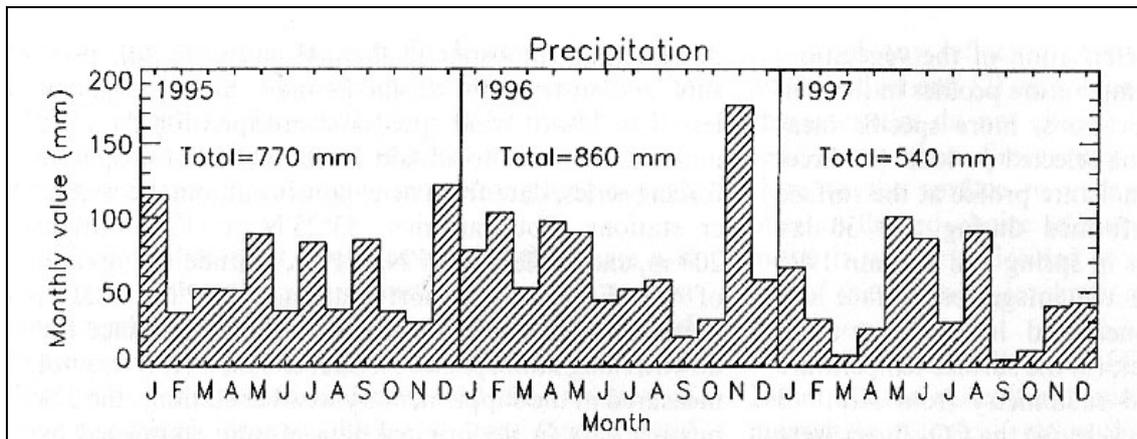


Illustration 34 – Précipitations mensuelles enregistrées sur le site (Calvet et al., 2004)

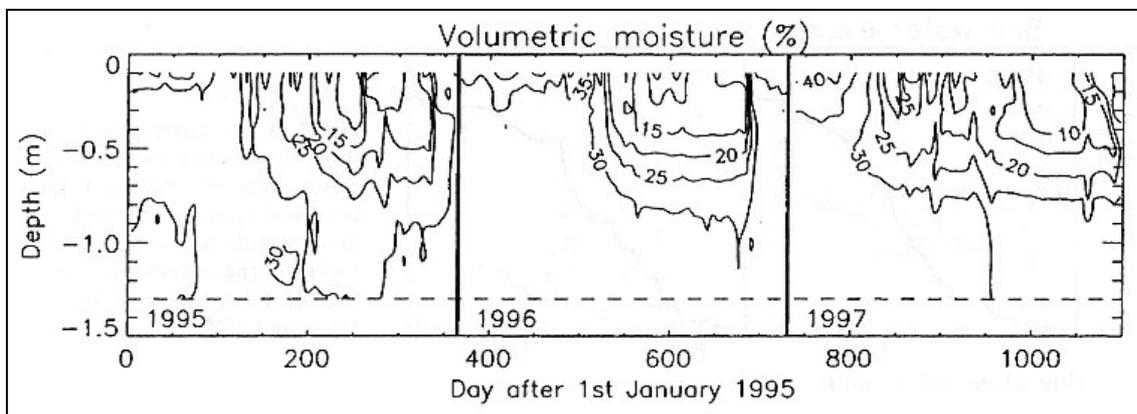


Illustration 35 – Profils de teneurs en eau volumiques mesurées (Calvet et al., 2004)

Les profils de teneur en eau montrent des résultats très différents d'une année à l'autre. Ainsi, en 1996, la dessiccation ne progresse pas au-delà de 1 m de profondeur, tandis qu'entre juillet et septembre 1995, elle dépasse 1,35 m. En 1997, les premiers mois de l'année étant particulièrement déficitaires en précipitations, les teneurs en eau ont diminué brusquement à partir du mois de mars, dans les premiers 80 cm de sol. Les mois de mai et juin, globalement bien arrosés, ont entraîné une stabilisation de la dessiccation, tandis que le mois de juillet, particulièrement sec, a conduit à une progression de la dessiccation en profondeur. Celle-ci a duré jusqu'à la fin de l'année, en raison du déficit de précipitations survenu entre septembre et décembre, si bien qu'en fin d'année 1997 le sol n'était pas revenu à sa teneur en eau correspondant à la capacité au champ.

2.4.8. Synthèse de la bibliographie des expériences de mesures in situ

Les différentes expériences de mesures in situ présentées dans les paragraphes précédents montrent tout d'abord que le nombre de paramètres entrant en ligne de compte pour comprendre la dessiccation dans les sols argileux est très élevé et très

varié puisque concernant à la fois les aspects météorologiques, géologiques et éco-physiologiques. Suivant les expériences, l'accent est mis sur un nombre limité de paramètres, et des hypothèses plus simplifiées sont prises pour les autres. Aucune des expériences ne présente en effet un « couplage complet », avec des mesures détaillées des paramètres concernant la météorologie (comme c'est le cas pour l'expérience menée par Météo-France), la végétation (comme ce qui est fait par l'INRA par exemple) et la géologie jusqu'à plusieurs mètres de profondeur.

Les différentes expériences apportent cependant un grand nombre de résultats qui pourront aider à mieux comprendre les mesures réalisées dans le cadre de ce projet et à les replacer dans un contexte plus global. On peut ainsi retenir les éléments suivants :

- l'influence majeure des arbres sur la dessiccation (à la fois sur son intensité et sur la profondeur atteinte) est mise en évidence dans toutes les expériences ;
- l'ordre de grandeur de la profondeur atteinte par la dessiccation (diminution des teneurs en eau et augmentation de la succion en valeur absolue) ne dépasse pas 1 m à 1,5 m en cas d'absence de végétation ou sous végétation herbacée, tandis qu'en présence d'un ou plusieurs arbres, elle peut atteindre 2 à 8 m de profondeur selon le contexte local, le plus souvent comprise entre 2,5 et 4 m ;
- les variations de la teneur en eau volumique dans les sols induites par la sécheresse sont extrêmement variables en fonction de la profondeur, de la nature lithologique du sol, de la végétation et des caractéristiques de la sécheresse. Plusieurs expériences montrent qu'en présence d'arbres, la teneur en eau volumique peut atteindre des variations annuelles de 15 à 30 % dans les horizons superficiels ;
- les valeurs de succions minimales mesurées sont variables d'une expérience à l'autre, mais peuvent atteindre -1,5 à -3,5 MPa à proximité d'arbres ;
- l'ordre de grandeur des mouvements verticaux du sol, en présence de végétation arborée et dans des climats tempérés, est de plusieurs centimètres (nombreuses valeurs citées comprises entre 3 et 6 cm, mais ces chiffres ne concernent pas forcément une sécheresse exceptionnelle). L'abattage d'arbres peut conduire, sur le long terme, à des gonflements de l'ordre de 10 cm. Dans des climats plus contrastés et sur des argiles particulièrement gonflantes, les déplacements verticaux peuvent atteindre plusieurs dizaines de centimètres ;
- la présence d'arbre peut entraîner des déficits permanents d'humidité dans le sol, à la fois parce qu'ils contribuent à assécher des horizons plus profonds qui ne seront donc pas forcément réhumidifiés par les précipitations ultérieures, et aussi parce que la dessiccation étant plus intense, les quantités d'eau prélevées par l'arbre en période végétative ne seront pas systématiquement compensés au cours de l'hiver suivant. On peut donc observer des effets cumulatifs d'une année sur l'autre. Ceci a été effectivement mis en évidence par plusieurs expériences in situ qui constatent que, lors d'une année sèche, la teneur en

eau en fin de période hivernale suivante ne revient pas systématiquement au niveau de la capacité au champ ;

- le rayon d'influence des arbres varie d'une espèce à l'autre et dépend également du type de sol et des conditions météorologiques. Des distances d'influence maximales de l'ordre de 1 à 1,5 fois la hauteur de l'arbre ont été observées pour beaucoup d'espèces, mais dans de nombreux cas, les rayons d'influence ne dépassent pas 0,4 à 1 fois la hauteur de l'arbre ;
- enfin, les stratégies des différentes espèces d'arbres pour résister à la sécheresse sont variables (enracinement profond, contrôle efficace ou précoce de l'ouverture stomatique, système conducteur peu vulnérable à la cavitation, tissus tolérant des potentiels hydriques faibles, capacité d'ajustement de la surface foliaire par chute précoce des feuilles ou des aiguilles), ce qui se traduit par des niveaux très variables de dessiccations du sol en période sèche.

3. Caractéristiques du matériel de mesure

3.1. LES CAPTEURS D'HUMIDITE

3.1.1. Caractéristique des capteurs utilisés

Les cannes Humitub sont équipées de capteurs Humilog développés par le BRGM en 1995 qui permettent à la fois la mesure de l'humidité (capteurs capacitifs) et de la température d'un sol. Cet instrument se présente sous la forme d'une canne à insérer verticalement dans le sol et comportant un nombre variable de capteurs, composés chacun de deux électrodes annulaires séparées par une bague isolante de largeur prédéterminée (Illustration 36).

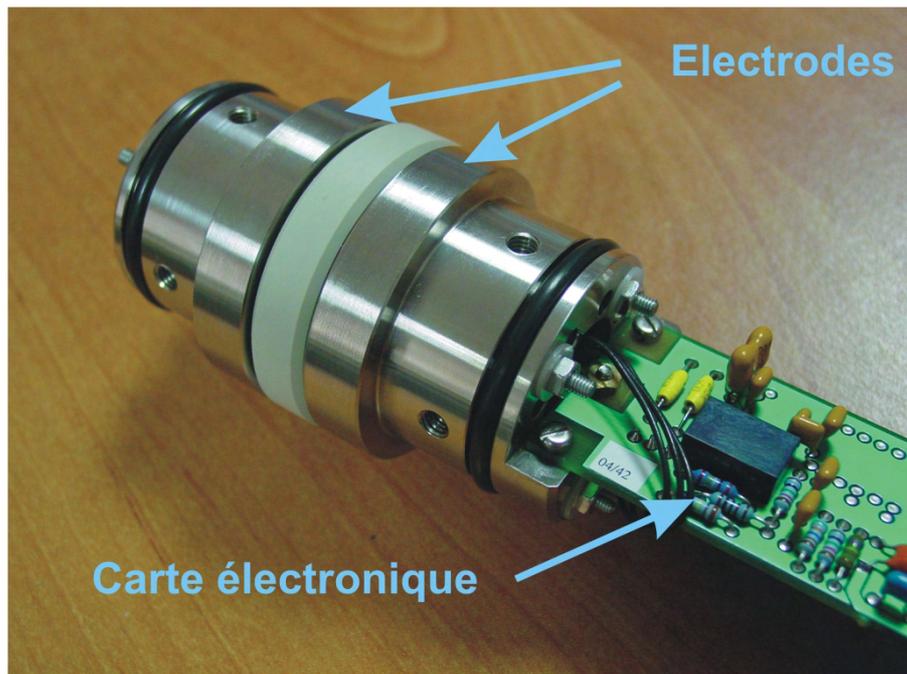


Illustration 36 – Sonde Humitub (photo MINAUS S.A.)

Pour chaque capteur, la mise sous tension des électrodes a pour effet de charger le condensateur qu'elles constituent avec le sol environnant comme diélectrique. Les études réalisées lors de la mise au point de cet appareillage ont permis d'estimer le volume de mesure comme étant un cylindre d'un rayon d'environ 15 cm centré sur le capteur. Il est alors possible de caractériser la permittivité du sol contenu dans ce volume de mesure, puis d'en déduire son humidité, la permittivité du milieu étant directement fonction de sa teneur en eau.

Différentes configurations des capteurs Humitub peuvent être envisagées selon les besoins. Il est en effet possible de modifier les caractéristiques géométriques des capteurs afin de s'adapter à la précision désirée. Les deux principaux paramètres modifiables sont le diamètre des électrodes annulaires (donc de la canne) et l'espacement entre les deux électrodes du capteur (Illustration 37).

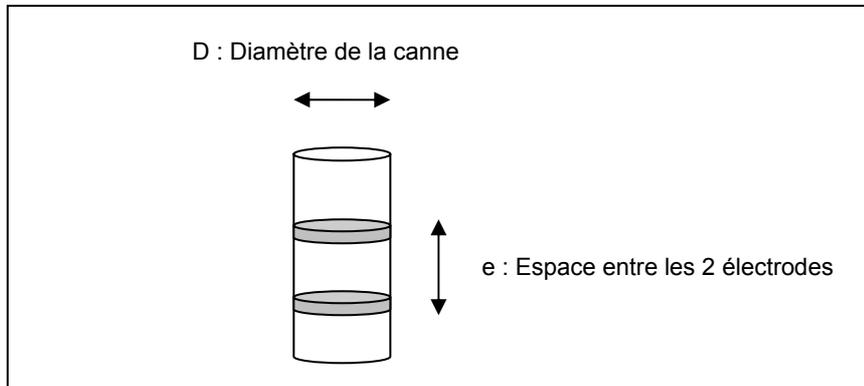


Illustration 37 - Paramètres géométriques des capteurs

Les premières cannes Humitub conçues par le BRGM présentaient un diamètre de 43 mm et un écart entre les électrodes de 10 mm. Cependant, pour des raisons pratiques (en particulier pour s'adapter au diamètre de la tarière disponible pour l'installation), les cannes choisies dans le cadre du présent projet présentent quant à elles un diamètre de 50 mm. Cette augmentation de diamètre permet d'améliorer la sensibilité du capteur en augmentant la surface de contact entre le capteur et le sol.

Concernant la validité des mesures effectuées, la précision annoncée pour les capteurs d'humidité de la canne Humitub est de l'ordre de 1 %, ce qui s'avère amplement suffisant compte tenu des conditions expérimentales.

3.1.2. Système d'acquisition des mesures

L'interrogation des capteurs est déclenchée par une centrale d'acquisition de type Osiris. Celle-ci, par l'intermédiaire de multiplexeurs à 16 voies, va interroger successivement chacun des capteurs, après un temps de chauffage d'environ 30 secondes pour chacun. Les résultats, exprimés en intensité comprise entre 4 et 20 mA (en raison de la présence d'un convertisseur 4-20) sont stockés par la centrale Osiris et peuvent ensuite être téléchargés à distance toutes les semaines via un modem GSM. Le schéma suivant illustre la structure du montage (Illustration 38). En **Bleu** sont représentés les fils permettant l'alimentation (en amont et en aval de la centrale OSIRIS) et l'horloge (en aval de la centrale OSIRIS). En **Rouge** sont représentées les voies de commande. En **Vert** sont représentées les voies d'interrogation des différents capteurs. Chaque site dispose ainsi de deux multiplexeurs (un pour chaque grappe de capteurs). Le multiplexeur est placé dans une armoire électrique à proximité de la grappe de capteurs correspondante, le plus éloigné de la centrale OSIRIS étant monté en aval du plus proche de la centrale, par l'intermédiaire de câbles enterrés. La description de l'installation des sites sera reprise plus précisément dans les paragraphes 5.5 et 6.5, relatifs respectivement aux sites de Mormoiron et du Deffend.

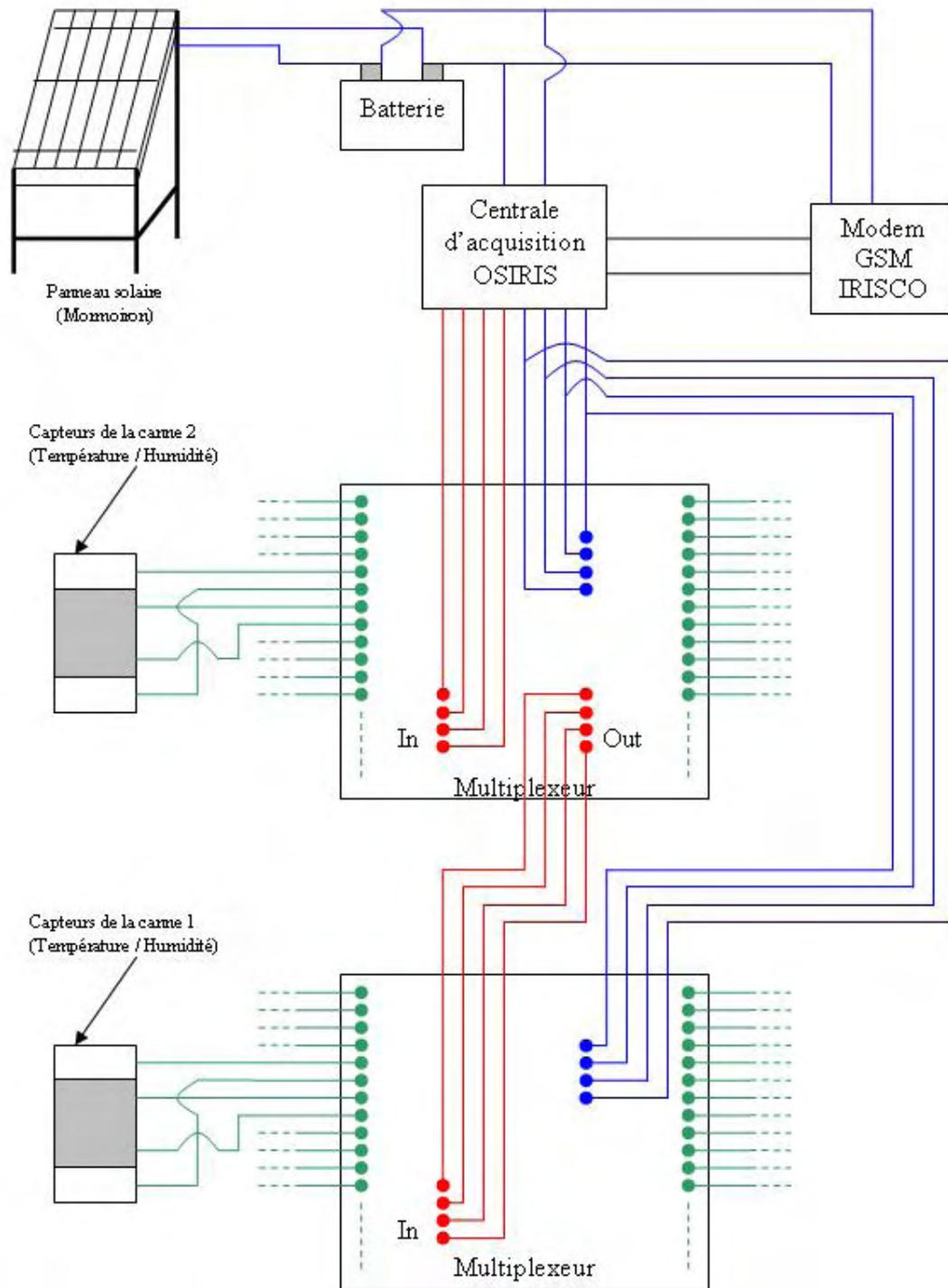


Illustration 38 – Schéma global du dispositif de mesure (site de Mormoiron)

3.1.3. Test de fonctionnement des capteurs

Afin de tester le fonctionnement des capteurs de manière qualitative, une sonde Humitub a été installée au laboratoire du BRGM à Marseille dans une cuve d'environ 80 litres remplie d'argile remaniée prélevée sur le site de Mormoiron et sommairement compactée. Alors que des ajouts d'eau progressifs étaient réalisés, des acquisitions ont été effectuées à intervalles de temps réguliers, afin de vérifier la réponse des capteurs suite à une augmentation de l'humidité du sol.

Un exemple de résultats obtenus est présenté sur l'illustration 39 à titre illustratif.

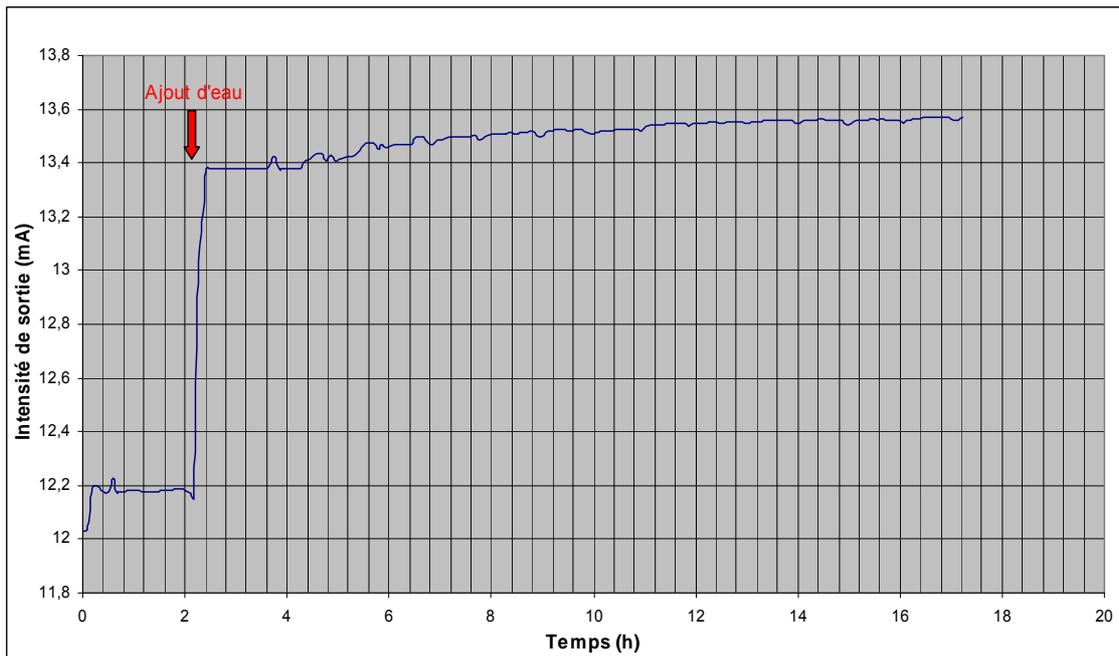


Illustration 39 – Évolution de l'intensité en sortie des capteurs suite à un ajout d'eau

La variation brutale de permittivité qui apparaît lors de l'ajout d'eau dans la cuve illustre donc la validité du processus. On remarquera qu'après cette brusque variation, la permittivité, bien que plus stable, continue à augmenter progressivement avant de se stabiliser totalement. Cela correspond aux phénomènes consécutifs à la présence d'eau, tels que l'infiltration, la succion...

3.1.4. Difficultés de fonctionnement

Contacts entre les capteurs et le sol environnant

Une des difficultés d'utilisation des capteurs Humitub, commune à tous les systèmes de mesure capacitifs, réside dans leur implantation dans le sol : afin de garantir un bon fonctionnement des capteurs, il est en effet nécessaire d'assurer un très bon contact entre chacun d'entre eux et le sol qui l'entoure. Cette condition s'avère particulièrement

difficile à contrôler pour des capteurs situés à plusieurs mètres de profondeur. Or, tout défaut d'installation peut conduire à la création d'un vide entre le capteur et le sol, susceptible de se remplir d'eau suite à des infiltrations, ce qui conduit alors à des mesures aberrantes durables au niveau des capteurs concernés. Par ailleurs, même si le contact entre le capteur et le sol est assuré lors de la mise en place, les phénomènes de retrait consécutifs à la dessiccation du sol sont également de nature à provoquer l'apparition d'un espace interstitiel autour de la canne de mesure, ce qui altère la qualité de la mesure et est également à l'origine de circulations préférentielles le long des capteurs en cas de réhumidification brutale.

Gamme de variation des mesures

Les cartes électroniques destinées à gérer le signal de sortie des capteurs présentent une plage de mesure limitée aux intensités comprises entre 4 et 20 mA. Pour permettre une exploitation des capteurs dans leur pleine échelle, cette plage doit permettre de couvrir une gamme de permittivités comprises entre 1 (air sec) et 80 (eau pure), ce qui était bien le cas des premiers modèles d'Humitub conçus par le BRGM (avec néanmoins des problèmes ponctuels de saturation pour des teneurs en eau élevées).

Toutefois, l'augmentation du diamètre des cannes, adoptée dans le cadre du présent projet pour des raisons de mise en œuvre, a eu pour effet de « dilater » les variations du signal de sortie par augmentation de la sensibilité. Ainsi, si les faibles permittivités restent mesurables, il s'avère impossible d'effectuer des mesures de permittivité dans des sols trop humides, où la mesure correspondrait à une intensité supérieure à 20 mA : le signal de sortie est alors instable, et le capteur est dit « en saturation ».

Une fois cette difficulté identifiée lors des premières mesures sur le site de Mormoiron, il a été décidé d'augmenter l'écartement entre les électrodes pour les capteurs du second site expérimental, afin de réduire artificiellement la sensibilité des mesures et compenser ainsi l'effet lié à l'augmentation de diamètre. La distance entre les électrodes a donc été portée à 11,8 mm sur les capteurs du site du Deffend, alors qu'il n'était que de 10 mm sur les capteurs de Mormoiron. Cette modification a malheureusement également entraîné une augmentation de l'offset (c'est à dire du signal de sortie à vide, donc dans l'air) qui annule finalement les effets de la modification, puisque cette hausse compense sensiblement le gain réalisé sur la plage des permittivités mesurables.

Ce phénomène, qui explique certaines des difficultés rencontrées lors des phases d'étalonnages et d'expérimentation des capteurs, est notamment visible sur le graphique de l'illustration 40 qui présente un exemple de mesures réalisées lors de l'approche qualitative en laboratoire. Alors que les mesures effectuées par les capteurs étaient tout à fait stables, un brusque ajout d'eau (environ 3 litres dans une cuve de 80 litres de matériau argileux prélevé sur le site de Mormoiron) génère tout d'abord une perturbation instantanée du signal (liée directement au passage de l'eau et aux infiltrations le long de la canne), puis une stabilisation suivie d'une augmentation rapide de l'humidité mesurée sous l'effet de la diffusion, et enfin une saturation du capteur liée à une trop forte teneur en eau. Contrairement à la perturbation directement liée à l'infiltration de l'eau, qui se révèle temporaire, la saturation se révèle quant à elle

beaucoup plus durable car elle est liée à l'état d'humidité du sol environnant. On notera que cette saturation intervient à partir d'une mesure de sortie inférieure à 13,8 mA, et non de 20 mA. L'origine de cette saturation précoce n'est pas encore clairement identifiée, mais il est probable que ce soit la combinaison de la géométrie du capteur avec les caractéristiques d'un sol argileux qui induise cette limitation des mesures.

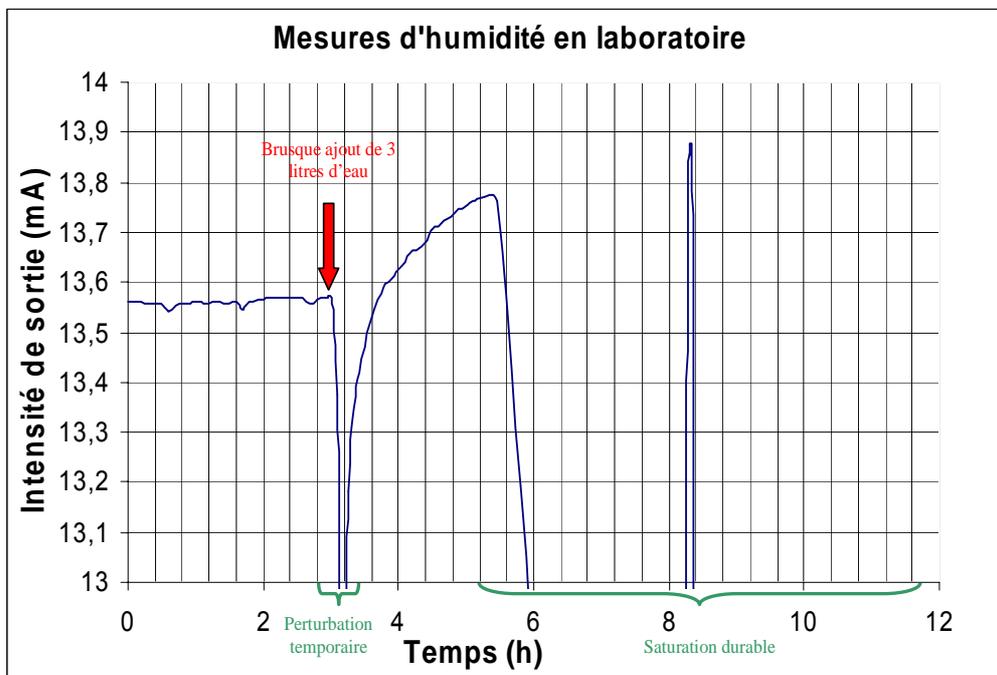


Illustration 40 - Évolution de l'intensité en sortie des capteurs en présence d'une variation d'humidité (mesures en laboratoire)

3.1.5. Etalonnage de la canne Humitub

Afin de convertir le signal brut issu des capteurs Humitub en teneur en eau, il est nécessaire de recourir à un étalonnage adapté au type de capteur. Une méthode d'étalonnage est ici proposée, pour les deux configurations de capteurs utilisées sur les sites expérimentaux (Mormoiron : diamètre de 50 mm et espace inter électrodes de 10 mm ; Le Deffend : diamètre de 50 mm et espace inter électrodes de 11,8 mm).

Lors de la conception des capteurs Humitub, il a été constaté que l'intensité électrique qui constitue le signal de sortie des capteurs est quasi-proportionnelle à la permittivité électrique du sol. La première étape de l'étalonnage consiste à établir la relation linéaire qui lie le signal de sortie du capteur à la permittivité du milieu. Dans un second temps, on pourra relier cette permittivité à la teneur en eau du milieu, grâce en particulier à la relation établie par Weiller et al. (1998).

La relation entre l'intensité de sortie du capteur et la permittivité relative du milieu avec lequel il est en contact est établie au moyen d'un étalonnage dans des milieux homogènes dont le permittivité est connue. Ce type de calibrage a été réalisé en

collaboration avec MINAUS S.A. dans les locaux du laboratoire du BRGM à Orléans en juillet 2005 et février 2006, en utilisant une canne Humitub étalon d'une longueur de 1 m, comportant un capteur unique placé à son extrémité. Les mesures ont été réalisées avec les deux configurations de capteurs mis en oeuvre sur site et dans trois milieux différents de caractéristiques parfaitement connues : dans l'azote ou l'air sec (permittivité = 1), dans l'éthanol (permittivité = 25) et dans l'eau déminéralisée (permittivité = 80). La courbe d'étalonnage peut alors être représentée par deux segments de droite (relation linéaire entre $k = 1$ et $k = 25$, puis relation linéaire entre $k = 25$ et $k = 80$). Ces deux relations linéaires sont généralement très proches, la pente des droites d'étalonnage diminuant légèrement lorsque la permittivité dépasse 25.

Dans chaque cas, la canne Humitub a été disposée dans le fluide considéré en limitant au maximum les interactions avec les parois du récipient, ce qui suppose un volume de fluide relativement important (Illustration 41).



Illustration 41 – Étalonnage de la canne Humitub dans un bac d'eau distillée

Pour chaque fluide étalon, une série de mesures a ainsi été réalisée afin d'estimer aussi l'ordre de grandeur des fluctuations enregistrées. Le tableau suivant (Illustration 42) présente l'intensité moyenne de sortie pour chaque capteur, ainsi que l'ordre de grandeur des écarts relatifs entre les mesures :

Configuration du capteur	Fluide étalon	Intensité moyenne en sortie (mA)	Fluctuations maximales observées sur les mesures (%)
D = 50 mm e = 10 mm (Mormoiron)	Air (k=1)	8,084	0,0519
	Ethanol (k=25)	14,331	0,418
	Eau (k=80)	Non significatif	11,7
D = 50 mm e = 11,8 mm (Poitiers)	Air (k=1)	8,458	0,097
	Ethanol (k=25)	14,566	1,31
	Eau (k=80)	Non significatif	Dérive du signal

Illustration 42 – Tableau des résultats obtenus pour l'étalonnage des capteurs Humitub

Compte tenu des faibles fluctuations observées, les mesures réalisées dans l'air et dans l'éthanol semblent particulièrement fiables. En revanche, dans l'eau les mesures montrent des fluctuations très importantes et une dérive du signal de sortie qui rendent les mesures non significatives. Ces fluctuations sont liées aux limites de la carte d'acquisition, qui ne peut renvoyer un signal de sortie de plus de 20 mA, d'où une saturation du capteur et un signal de sortie sans réalité physique.

Les mesures d'étalonnage effectuées dans l'eau n'ayant pas de réalité physique du fait de la saturation des capteurs, il est impossible de calculer les paramètres de la relation linéaire qui lie le signal de sortie et la permittivité lorsque cette dernière dépasse 25. Sachant que les deux segments de droite qui constituent la courbe d'étalonnage ont quasiment la même pente, on supposera donc que la relation linéaire d'étalonnage établie pour des permittivités comprises entre 1 et 25 reste valable sur toute la gamme de mesures possibles. Ceci est d'autant plus justifié que les intensités de sortie observées sur les deux sites de mesure expérimentaux sont dans leur grande majorité inférieures à 14 mA (sauf dans les périodes de saturation où ces mesures ne sont plus significatives), ce qui reste dans la plage de mesure pour laquelle la droite d'étalonnage est valable. La courbe d'étalonnage est donc supposée parfaitement linéaire et donnée par les graphiques de l'illustration 43.

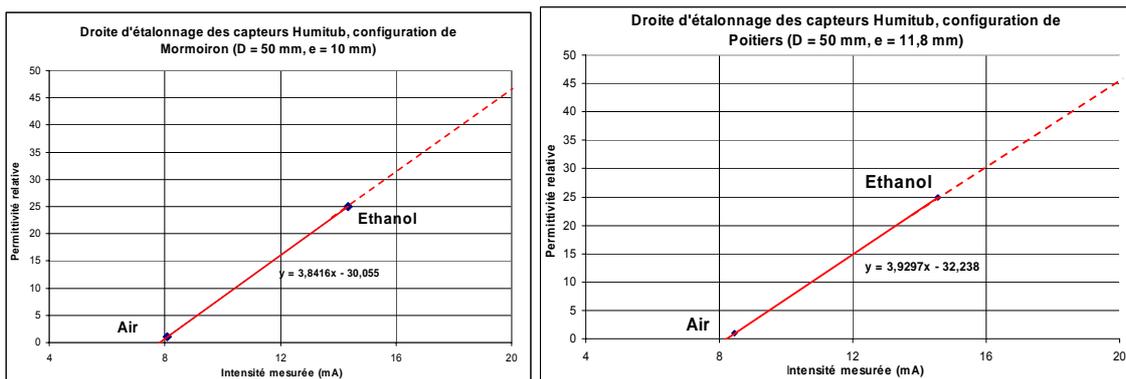


Illustration 43 – Droite d'étalonnage des capteurs Humitub

Ces droites d'étalonnage permettent de transcrire la mesure issue des capteurs Humitub en permittivité relative du milieu. On observe également que la saturation des capteurs doit intervenir lorsque l'intensité débitée est de 20 mA, ce qui correspond à une permittivité de l'ordre de 46 à Mormoiron et de l'ordre de 45 à Poitiers, et qu'une permittivité relative nulle (matériau totalement isolant) induit une intensité délivrée de l'ordre de 7,5 mA à Mormoiron, et de l'ordre de 8,5 mA à Poitiers.

Comme cela a été expliqué plus haut au sujet des difficultés de fonctionnement, on remarque que le coefficient directeur de la droite d'étalonnage est légèrement plus élevé à Poitiers, ce qui traduit un capteur légèrement moins sensible que celui de Mormoiron. Cependant, cette diminution de la sensibilité s'est avérée insuffisante pour permettre des mesures de permittivité équivalentes à celle de l'eau pure ($k = 80$), en partie en raison de l'offset, qui s'est trouvé quant à lui légèrement augmenté.

On retient donc finalement les paramètres suivants pour l'étalonnage des capteurs :

Configuration	Gamme d'intensités de sortie (en mA)	Permittivité relative maximale mesurable	Equation de la droite d'étalonnage (k la permittivité relative et I l'intensité de sortie en mA)
Mormoiron	8 - 20	46,5	$k = 3,8416 \times I - 30,055$
Poitiers	8,5 - 20	45	$k = 3,9297 \times I - 32,238$

L'exploitation des résultats nécessite ensuite de pouvoir transposer les permittivités relatives k issues des capteurs Humitub en teneurs en eau que l'on notera W . On utilise pour cela la relation proposée par Weiller et al. (1998), très proche de celle établie antérieurement par Topp et al. (1980) mais vraisemblablement plus fiable pour des teneurs en eau dépassant 40 %.

Cette relation est de la forme $k = (7,62 W_v + 1,71)^2$, dans laquelle W_v désigne la teneur en eau volumique du sol.

Pour faciliter l'interprétation des résultats, il convient de convertir cette teneur en eau volumique en teneur en eau massique, paramètre communément utilisé en géotechnique et facilement mesuré en laboratoire. Cette étape nécessite un certain nombre d'essais en laboratoire, à partir d'échantillons prélevés sur les sites, afin de déterminer notamment la densité apparente du matériau et son indice des vides. Ces essais n'ayant pas encore été réalisés dans le cas du site de Poitiers, et l'hétérogénéité des sols qui s'y trouvent rendant hasardeuses les hypothèses prises par la suite, la conversion proposée ici ne concerne que le site de Mormoiron.

Les essais de laboratoire doivent être effectués sur plusieurs prélèvements, éventuellement partiellement séchés afin de caractériser au mieux le comportement du matériau. Les essais réalisés correspondent aux mesures de :

- la teneur en eau massique (W_{massique}), obtenue par différence de masse après séchage total de l'échantillon ;
- la densité sèche (ρ_s), obtenue par pycnométrie ;
- la densité apparente (ρ_{app}) obtenue par pesée dans différents fluides et calcul de la poussée d'Archimède.

Ces essais permettent, pour chacun des échantillons, de caractériser l'indice des vides et la teneur en eau volumique, grâce aux relations suivantes :

Calcul de l'indice des vides (e) :

$$\rho_{\text{app}} = \frac{m_{\text{tot}}}{V_{\text{tot}}} = \frac{m_{\text{sec}} + m_{\text{eau}}}{V_{\text{sec}} + V_{\text{vide}}} = \rho_s \times V_{\text{sec}} \times \frac{1 + W_{\text{massique}}}{V_{\text{sec}} + V_{\text{vide}}} = \rho_s \times \frac{1 + W_{\text{massique}}}{1 + e}$$

$$\Rightarrow e = \rho_s \times \frac{1 + W_{\text{massique}}}{\rho_{\text{app}}} - 1$$

Calcul de la teneur en eau volumique :

$$W_{\text{volumique}} = \frac{V_{\text{eau}}}{V_{\text{tot}}} = \frac{V_{\text{eau}}}{V_{\text{sec}} + V_{\text{vides}}} = \frac{1}{\frac{1}{\rho_s \times W_{\text{massique}}} + \frac{e}{\rho_s \times W_{\text{massique}}}} = \frac{\rho_s \times W_{\text{massique}}}{1 + e}$$

Les résultats moyens obtenus sur plusieurs échantillons prélevés à diverses dates sur le site de Mormoiron sont indiqués dans le tableau ci-après (Illustration 44).

Echantillon	Indice des vides e	Porosité n	Densité sèche	Densité apparente	Degré de saturation (%)	W _{massique} (%)	W _{volumique} (%)
1	0,613	0,380	1,618	1,978	94,8	22,3	36
2	0,557	0,358	1,676	2,004	91,6	19,5	32,8
3	0,880	0,468	1,388	1,807	89,4	30,1	41,9
4	0,838	0,456	1,420	1,851	94,4	30,3	43
5	0,815	0,449	1,438	1,893	101,4	31,7	45,6
6	0,515	0,340	1,723	2,040	93,2	18,4	31,7
7	0,768	0,434	1,476	1,868	90,2	26,5	39,2
8	0,470	0,320	1,776	2,057	87,9	15,8	28,1

Illustration 44 – Moyenne des résultats des essais sur 8 échantillons prélevés à Mormoiron

Il est alors possible, en considérant le matériau comme homogène sur le site, d'en déduire, en première approximation, une relation entre la teneur en eau massique et la teneur en eau volumique du sol. Cette relation est quasi linéaire dans la gamme des variations usuelles, comme le montre le tracé ci-dessous (Illustration 45).

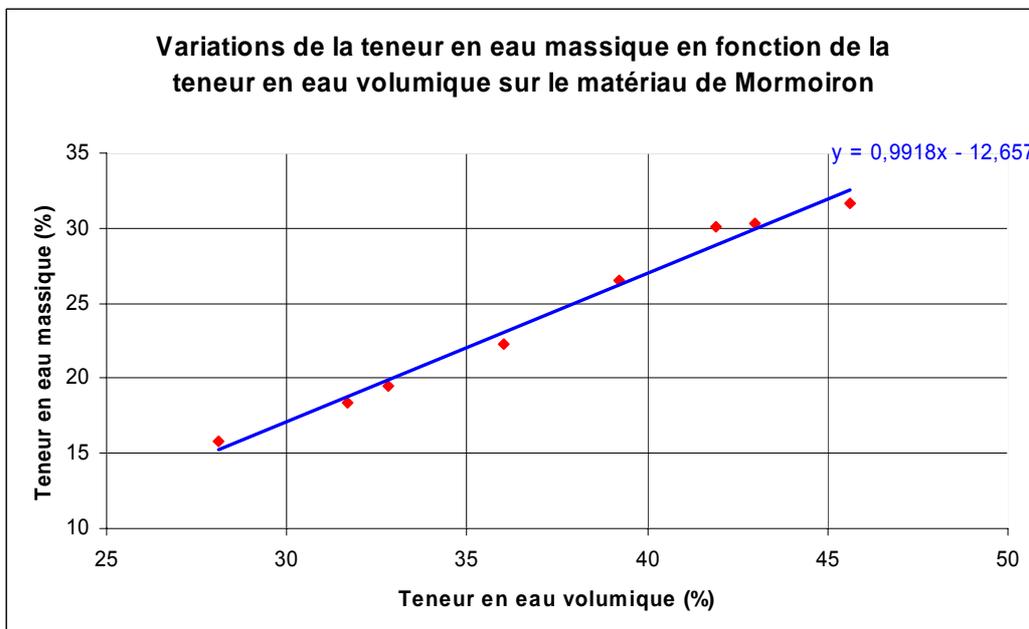


Illustration 45 – Relation expérimentale entre teneur en eau volumique et teneur en eau massique pour le matériau de Mormoiron

Sur la gamme de valeurs ici représentée, la relation entre les deux types de teneurs en eau est quasi linéaire, selon l'expression suivante :

$$W_m = 0,9918 \times W_v - 12,657$$

Cette conversion peut être appliquée aux mesures de chacun des capteurs du site de Mormoiron, en supposant toutefois une certaine homogénéité du terrain, afin de pouvoir considérer que le sol autour de chaque capteur suit la loi précédente.

On notera toutefois qu'il est impossible de généraliser l'hypothèse d'une relation linéaire entre la teneur en eau massique et la teneur en eau volumique : dans le cas particulier du matériau de Mormoiron, les faibles variations de la masse volumique apparente avec la teneur en eau permettent d'obtenir ce résultat, mais cette hypothèse ne peut être étendue inconsidérément.

Moyennant ces différentes hypothèses, la conversion des mesures d'intensité issues des capteurs Humitub en teneur en eau volumique du sol environnant peut se faire selon la courbe suivante (Illustration 46).

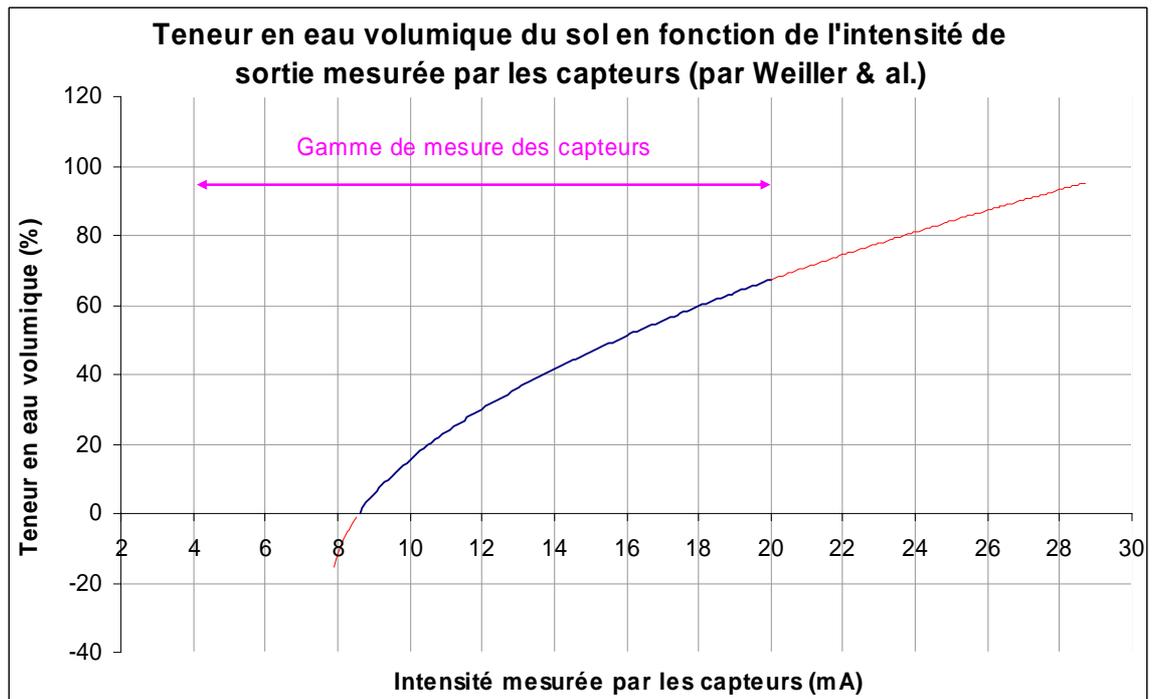


Illustration 46 – Courbe de conversion des intensités de sortie des capteurs Humitub en teneurs en eau massique pour le site de Mormoiron

Cette courbe illustre bien les limites de fonctionnement des capteurs, imposées par le convertisseur 4-20 mA : les capteurs présentent un offset (c'est à dire une intensité de sortie pour une teneur en eau nulle) relativement élevé, empêchant l'émission d'un signal de sortie compris entre 4 et 8,5 mA, ce qui réduit de fait la gamme de sensibilité des capteurs pour de faibles teneurs en eau. Par ailleurs, aucune mesure ne peut être

envisagée pour des teneurs en eau volumiques supérieures à 67 % (54 % en massique). Cette dernière limite ne constitue cependant pas un handicap pour les mesures de terrain puisqu'une telle teneur en eau est rarement atteinte in situ avec le type de matériau investigué (toutefois, la divergence des capteurs semble intervenir bien avant cette valeur seuil).

Ces mesures d'étalonnage sont bien entendu à préciser et à poursuivre en procédant en particulier à des calages directs par suivi en laboratoire de la permittivité mesurée par capteur Humitub placé dans une cuve de matériau prélevé sur site et mis en place à une densité proche de celle mesurée in situ mais avec une teneur en eau soigneusement contrôlée. Un tel programme d'essai est programmé au cours de l'été 2006. Par ailleurs, d'autres étalonnages avec différents systèmes de suivi des teneurs en eau in situ (sondes TDR et sondes à neutrons) sont envisagés sur les deux sites expérimentaux. Enfin, des essais en laboratoire similaires à ceux entrepris pour le matériau de Mormoiron sont prévus pour le site du Deffend. Dans l'attente de ces différents résultats, et par souci de prudence, les résultats expérimentaux présentés dans la suite du présent rapport seront exprimés en intensités de sortie (résultats bruts) sans exploiter la courbe d'étalonnage en teneurs en eau.

3.2. LE PLUVIOMETRE

Compte tenu des différences de conditions géomorphologiques caractérisant le site expérimental de Mormoiron et la station Météo-France de Carpentras pourtant relativement proche, il a été décidé d'équiper directement le site avec un pluviomètre. La photo ci-dessous (Illustration 47) illustre l'implantation de cet instrument, à proximité de la canne 2, en aval de la parcelle.



Illustration 47 – Situation du pluviomètre sur le site de Mormoiron

Le fonctionnement de ce pluviomètre est relativement simple : l'eau recueillie sur la surface du pluviomètre remplit un récipient de mesure (auget) qui, lorsqu'il est plein, bascule sous son propre poids. Une carte d'acquisition compte alors le nombre de basculements, qui correspondent chacun à un volume d'eau donné. Afin d'éviter une trop longue interruption du recueil d'eau lors du basculement, l'auget de remplissage est doublé afin que le relais des basculements se déroule le plus rapidement possible.

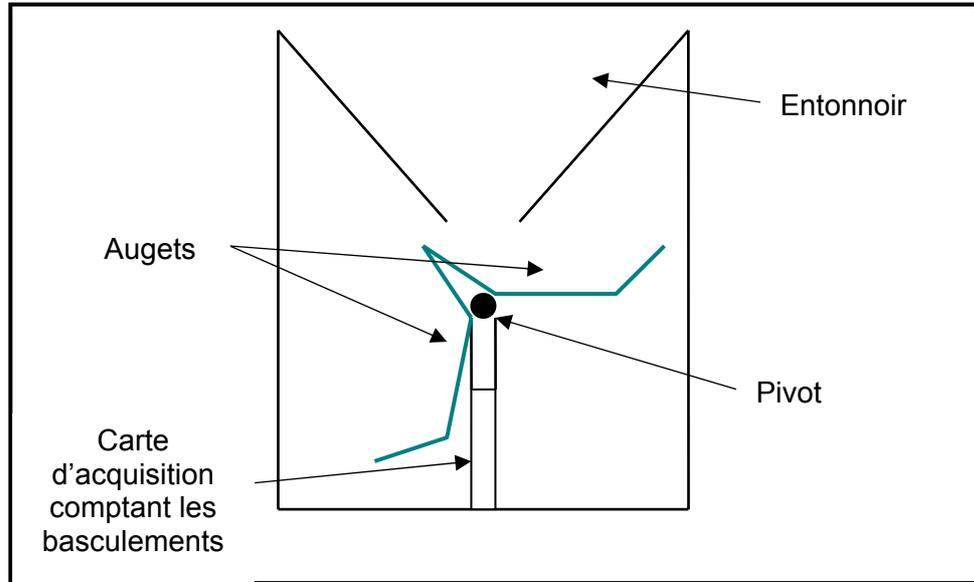


Illustration 48 – Schéma de principe du pluviomètre installé sur le site de Mormoiron

Chaque basculement des augets correspond à une augmentation de la tension de sortie d'environ 1 mV, le volume de chaque auget correspondant à 0,5 mm de pluie. On note également que la tension délivrée en sortie du pluviomètre fait apparaître un offset dont la valeur varie selon le reste du circuit (cannes Humitub, multiplexeurs...). La conversion de la tension de sortie du pluviomètre en hauteur de pluie se fait donc par soustraction de l'offset correspondant à l'absence de précipitations, puis par comptage du nombre de basculements des augets :

$$h_{\text{pluie}} = \frac{U_{\text{sortie}} - U_0}{U_{\text{basculement}}} \times V_{\text{auget}}$$

Où h_{pluie} désigne la hauteur des précipitations, U_{sortie} la tension constituant le signal de sortie du pluviomètre, U_0 l'offset du pluviomètre (i.e. la tension de sortie en l'absence de précipitations), $U_{\text{basculement}}$ la tension correspondant à un basculement des augets (soit 1 mV) et V_{auget} le volume de chaque auget exprimé en hauteur de pluie (soit 0,5 mm d'eau).

On notera également que l'offset U_0 est conditionné par l'ensemble du montage expérimental. Cet offset peut donc être modifié lors d'interventions sur le reste du système. Il se situe en général entre 1,5 mV et 2,5 mV.

4. Sélection des sites expérimentaux

4.1. OBJECTIFS ET CRITERES DE SELECTION

Le cahier des charges de l'étude prévoyait l'installation sur deux sites de mesures d'une instrumentation destinée au suivi de l'humidité dans des sols argileux. Sur chacun de ces deux sites, il est prévu d'installer en forage deux séries de capteurs Humitub, afin de suivre en continu les teneurs en eau dans le sol jusqu'à une profondeur de 7 m et de les corrélérer aux données météorologiques. Pour chacun des sites, une série de capteurs doit se trouver à proximité d'un arbre et l'autre éloignée de toute végétation, afin de visualiser l'impact de la végétation arborée sur les déficits hydriques dans le sol.

Le projet prévoit d'instrumenter un site en climat méditerranéen (caractérisé par une forte amplitude thermique annuelle et des précipitations rares mais de forte intensité en période automnale, ainsi que par une végétation adaptée aux périodes de sécheresse) et un autre en climat océanique ou semi-continentale (caractérisé par des écarts de températures légèrement moindres et surtout par des précipitations plus fréquentes tout au long de l'année mais d'intensité plus limitée).

Le choix des sites à instrumenter a été guidé par un certain nombre de critères :

- présence d'argile riche en smectites sur au moins 8 m d'épaisseur
- lithologie la plus homogène possible sur les 8 premiers mètres
- absence de nappe au moins jusqu'à cette profondeur
- zone présentant une forte sinistralité attribuée aux phénomènes de retrait-gonflement des argiles
- proximité avec une station météorologique pour les données climatologiques
- bonnes conditions pratiques de mise en œuvre : accord du propriétaire, site sécurisé, non inondable et facilement accessible
- possibilité de laisser le matériel en place pendant au moins 18 mois et si possible 3 ans (selon financements disponibles)
- si possible facilités pour l'alimentation électrique et la transmission des données par voie filaire.

4.2. DEMARCHE POUR LE CHOIX DES SITES

Parmi ces nombreux critères de sélection des sites, ceux qui sont apparus prépondérants sont la géologie, la proximité avec une station météorologique et les conditions pratiques de mise en œuvre.

L'autre critère jugé important est lié au statut patrimonial des sites potentiels. Il est en effet apparu indispensable de trouver des terrains dont le propriétaire non seulement autorise à procéder aux forages pour la reconnaissance préalable et l'installation du matériel de mesure, mais surtout donne une garantie quant à la durée pendant laquelle

ce matériel pourra être maintenu. Dans la pratique, ceci exclut quasiment toute possibilité d'installation dans une propriété privée appartenant à un particulier, en raison de la contrainte liée à l'installation elle-même (réalisation de sondages, de prélèvements, de tranchées pour le passage des câbles,...) et surtout du fait du risque de non-pérennité d'un tel site (en cas de revente du terrain ou de changement d'avis du propriétaire quant à l'utilisation du site).

La recherche de sites potentiels s'est donc orientée vers des terrains appartenant soit directement au BRGM, soit à d'autres organismes impliqués dans cette même thématique, soit encore à des collectivités locales.

La démarche pour effectuer le choix des sites a donc consisté à cibler ce type de terrains dans des secteurs où la géologie correspondait aux critères de sélection et à proximité des stations météorologiques déjà opérationnelles (étant entendu que le budget disponible et la durée prévisionnelle de l'instrumentation ne permettaient pas d'envisager l'installation d'une station complète d'observation météorologique). L'aboutissement de ces démarches a donc nécessité de nombreux contacts avec différents organismes, pour leur présenter le projet de recherche et déterminer si une de leurs implantations pouvait correspondre aux critères de sélection du site ou s'ils pouvaient nous orienter vers d'autres sites potentiels.

Parmi les différents organismes qui ont été contactés, on peut citer :

- le CEMAGREF à Aix-en-Provence (JP. Testemale et C. Isberie) ;
- Météo-France : une réunion a été organisée le 29 avril 2004 à Toulouse avec P. Durand, JP. Goutorbe et M. Blanchard, qui a permis d'échanger sur les différentes études menées par les deux organismes sur la thématique et d'évoquer l'opportunité d'installer un site de mesure du projet sur une des implantations de Météo-France ;
- l'INRA Versailles : une réunion s'est tenue avec D. Tessier le 3 mai 2004 à Versailles, afin là aussi d'échanger sur les différentes études menées par les deux organismes sur la thématique et d'évoquer l'opportunité d'installer un site de mesure du projet sur un site appartenant à l'INRA ou à d'autres organismes avec lesquels il est en contact (ONF, Bergerie Nationale de Rambouillet, Office de la chasse d'Auffargis, Chambre d'agriculture d'Eure-et-Loir, etc.) ;
- le LROP (Laboratoire Régional de l'Ouest Parisien) : contact avec E. Corona au sujet du site de Trappes et de ses environs ;
- ESIP (École Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers) : rencontre avec A. Pantet le 20 janvier 2005 pour le site du Deffend.

Les directeurs des Services Géologiques Régionaux du BRGM implantés dans des régions potentiellement intéressantes (Provence-Alpes-Côte d'Azur, Languedoc-Roussillon, Midi-Pyrénées, Poitou-Charentes, Centre, Auvergne, Aquitaine, Ile-de-France,...) ont également été contactés, afin de connaître l'opportunité d'une installation sur leurs implantations ou auprès d'autres partenaires.

4.3. CHOIX DU SITE EN CLIMAT MEDITERRANEEN

Les différentes démarches entreprises dans le cadre de cette recherche de site ont abouti à la conclusion que les implantations du BRGM dans les régions en climat méditerranéen ne permettaient pas de remplir les conditions géologiques d'implantation du site et qu'aucune implantation de stations météorologiques n'apparaissait favorable.

L'analyse des formations géologiques, qui a été conduite dans le cadre des études de cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans les départements des Bouches-du-Rhône et du Vaucluse, a mis en évidence certaines formations comme étant particulièrement susceptibles au phénomène de retrait-gonflement des argiles, ce qui se traduisait par une forte sinistralité. Ainsi, les *Argiles vertes de l'Éocène terminal* et les *Marnes gargasiennes* sont apparues potentiellement intéressantes, ce qui a permis d'orienter les recherches vers les communes de Mormoiron et Gargas (Vaucluse), pour lesquelles un examen détaillé des cartes géologiques au 1/50 000 et de la Base des données du Sous-Sol (BSS) du BRGM a été réalisé dans le cadre de la présente étude. Les discussions avec Météo-France ont permis d'orienter les recherches vers Mormoiron, dans la mesure où cette commune est située à une dizaine de kilomètres seulement de Carpentras, où la station météorologique est une station pilote pour Météo-France, puisque les données nécessaires à la connaissance de l'évapo-transpiration y sont recueillies depuis 1964.

Des contacts ont ainsi été pris avec le maire de la commune de Mormoiron, qui s'est montré favorable au projet, ce qui a permis d'avancer dans les investigations. Afin de mieux cibler des secteurs potentiellement favorables sur la commune, plusieurs actions ont été menées au cours du premier semestre 2004 :

- analyse détaillée de la géologie de la commune à partir de l'examen de la carte géologique à l'échelle 1/50 000, de données bibliographiques et de la BSS ;
- analyse de la sinistralité liée au retrait-gonflement dans la commune, à partir des données issues de la carte départementale et complétées par une enquête locale ;
- recueil de coupes de sondages et d'analyses de laboratoires auprès de bureaux d'études géotechniques (Fondasol, Intrasol) et de sociétés locales de forages ;
- entretiens avec des géologues connaissant bien le secteur (JM. Triat, G. Truc) ;
- contact avec la société Beaufour-Ipsen Industrie, exploitant de la carrière des Roussans (extraction d'attapulгите pour l'industrie pharmaceutique), ainsi qu'avec la société Sifraco (ancien exploitant d'argile sur la commune de Mormoiron) et les caves Terra Ventoux (propriétaire de parcelles sur le site des Roussans). Ces différents contacts n'ont pu aboutir pour différentes raisons ;
- investigations sur le terrain le 18 mai et le 1^{er} juin 2004 pour la reconnaissance de plusieurs sites potentiels ;

- contact avec la Direction Études et Travaux des Bâtiments au Conseil Général de Vaucluse et avec un architecte (JL Grosjean) en vue d'accéder aux études de sol préalables à la construction de la gendarmerie de Mormoiron en 1992.

Ces différentes démarches ont permis de cibler une parcelle communale (parcelle cadastrée BI 262) située près de la gendarmerie de Mormoiron et qui répondait à l'ensemble des exigences formulées pour le choix d'un site expérimental : terrain plat, occupé par une pelouse avec arbres en périphérie, situé dans un environnement géologique a priori favorable, sans risque de vandalisme et placé à proximité de tous branchements. Un sondage carotté a été réalisé le 12 juillet 2006 en vue de s'assurer de la nature lithologique des terrains sur les 8 premiers mètres. Malheureusement, cette reconnaissance a mis en évidence la présence de bancs gréseux sur près de 3 m d'épaisseur (entre 3,30 et 6,20 m de profondeur), entrecoupés de fines passées argileuses et intercalés au milieu d'argiles beige-verdâtre très plastiques qui correspondaient au faciès attendu (Illustration 49). La présence inattendue de ces bancs indurés rend cette parcelle impropre à l'instrumentation envisagée.



Illustration 49 – Vue du sondage de reconnaissance préalable sur la parcelle BI 262 à Mormoiron et des bancs gréseux rencontrés en forage

Il a donc été nécessaire de rechercher un autre site plus adapté et les investigations se sont portées sur la partie nord-ouest du territoire communal, dans un secteur situé en partie supérieure de la série des *Argiles vertes de Mormoiron*, à la base des barres de gypse. Il s'agissait de circonscrire les zones dépourvues de recouvrement éluvial et situées loin des thalwegs (susceptibles de drainer des venues d'eau temporaires dans les niveaux silteux intercalés). Cette recherche a nécessité plusieurs visites de terrain complémentaires et a finalement abouti à la sélection d'une nouvelle parcelle communale (parcelle cadastrée BL 496), localisée au nord-ouest du bourg, en contrebas du chemin des genêts, dans une zone actuellement non constructible (ce dernier élément s'étant avéré primordial étant donnée la forte pression foncière locale).

Les premières reconnaissances géologiques par sondage sur ce terrain se sont déroulées le 2 septembre 2004 et ont permis la mise en place du matériel d'instrumentation en novembre.

4.4. CHOIX DU SITE EN CLIMAT OCEANIQUE OU SEMI-CONTINENTAL

Les différentes démarches entreprises dans le cadre de cette recherche de site ont concerné de nombreuses régions. Les implantations du BRGM susceptibles de convenir à l'implantation du site ne se sont pas avérées favorables, soit en raison du contexte géologique du sous-sol, soit en raison de l'exiguïté du terrain.

Les contacts avec Météo-France ont permis d'examiner plusieurs sites :

- site de Saint-Sardos (département du Tarn-et-Garonne, à 40 km au nord-ouest de Toulouse). Ce site est utilisé par Météo-France dans le cadre d'autres programmes d'instrumentation, mais il n'a pas été retenu pour la présente étude, car sa géologie n'était pas favorable au vu de l'examen des cartes géologiques au 1/50 000 et des données d'une trentaine de sondages de la BSS (Base des données du Sous-Sol du BRGM) localisés dans le secteur : les terrains sont des alluvions recouvertes par des limons et la quasi-totalité des coupes de sondages disponibles montre l'existence d'au moins une passée strictement non argileuse (graves, sables) ;
- site de Trappes (Yvelines) : des échanges avec P. David, directeur adjoint du site Météo-France de Trappes et plusieurs de ses collaborateurs du service logistique (MM. Thuret et Chesnais) ont permis d'étudier la faisabilité de l'implantation de l'instrumentation sur ce site, au cours des mois de septembre et octobre 2004. L'examen du plan de masse, de la carte géologique à l'échelle 1/50 000, des données de sondages de la BSS (Base des données du Sous-Sol, gérée par le BRGM), d'une étude géotechnique établie par le LROP avec réalisation de sondages concernant l'examen de l'infiltration accidentelle de fuel dans le sol, ont permis d'approfondir la connaissance du contexte géologique et environnemental du site. Des contacts complémentaires ont été pris avec le LROP implanté à proximité. Ce site n'a cependant pas pu être retenu en raison de l'hétérogénéité de la géologie, accentuée par des remblaiements consécutifs aux bombardements survenus pendant la deuxième guerre mondiale. La propagation de la pollution accidentelle au niveau de certains sondages effectués dans le cadre de l'étude correspondante a par ailleurs confirmé que certains horizons étaient particulièrement perméables donc peu argileux.

Les contacts avec l'INRA ont permis d'envisager plusieurs sites, qui ont été examinés à partir des cartes géologique au 1/50 000 et des données de sondages de la BSS (Base des données du Sous-Sol du BRGM) :

- Maison forestière de l'ONF (Office National des Forêts) à Rambouillet (Yvelines) : ce site a été écarté car la géologie est constituée de *Sables de Fontainebleau* ;
- Bergerie Nationale (Rambouillet, Yvelines) : ce site a également été écarté pour les mêmes raisons : la géologie affleurante est constituée soit de *Sables de*

Fontainebleau, soit d'Argiles à meulière de Montmorency, dont l'épaisseur est inconnue et qui peuvent par ailleurs présenter de fortes hétérogénéités ;

- Office National de la Chasse (Auffargis, Yvelines) : la géologie du site est également apparue défavorable (Calcaires et argiles à meulières, *Sables de Fontainebleau*) ;
- Site INRA de Versailles (Yvelines) : le site est principalement localisé sur des *Sables de Fontainebleau*, même si d'autres formations argileuses affleurent sur des bandes plus réduites : ce site a donc dû être écarté.

Des contacts ont été pris en janvier 2005 avec Anne Pantet (ESIP : École Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers), qui ont permis d'évoquer le site du Deffend, localisé sur la commune de Mignaloux-Beauvoir, près de Poitiers. Le terrain est géré par l'Université de Poitiers et est le siège d'un Observatoire Régional de l'Environnement. Après examen détaillé du site et investigations complémentaires, qui seront détaillées par la suite, c'est ce site qui a été retenu pour l'implantation du deuxième système d'instrumentation in situ.

5. Site expérimental de Mormoiron

5.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE

Le site retenu pour représenter un climat méditerranéen est situé dans le département de Vaucluse (84), sur le territoire de la commune de Mormoiron, à une quinzaine de kilomètres au sud du Mont Ventoux (Illustration 50). Le terrain est situé au nord-ouest du bourg, en contrebas immédiat du chemin des genêts, sur la parcelle cadastrée BL 496, à une altitude moyenne de 280 m NGF. Il est en légère pente vers l'est, et recouvert globalement par des buissons plus ou moins denses, avec présence de quelques arbustes.

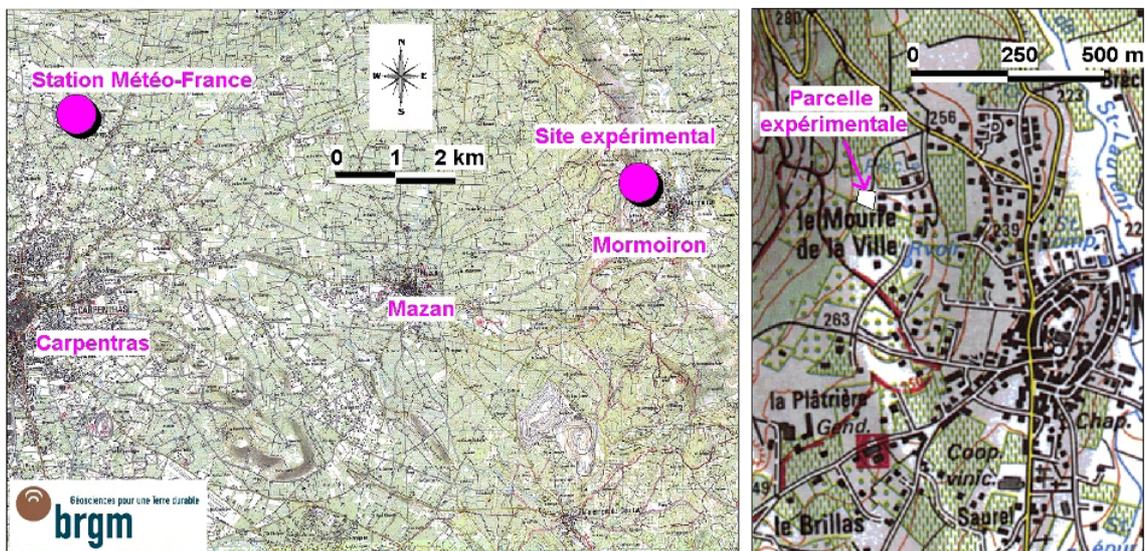


Illustration 50 – Plan de situation de la parcelle expérimentale de Mormoiron (fond topographique extrait des cartes IGN à l'échelle 1/25 000)

5.2. CARACTERISATION GEOLOGIQUE DU SITE

Le contexte géologique du Bassin de Mormoiron est notamment décrit dans la notice de la carte géologique (feuille de Carpentras, Blanc et al., 1975) et précisé à travers différents documents bibliographiques (Triat et al, 1971 ; Le Berre et al., 1984 ; Gonzalez, 1992). Ce bassin, délimité au nord par le mont Ventoux, à l'est et au sud par les Monts de Vaucluse, est constitué de dépôts sédimentaires d'âge principalement crétacé à paléogène.

A l'Albien et au Cénomaniens inférieur se déposent des sables glauconieux marins, dont l'émersion, durant le Cénomaniens moyen, provoque l'ocrisation par phénomène d'altération latéritique. Au Bartonien (Éocène) se déposent des sables fluviatiles rouges à gravillons latéritiques (notés e6a sur la carte géologique, Illustration 51) avec

localement un niveau lenticulaire d'argiles smectitiques connu sous le nom d'*Argiles de la Rouquette*. Sur ce complexe argilo-sableux assez hétérogène se rencontrent les *Argiles vertes à attapulгите de Mormoiron*, notées e6b1 et datées du Bartonien supérieur. L'épaisseur de cette formation atteint une quinzaine de mètres dans la carrière du Roussan, située à environ 1 500 m au sud-est du site instrumenté et qui avait été initialement envisagé comme site expérimental. Le minéral attapulгите a d'ailleurs été défini (en 1936) sur la base d'échantillons provenant de ce gisement, longtemps utilisé pour l'exploitation de terre à foulon. Enfin, le Bartonien supérieur se termine par les barres de calcaire blanc siliceux à attapulгите dénommé *Calcaire de Jocas* et noté e6b2.

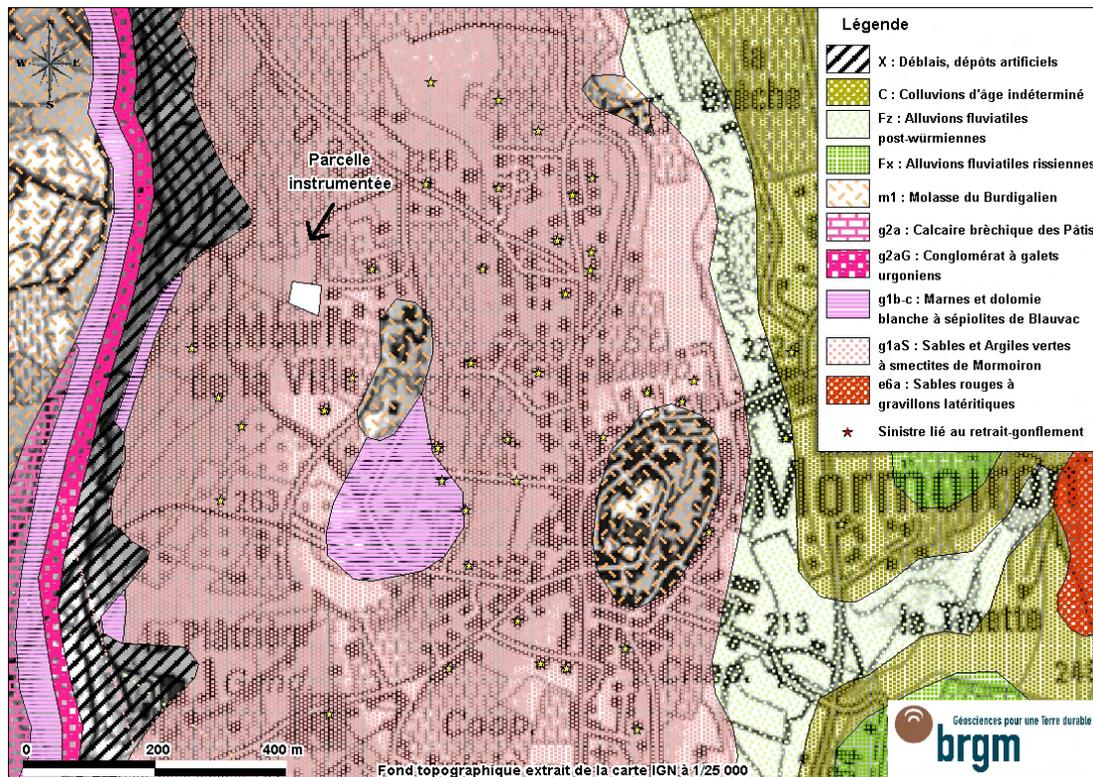


Illustration 51 – Extrait de la carte géologique éditée par le BRGM à l'échelle 1/50 000 (feuille Carpentras)

Au dessus du Bartonien se met en place à partir du Priabonien (ex Ludien) un complexe détritique constitué d'argiles vertes à smectites alumino-ferrifères dominantes, à ciment calcitique et à passées sablo-gréseuses avec niveaux micro-conglomératiques. Bien que notée g1aS sur la carte géologique (*Sables et Argiles vertes à smectites de Mormoiron*), la partie inférieure de cette formation est datée de l'Éocène terminal et la limite avec l'Oligocène inférieur passe au sein de la formation. Le cortège argileux est constitué essentiellement de smectites alumino-ferrifères accompagnées d'attapulгите, issues probablement du remaniement du Bartonien sous-jacent. C'est dans cette formation des *Sables et Argiles vertes à smectites de Mormoiron*, reconnue en sondage jusqu'à 7 m mais dont l'épaisseur totale est de l'ordre de 80 à 100 m, qu'est implanté le site expérimental. Cette formation passe

latéralement aux conglomérats de Crillon-le-Brave vers le nord (issus du démantèlement des chaînons crétacés) et aux *Calcaires à limnées de Méthamis* vers le sud.

L'Oligocène inférieur se poursuit par l'installation progressive d'une sédimentation chimique à calcaires, dolomies et argiles magnésiennes (sépiolites et stévensites), aboutissant aux *Marnes et dolomies blanches à sépiolites de Blauvac*, notées g1b-c, formation au sein de laquelle s'intercalent les lentilles de gypse de Mormoiron à *Paleotherium*. Ces bancs de marnes et de gypse forment la base de la falaise qui surplombe le site expérimental côté ouest (et qui a été jadis exploitée en souterrain, d'où la présence de déblais dans le versant). Ils affleurent aussi localement au sud-est de la parcelle.

Ces niveaux gypseux sont surmontés par les Calcaires bréchiqes des Pâtis (notés g2a), constitués de dolomies blanches puis de calcaires argileux à montmorillonite et localement de lentilles de conglomérats à galets urgoniens (g2aG).

Ces formations d'âge oligocène sont localement recouvertes par des dépôts molassiques datés du Burdigalien (Miocène, m1), peu épais à proximité du site expérimental mais constituant la butte sur laquelle s'est installé le bourg de Mormoiron ainsi qu'une autre éminence située à une centaine de mètres à l'est de la parcelle. Les faciès observés sont des marnes et calcaires plus ou moins argileux avec, à la base, des passées caillouteuses à galets verdâtres.

Outre les données de la carte géologique et des documents consultés, cette formation des *Sables et Argiles vertes à smectites de Mormoiron*, dans laquelle ont été implantés les sondes Humitub, est connue par plusieurs études géotechniques réalisées soit dans le cadre de diagnostics post-sinistres, soit en préalable à la construction de pavillons. Un certain nombre de ces études ont pu être consultées auprès de bureaux d'études dont Intrasol et Fondasol.

L'une de ces études s'est avérée particulièrement précieuse car effectuée sur une parcelle adjacente à celle retenue pour l'installation du matériel de mesure mais légèrement en contrebas (Intrasol Géotechnique, 2001). Quatre sondages à la tarière (à des profondeurs comprises entre 6 et 7,50 m) et une ouverture de fouille à la pelle ont été réalisés dans ce cadre. Ces sondages ont rencontré directement la formation argileuse en place, sans recouvrement colluvial superficiel et sous une mince épaisseur de remblai (10 à 30 cm). Jusqu'à 1,50 m, il s'agit d'une argile grise renfermant de nombreux nodules calcaires. Puis cette argile prend une teinte beige clair et devient plus sableuse. A partir d'une profondeur comprise, selon les emplacements, entre 2,50 et 4 m, les sondages atteignent une argile toujours beige-verdâtre mais à consistance plus plastique et dont l'humidité augmente avec la profondeur.

De faibles venues d'eau ont été observées dans deux des sondages, côté sud de la parcelle, à des profondeurs respectives de 5,30 m et 6 m, bien que les sondages aient été réalisés fin septembre après une période plutôt sèche. Il est à noter que l'existence de venues d'eau pérennes est effectivement signalée par les riverains au sud de la

parcelle expérimentale, tant en partie haute (au niveau du chemin des genêts) qu'en contrebas (ancien captage détecté lors du creusement d'une piscine). Ces observations confirment la présence de circulations d'eau plus ou moins pérennes dans les niveaux intermédiaires d'argiles silteuses voire de sables fins qui sont intercalés au sein de cette formation.

Les mesures pressiométriques effectuées à l'occasion de cette campagne de reconnaissance semblent indiquer que le niveau de consolidation du sol est plutôt plus élevé en surface, ce qui pourrait être lié aux phénomènes cycliques de tassements par dessiccation. La mesure des limites d'Atterberg, effectuée dans l'horizon supérieur (argile à nodules calcaires), à 0,7 m de profondeur conduit à un indice de plasticité de 46,1 % (WI = 78,8 % et Wp = 27,8 %). La limite de retrait (Wre, mesurée selon la norme NP P 94-060-1), est de 22,2 % et le retrait linéaire RI de 0,58, ce qui constitue une valeur relativement élevée indiquant une forte aptitude aux tassements en cas de dessiccation. La pression de gonflement (mesurée selon la norme XP P 94-091, à partir d'une teneur en eau de 22,2 %) s'élève à 290 kPa. Le profil de teneur en eau montre des valeurs faibles en surface (17,2 % à une profondeur de 1 m) augmentant avec la profondeur pour se stabiliser aux environs de 25 % à partir de 3 m.

Les autres données géotechniques recueillies sur la commune de Mormoiron dans cette même formation font état de valeurs de bleu de méthylène élevées, allant jusqu'à 10,7 avec une moyenne de 5,6. Quant aux limites de plasticité, sur une vingtaine de résultats recueillis, les valeurs s'échelonnent entre 9 et 54 % (avec une moyenne autour de 28 %), ce qui traduit une certaine hétérogénéité de la formation considérée dans son ensemble.

5.3. SUSCEPTIBILITE AU RETRAIT-GONFLEMENT DES ARGILES

Dans le cadre de sa mission de service public, le BRGM a été chargé d'établir en 2004 la carte de l'aléa retrait-gonflement des argiles sur le département de Vaucluse (rapport BRGM/RP-53187-FR). Cette carte a été réalisée à partir des cartes géologiques éditées par le BRGM à l'échelle 1/50 000, après numérisation et harmonisation de ces dernières. Les formations argileuses et marneuses ont été identifiées puis hiérarchisées vis-à-vis de leur susceptibilité au retrait-gonflement des argiles, en se basant sur des critères lithologiques, minéralogiques et géotechniques, ainsi que sur la sinistralité recensée. L'illustration 52 présente l'extrait de cette carte d'aléa départementale pour la commune de Mormoiron.

La parcelle instrumentée, représentée par un point bleu sur cet extrait de carte, apparaît ainsi clairement comme étant située dans une zone d'aléa fort, où de nombreux sinistres ont été recensés. Dans le cadre de l'établissement de la carte départementale d'aléa, 59 sinistres attribués au phénomène de retrait-gonflement des argiles avaient été recensés sur cette formation des *Sables et Argiles vertes à smectites de Mormoiron*, soit une densité de sinistre dépassant 40 000 sinistres pour 100 km² d'affleurement urbanisé. A l'occasion de l'installation du matériel de mesure, une vingtaine de sinistres supplémentaires ont été identifiés dans la seule commune de Mormoiron et même la voirie départementale est affectée par une fissuration

attribuée au retrait-gonflement des argiles. Le site choisi pour l'expérimentation est donc particulièrement exposé à ce phénomène.

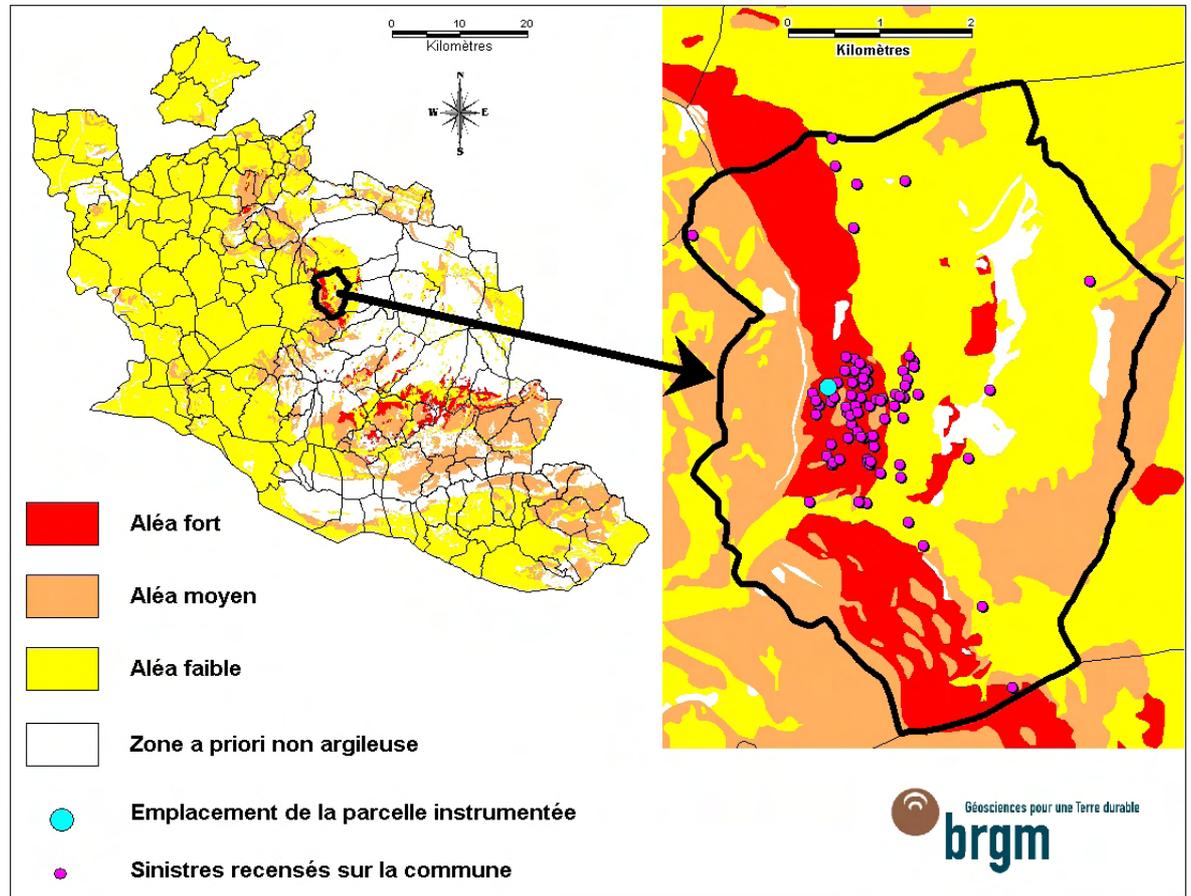


Illustration 52 - Carte d'aléa départementale du Vaucluse avec zoom sur la commune de Mormoiron

5.4. CARACTERISATION CLIMATIQUE DU SITE

La commune de Mormoiron est soumise à un climat méditerranéen, comme l'ensemble du département du Vaucluse. Les données fournies par Météo France correspondent aux mesures quotidiennes réalisées sur la station de Carpentras, commune située à 9,2 km à l'ouest de la parcelle instrumentée à Mormoiron. Il est à noter que la station de Carpentras est située en plaine, à une altitude de 99 m NGF, alors que le site expérimental de Mormoiron se trouve dans un environnement plus accidenté, sur le flanc est d'un coteau dont le sommet culmine à 374 m. Le terrain lui-même est à une altitude de 280 m NGF, très supérieure donc à celle de la station de Météo-France. Par ailleurs, le site expérimental est entouré de plusieurs reliefs avec notamment le Mont Ventoux (1 910 m) situé à 14 km à vol d'oiseau en direction du nord-est.

Les mesures disponibles à Carpentras et communiquées par Météo-France couvrent une période allant du 1^{er} janvier 1964 au 31 décembre 2005, soit un total de 42 années. Elles ont été traitées de manière à faire ressortir les caractéristiques du climat local et les grandes variations pluriannuelles. L'illustration 53 représente ainsi les cumuls mensuels moyens de précipitation sur une période trentennale (1970-2000).

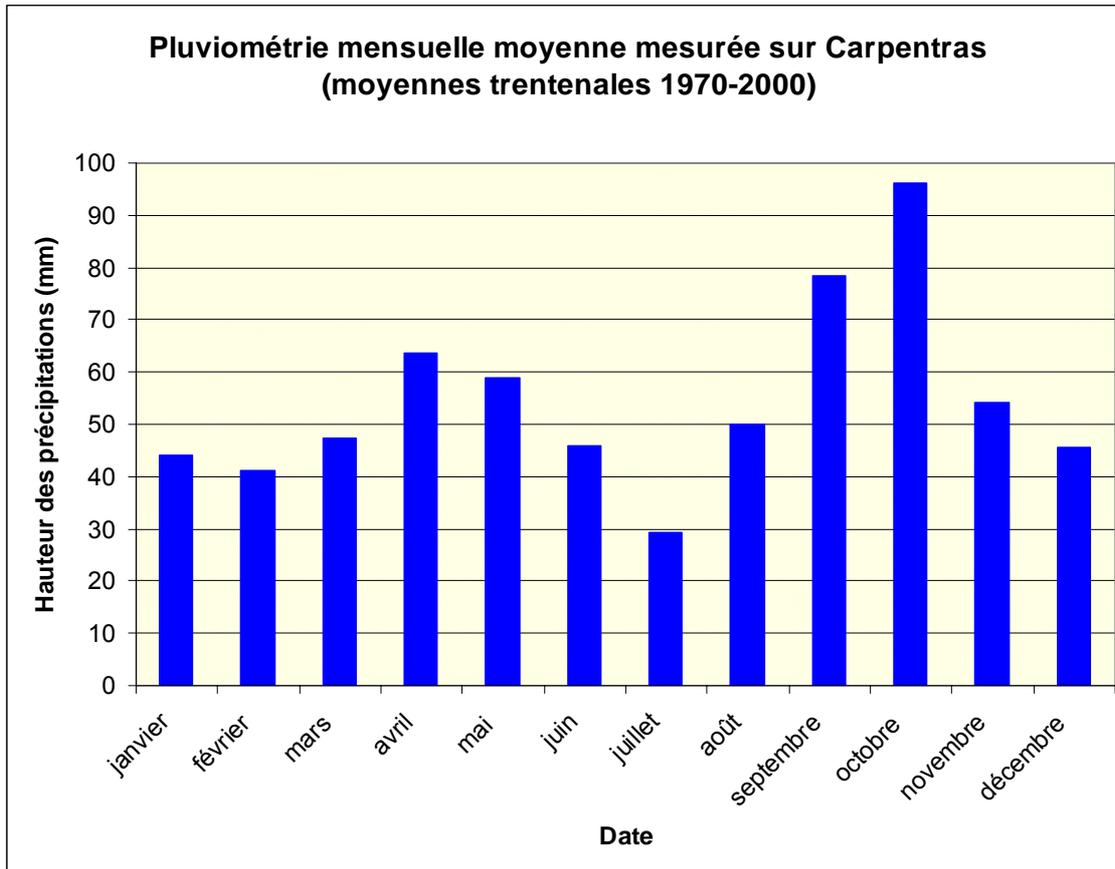


Illustration 53 – Précipitations mensuelles moyennes sur Carpentras (données Météo France)

Ce graphique fait apparaître des écarts très sensibles entre les mois les plus secs (moins de 30 mm en juillet) et les plus humides (plus de 96 mm en octobre, soit plus de trois fois le cumul mensuel moyen de juillet). La répartition annuelle des précipitations est marquée par deux périodes distinctes de pluviométrie particulièrement élevée, au printemps (avec respectivement 59 et 64 mm pour les mois d'avril et mai) et surtout en début d'automne (avec respectivement 78 et 96 mm en septembre et octobre). Les mois d'hiver sont sensiblement moins arrosés (avec une moyenne mensuelle de l'ordre de 40 mm) et la période estivale particulièrement sèche (mais avec une moyenne de 50 mm quand même pour le mois d'août qui peut être affecté d'orages violents).

L'analyse des données journalières sur l'ensemble de la période où les données sont disponibles permet de surcroît de déterminer un certain nombre de critères caractéristiques : la pluviométrie moyenne est de 1,77 mm d'eau par jour, alors que plus de 72 % des jours ne présentent aucune précipitation : cela correspond à une

moyenne de 6,4 mm d'eau par jour de précipitation effective. La plus importante précipitation journalière mesurée entre 1964 et 2005 correspond à 212 mm en une seule journée (le 22 septembre 1992, après 12 jours sans précipitation supérieure à 1 mm).

Les variations interannuelles de pluviométrie sont assez nettement marquées à Carpentras comme dans l'ensemble du bassin méditerranéen. Le graphique de l'illustration 54 montre le cumul annuel de précipitation sur l'ensemble de la période de mesures disponibles (42 ans sur Carpentras), la moyenne annuelle sur cette période étant de 646 mm avec un écart-type de 148 mm. Les années les plus pluvieuses, avec un cumul de précipitation supérieur à la moyenne augmentée d'un écart-type (soit un cumul annuel supérieur à 794 mm) sont au nombre de 9 (soit une année sur cinq), les plus récentes observées étant 1987, 1992, 1993, 1994, 2000 et 2002 (avec un cumul annuel record de 997 mm pour cette dernière année, soit un excédent de 54 % par rapport à la moyenne). Les années les plus déficitaires, avec un cumul annuel inférieur à la moyenne annuelle moins l'écart-type sont au nombre de 4 seulement sur cette période. Les années déficitaires les plus récentes sont 1989, 1998 et 2004, le déficit record ayant été enregistré en 1967 (précipitation annuelle de 318 mm soit un déficit égal à 51 % de la moyenne annuelle) et quasiment égalé en 1989 (avec un cumul annuel de précipitation de 329 mm).

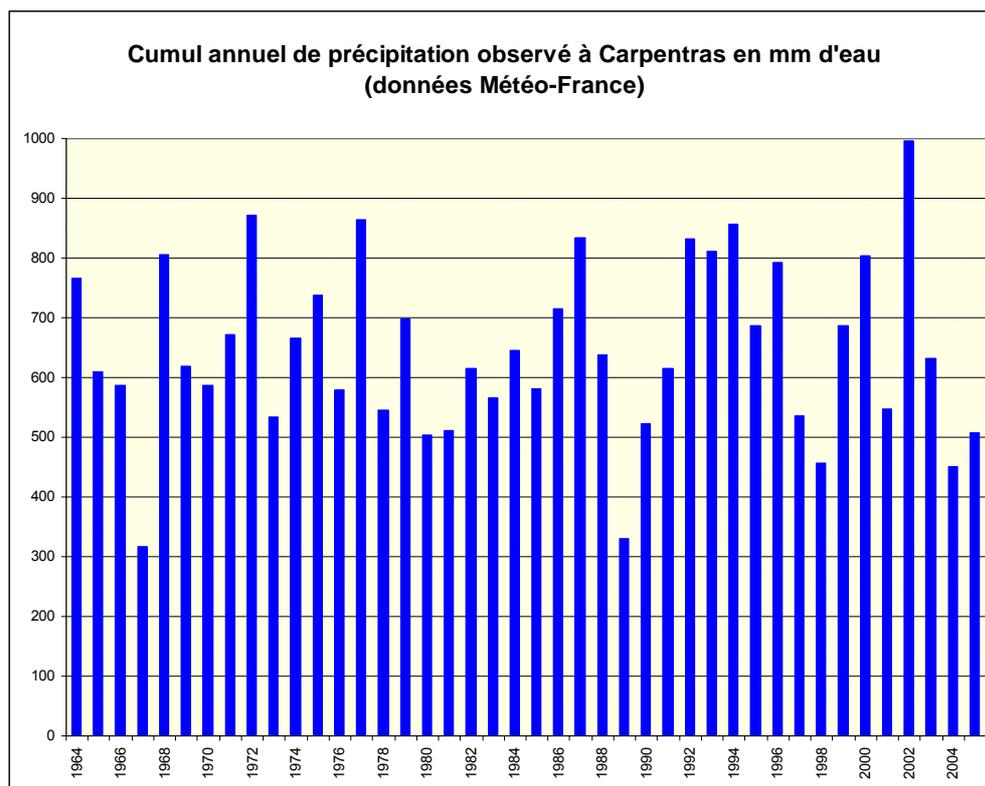


Illustration 54 – Cumuls annuels de précipitation enregistrés à Carpentras entre 1964 et 2005 (données Météo-France)

L'illustration 55 permet de visualiser la gamme des moyennes journalières de température selon les saisons à Carpentras, sur l'ensemble de la période de mesures disponibles (1964-2005). En moyenne, la température journalière varie entre 4,9 °C en janvier et 23,3 °C en juillet, selon une courbe en cloche. On notera en particulier que la moyenne des températures journalières maximales en été atteint les 27 °C, alors que l'hiver, la moyenne des températures journalières minimales descend jusqu'à -2 °C. Cependant, ces valeurs moyennes peuvent être ponctuellement dépassées sur certaines périodes, comme les 5 et 6 août 2003, où la moyenne journalière de la température a atteint 30,2 °C, et le 7 janvier 1985, où elle est tombée à -10,1 °C.

L'analyse des relevés quotidiens de température permet de calculer la température moyenne sous abri à Carpentras, qui est de 13,5 °C, alors que seuls 2,1 % des jours présentent une température moyenne journalière inférieure à 0 °C.

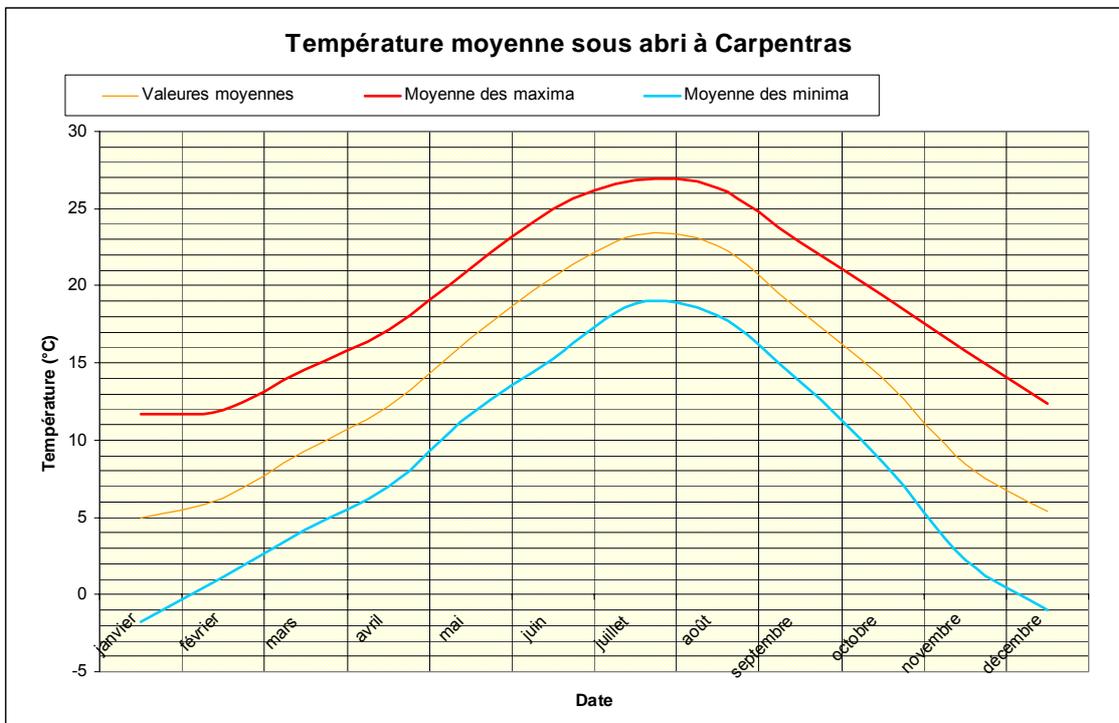


Illustration 55 – Températures journalières moyennes (valeurs moyennes et moyenne des extrêmes) sur la période 1964-2005, à Carpentras (données Météo-France)

L'évaluation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) est fournie par Météo-France sur son site de Carpentras pour la période 1964-2005 à partir d'une formule qui n'est pas détaillée mais qui s'inspire de la méthode de Monteith, intégrant un certain nombre de paramètres climatiques enregistrés localement (température, rayonnement solaire, vitesse du vent, etc.). Ces données sont calculées quotidiennement et présentées sur le graphique de l'illustration 56 sous forme de moyennes mensuelles, sur la période de mesures disponibles, des valeurs journalières moyennes et maximales. Ce graphique montre clairement un pic annuel en juillet avec des valeurs moyennes de 6,4 mm/jour

(et des valeurs maximales de 8,5 mm/jour). Les valeurs minimales de l'ETP sont enregistrées en décembre-janvier avec des moyennes de l'ordre de 1 mm/jour.

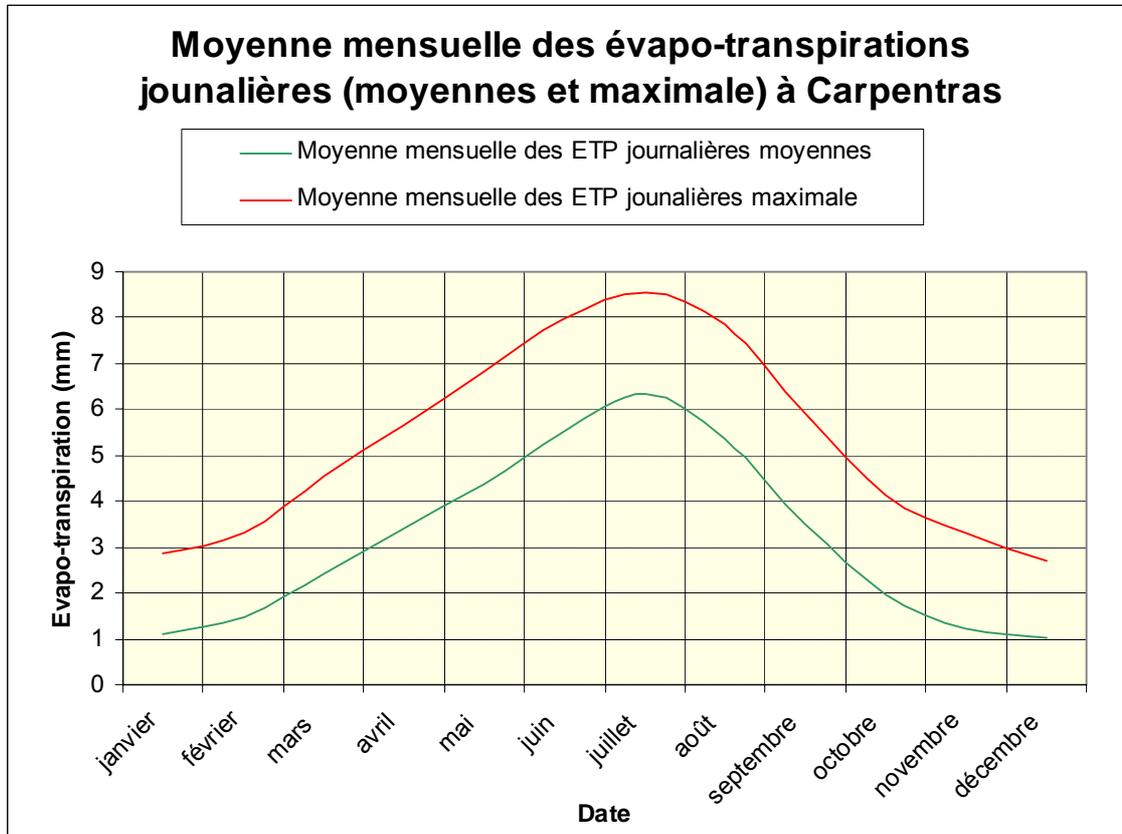


Illustration 56 – Moyennes mensuelles sur la période 1964-2005 des évapotranspirations journalières moyennes et maximales à Carpentras (données Météo-France)

La superposition, sur un même graphique des cumuls moyens mensuels de précipitations (calculés sur l'ensemble de la période de mesures disponibles, soit 1964-2005) et des ETP mensuelles moyennes (calculées sur la même période et exprimées également en hauteurs d'eau) met en évidence que, sur ce site, l'ETP calculée est très supérieure au cumul des précipitations généralement observé (Illustration 57). La différence entre précipitations et ETP correspond à la pluie efficace, théoriquement disponible pour réhumidifier les sols. Or ce graphique montre clairement que les pluies efficaces à Carpentras ne sont positives que pendant les seuls mois d'automne et la première partie de l'hiver (d'octobre à février). Pendant 7 mois de l'année, l'ETP est très nettement supérieure aux précipitations, avec un écart maximal en juillet où l'ETP calculée atteint près de 200 mm alors que le cumul des pluies est en moyenne inférieur à 30 mm sur cette période.

En réalité, les choses sont beaucoup plus complexes que ce bilan simplifié. Seule une partie des précipitations enregistrées s'infiltre réellement dans le sol et contribue donc à ce bilan. La différence peut être très significative en été, sur des sols argileux particulièrement desséchés qui durcissent en surface et sur lesquels les premières

pluies ne font que ruisseler. Sur ce type de sols argileux, on estime que les taux de ruissellement peuvent atteindre de l'ordre de 40 %, ce qui est considérable. A Mormoiron, ce phénomène de ruissellement est amplifié par la pente du terrain. Quant à la couverture végétale, elle joue un rôle complexe car les feuilles interceptent une partie des pluies, ce qui contribue également au ruissellement, mais en contre-partie ce couvert végétal freine l'arrivée de la pluie sur le sol et facilite donc son infiltration. Quoi qu'il en soit, la quantité de pluie enregistrée est de toute façon sensiblement supérieure à celle qui s'infiltré réellement dans le sol.

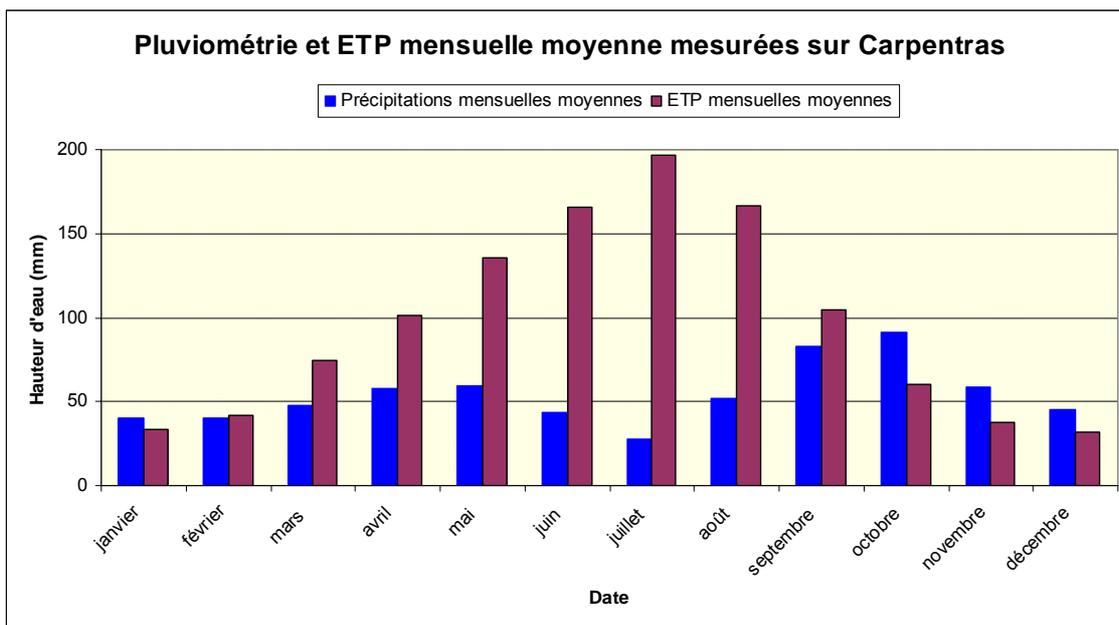


Illustration 57 – Moyenne mensuelle sur la période 1964-2005 des précipitations et ETP à Carpentras (données Météo France)

Inversement, l'ETP calculée par Météo-France ne correspond pas non plus à la hauteur d'eau qui va effectivement s'évaporer au cours de l'année. C'est d'ailleurs une évidence puisque la station de Carpentras montre un bilan manifestement déficitaire entre la quantité de précipitation annuelle moyenne (646 mm sur la période de mesures disponibles) et l'ETP annuelle moyenne (1 150 mm sur la même période d'observation, soit près du double). Cette ETP est la quantité d'eau susceptible de s'évaporer (par évaporation directe et par transpiration des végétaux), dans l'hypothèse d'un site engazonné pour lequel la disponibilité en eau ne serait jamais un facteur limitant (ce qui suppose un arrosage quasi-permanent en période estivale !).

La présence d'un couvert végétal du type de celui rencontré à Mormoiron conduirait même sans doute à une ETP sensiblement supérieure car une végétation arbustive présente des besoins en eau généralement supérieurs à ceux d'une simple pelouse rase. Cependant, l'évapotranspiration réelle n'atteint jamais de tels niveaux (du moins en période estivale) car le stock d'eau n'est pas disponible. Il se produit donc des phénomènes d'adaptation avec d'une part une plus grande activité des racelles qui

vont rechercher l'eau en profondeur (et contribuent ainsi à dessécher le sol sur une plus grande épaisseur) et, d'autre part, des phénomènes de régulation de l'appareil végétatif pour réduire la consommation d'eau (fermeture des stomates, etc.). Le simple bilan P-ETP est donc finalement assez éloigné de la réalité même s'il donne une idée des caractéristiques climatiques du site.

Malgré ces insuffisances liées à la nature de cet indicateur, il a paru intéressant de suivre les variations inter-annuelles de ce bilan brut P-ETP. C'est ce qui a été représenté sur le graphique de l'illustration 58 qui met en évidence de fortes variations de ce bilan d'une année sur l'autre, la moyenne du déficit annuel étant de 504 mm. Toutes les années observées depuis 1964 présentent un bilan déficitaire. Ce déficit est minimal en 1977 (97 mm) et assez faible en 1992 et 2002 (de l'ordre de 200 mm). Il atteint la valeur maximale de 873 mm en 1989 (valeur déjà quasiment atteinte en 1967). Il est à noter au passage que le déficit atteint en 2003 (717 mm) a été dépassé les deux années suivantes (834 mm en 2004 et 788 mm en 2005), ce qui laisse penser que la sécheresse cumulée de ces 3 années a été localement encore plus sévère que celle observée en 1989-91.

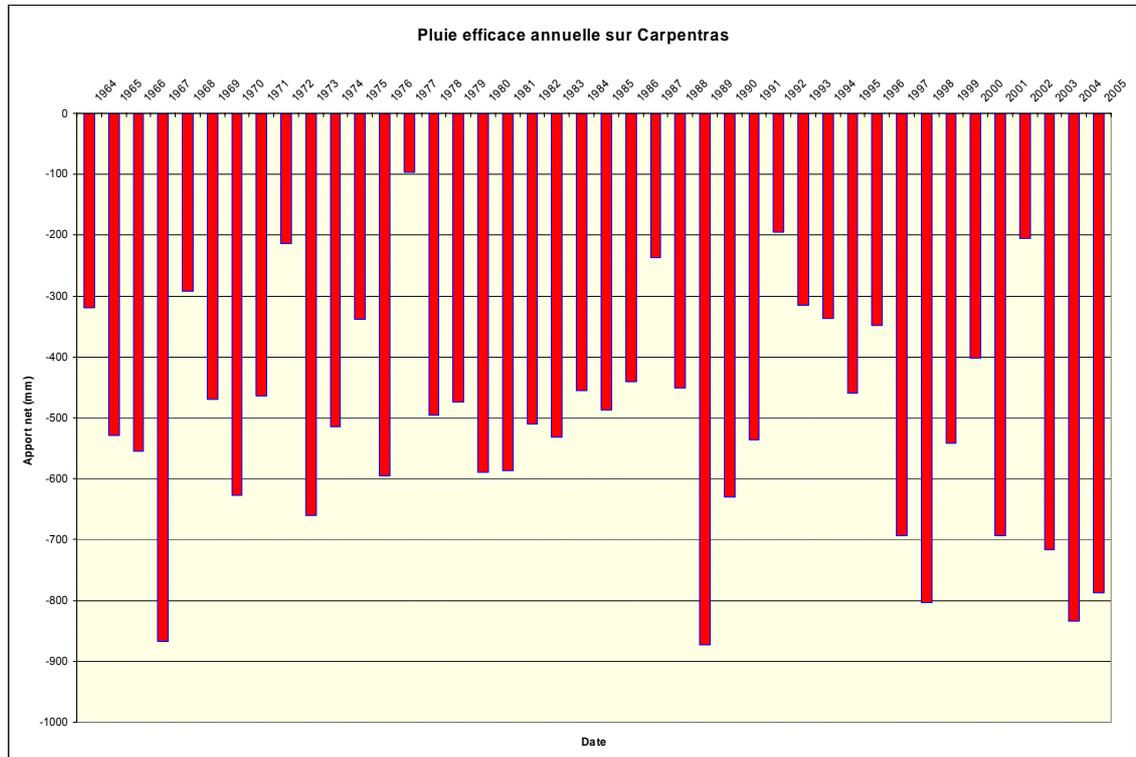


Illustration 58 – Précipitations efficaces annuelles entre 1964 et 2005 sur Carpentras

Afin d'évaluer l'état hydrique dans lequel se trouve le site expérimental lors de la mise en place de l'instrumentation, les données de précipitation et d'ETP des années 2002 à 2005 sont comparées par rapport aux moyennes mensuelles calculées sur la période de mesures disponibles (1964-2005), comme indiqué sur les graphiques de l'illustration 59. Ces courbes montrent que l'ETP a été normale en 2002 et sensiblement supérieure à la normale pendant les mois d'été (mai à août) 2003 à

2005. La pluviométrie a été très supérieure à la normale en automne 2002, ce qui laisse penser que fin janvier 2003 les sols présentaient une teneur en eau élevée, probablement supérieure à la moyenne à cette période de l'année. Les mois suivants, de février à août 2003, ont été marqués par des précipitations systématiquement inférieures aux normales et, à partir du mois de juin, par une ETP sensiblement supérieure à la normale. La fin de l'année 2003 a été plus arrosée que la normale, mais l'année 2004 a commencé par un nouveau déficit pluviométrique, de janvier jusqu'en juillet avec une ETP également supérieure à la normale, mais pour les seuls mois de juin-juillet. Le mois d'août 2004 a connu de gros orages mais les mois d'automne ont été plutôt déficitaires. Tout laisse donc penser que le niveau hydrique des sols lors de l'installation des capteurs en décembre 2004 était plutôt faible par rapport à son niveau habituel, du fait des conditions climatiques particulières des deux années précédentes.

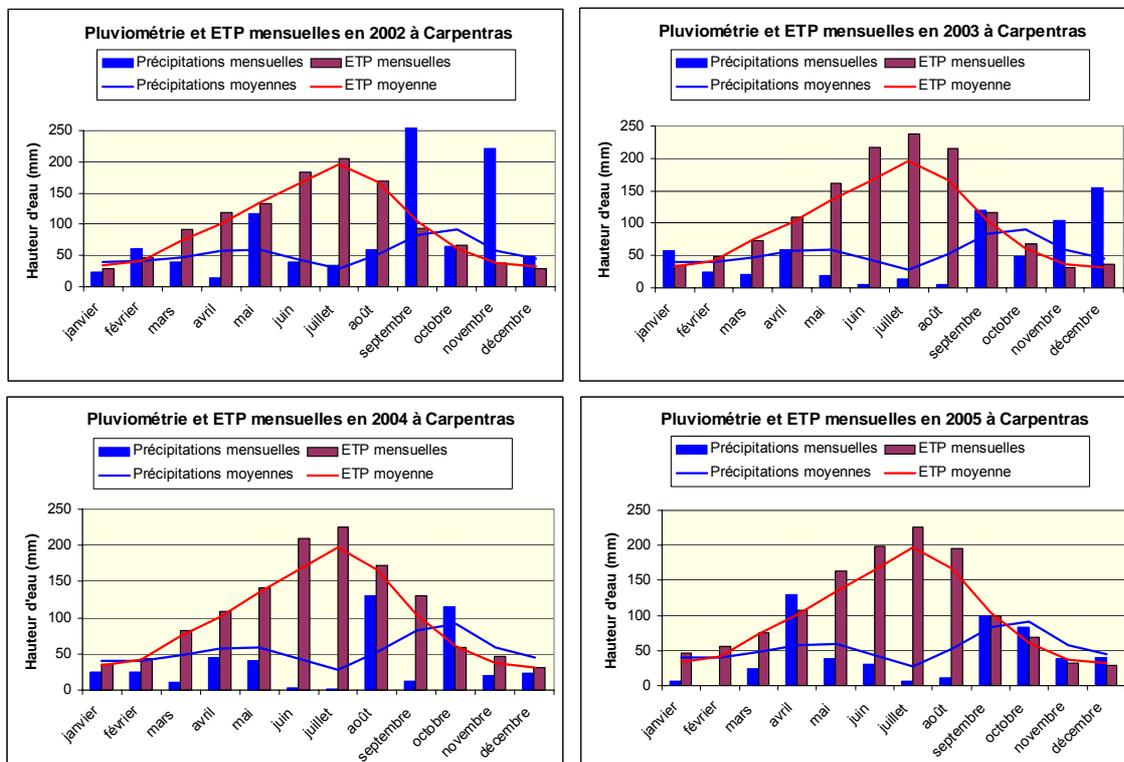


Illustration 59 – Précipitations et ETP mensuelles des années 2002 à 2005, comparées aux moyennes mensuelles sur la période 1964-2005 (données Météo-France)

5.5. INSTRUMENTATION DU SITE DE MORMOIRON

5.5.1. Principes généraux de l'installation

L'instrumentation de ce site est exactement conforme à ce qui avait été prévu dans le cahier des charges de l'étude, à savoir la mise en place de deux cannes Humitub, implantées en forage, l'une en terrain dégagé et l'autre à proximité d'un arbre, comportant chacune 12 capteurs de permittivité régulièrement espacés jusqu'à une profondeur maximale de 7 m (à raison d'un capteur tous les 50 cm jusqu'à une profondeur de 5 m, puis tous les mètres), un pluviomètre et une centrale automatique permettant l'acquisition des mesures à pas de temps réglable et leur télétransmission à intervalles hebdomadaires (le vendredi matin, pendant un créneau de 2 h). Le schéma de principe est présenté sur l'illustration 60 ci-dessous.

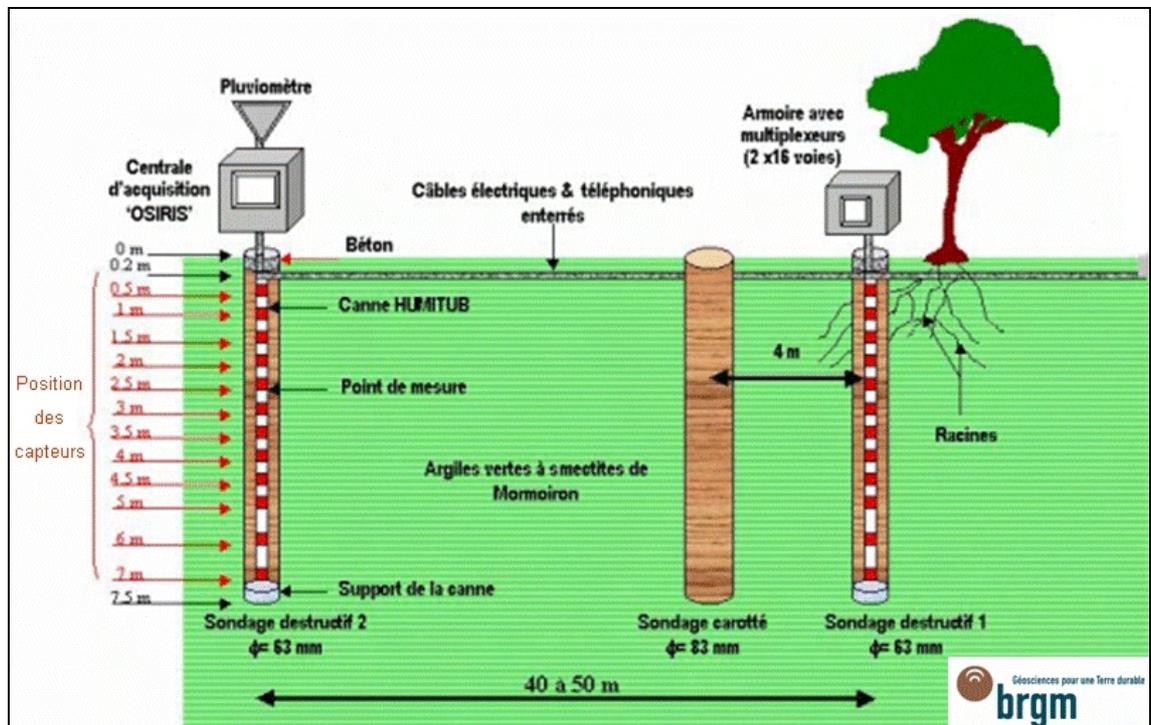


Illustration 60 – Schéma de principe de l'instrumentation mise en place sur le site de Mormoiron

5.5.2. Chronologie de l'installation

Les premières investigations sur la commune de Mormoiron en vue de la recherche d'un site adapté ont débuté dès le mois de mars 2004 (soit avant même la signature de la convention permettant le démarrage effectif du projet). Le premier site retenu s'étant révélé inapte suite à un premier forage mettant en évidence la présence de bancs gréseux intercalés dans les argiles (cf. chap. 4), de nouvelles investigations ont été conduites au cours de l'été 2004 jusqu'à sélectionner la parcelle communale finalement retenue et à obtenir une autorisation de la part du maire afin d'y réaliser un sondage de reconnaissance.

Ce sondage a été réalisé par carottage, d'abord battu à sec jusqu'à une profondeur de 2 m, puis par rotation à l'eau jusqu'à une profondeur totale de 6,95 m. Il a permis de vérifier la nature argileuse des terrains jusqu'à cette cote et de prélever quelques échantillons. L'emplacement du sondage est indiqué sur la plan de situation ci-après (Illustration 61).

Une convention a été signée en date du 1^{er} décembre 2004 avec le maire de la commune pour la mise à disposition du terrain pour la durée de l'expérimentation et le matériel d'instrumentation a été mis en place ce même jour après réalisation de deux sondages à la tarière motorisée (à sec) à une profondeur de 7,50 m. Les forages ont été réalisés par la société Intramol et les mesures de teneur en eau sur échantillons prélevés en forage ont été réalisées par le laboratoire du BRGM en date du 13 décembre. La préparation et l'installation du matériel de mesure ont été sous-traités à la société MINAUS. L'acquisition des premières mesures a pu se faire à compter du 3 décembre 2004 (MINAUS S.A., 2004).

Le matériel mis en place a connu un certain nombre de défaillances au démarrage. Le système Iriscom de télétransmission des données par GSM (qui n'était pas prévu initialement mais qui a dû être mis en œuvre du fait de l'absence locale de toute possibilité de raccordement au réseau filaire) a dû être changé et n'a été réellement opérationnel qu'à partir du 10 mars 2005. Par ailleurs, la détérioration de plusieurs cartes électroniques a empêché l'acquisition de mesures du 28 janvier au 10 mars. A partir du 4 avril 2005, le pas de temps pour l'acquisition des mesures a été réglé à 4 h. L'installation a connu enfin plusieurs interruptions d'alimentation consécutives à des pannes de batterie malgré l'organisation d'un système de suivi à distance des tensions et de mise en charge d'une batterie de secours dans les locaux de la mairie. La durée de ces périodes dépourvues de données n'excède généralement pas quelques jours et on en dénombre au total 6 entre début mai et fin octobre 2005.

Pour pallier ces ruptures périodiques d'alimentation, il a d'abord été procédé à une modification du pas de temps d'acquisition des mesures (ramené à 6 h à compter du 31 août 2005) puis il a été décidé d'installer des panneaux solaires pour alimenter l'ensemble de l'installation, ce qui a été fait en date du 10 novembre 2005. Ce panneau solaire, récupéré sur le site de Menton, se compose de deux éléments, d'une puissance de 10 W chacun, munis d'un régulateur propre, ces régulateurs étant branchés en parallèle sur les batteries. Depuis la mise en place de ce panneau solaire, l'installation du site de Mormoiron s'avère totalement autonome et aucune rupture d'alimentation n'a plus été observée. Grâce à l'ensoleillement régulier du site, la tension aux bornes de la batterie reste constamment de l'ordre de 14 V.

En revanche, une interruption des mesures sur une des cannes a été constatée suite au dysfonctionnement d'un multiplexeur, ce qui s'est traduit par un arrêt des mesures sur cette canne depuis début avril 2006 (en cours de réparation). Il est à noter que depuis le 5 avril 2006, un deuxième créneau d'interrogation de la centrale a été ouvert (le mardi de 15 à 17 h, heure d'été), ce qui facilite le diagnostic des éventuels dysfonctionnements et raccourcit le délai d'intervention pour dépannage.

Outre les échantillons prélevés lors du sondage carotté préalable et pendant la mise en place des capteurs, des prélèvements supplémentaires ont été effectués en vue d'une caractérisation plus fine du matériau, y compris dans le cadre d'autres projets de recherche menés en parallèle sur la même thématique. Le 7 mars 2005, une fosse (notée Fos 1 sur le schéma de l'illustration 61) a été creusée manuellement à une profondeur de 0,5 m sur la parcelle voisine et a fait l'objet de prélèvements d'échantillons partiellement remaniés (mottes). Le 4 Juillet 2005, une fosse a été creusée à la pelle mécanique à une profondeur de 2 m (Fos 2) sur la parcelle expérimentale (Illustration 61) en vue de prélever une série d'échantillons intacts (caisse et tubes en inox). Le 16 Novembre 2005, deux sondages à la tarière manuelle (ST1 à 1 m et ST2 à 0,4 m) et une fosse pédologique creusée manuellement à une profondeur de 0,90 m ont permis l'analyse fine de la texture des premiers horizons de sol ainsi que le prélèvement d'échantillons remaniés et non remaniés (tubes aluminium et PVC) dans la fosse. Enfin, le 1^{er} Février 2006, une fosse a été creusée à la pelle mécanique à 1,80 m (Fos 4) pour permettre un nouveau prélèvement d'échantillons intacts (2 caisses d'une centaine de kg chacune et plusieurs tubes en PVC) qui ont été transmis au Laboratoire de Mécanique des Sols, Structures et Matériaux (LMSSMat) de l'École Centrale de Paris, partenaire du BRGM dans le cadre d'un autre projet de recherche sur cette même thématique (programme RGCU).

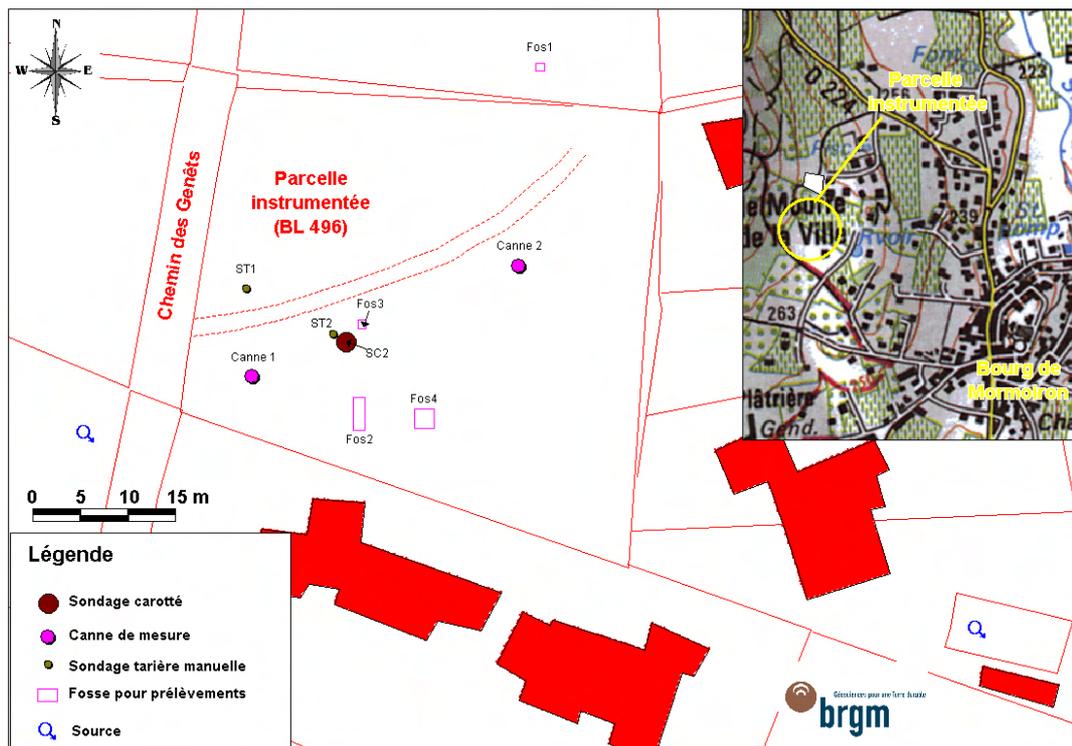


Illustration 61 - Plan de situation du site instrumenté à Mormoiron (extrait carte IGN 1/25 000) et localisation des points de prélèvement (extrait plan cadastral)

5.5.3. Dispositif mis en place

Les deux cannes Humitub ont été implantées sur le site comme indiqué sur le plan de situation ci-dessus (Illustration 61). La canne 1 est située en partie supérieure de la parcelle, juste en contrebas du chemin des genêts, dans une zone légèrement en pente vers l'est, au pied d'un orme de 4 à 5 m de hauteur, entouré de buissons épineux (Illustration 62). Une armoire électrique contenant un multiplexeur est installée à proximité immédiate.

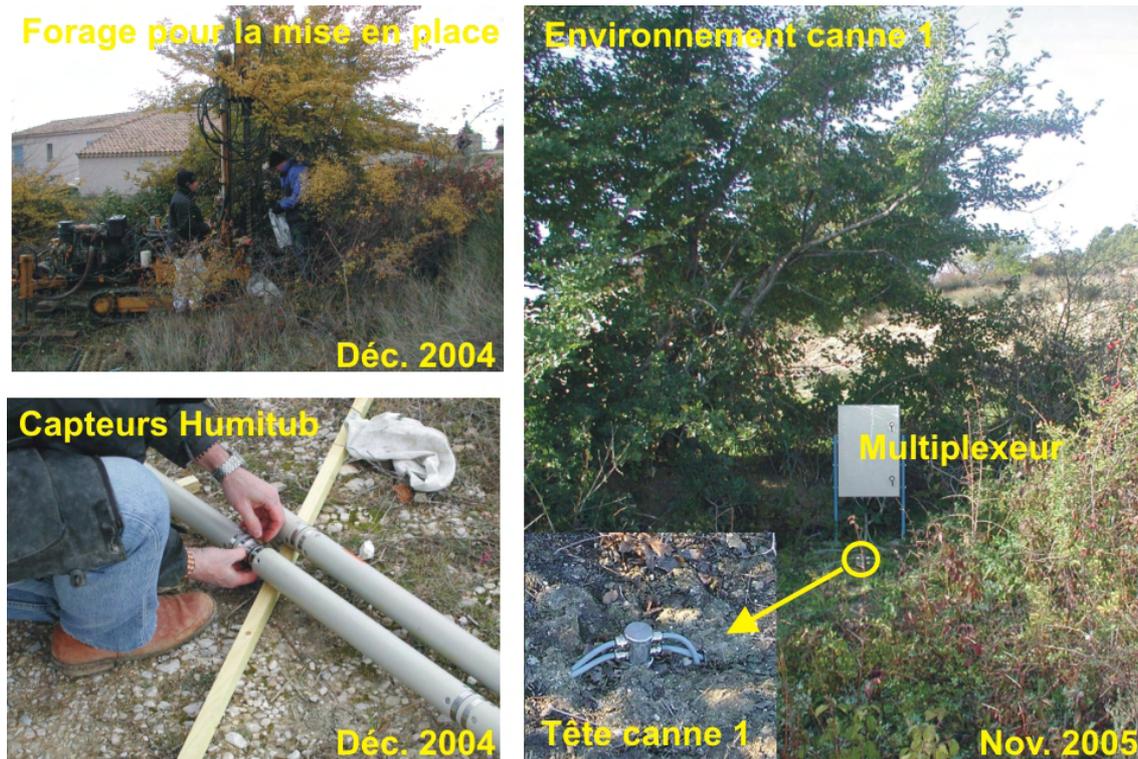


Illustration 62 – Mise en place et environnement de la canne 1 (proximité arbre)

La canne 2 est implantée plus bas, en terrain plat et dégagé, occupé par une herbe rase, à plusieurs mètres des buissons environnants (Illustration 63). La distance entre les deux cannes est de 30,40 m. La centrale d'acquisition et le pluviomètre sont situés à proximité immédiate de la canne 2, ainsi que les panneaux solaires et la batterie pour l'alimentation électrique. La centrale d'acquisition (centrale Osiris, commercialisée par IRIS Instruments), un des multiplexeurs et le modem (Iriscom) sont abrités dans une armoire métallique étanche et cadenassée.

Comme prévu dans le cahier des charges et précisé sur le schéma de principe plus haut (Illustration 60), les capteurs de permittivité de chacune des deux cannes se présentent sous forme de doubles électrodes annulaires (espacées de 10 mm), disposées à des profondeurs respectives de 0,5 m, 1 m, 1,5 m, 2 m, 2,5 m, 3 m, 3,5 m, 4 m, 4,5 m, 5 m, 6 m et 7 m.

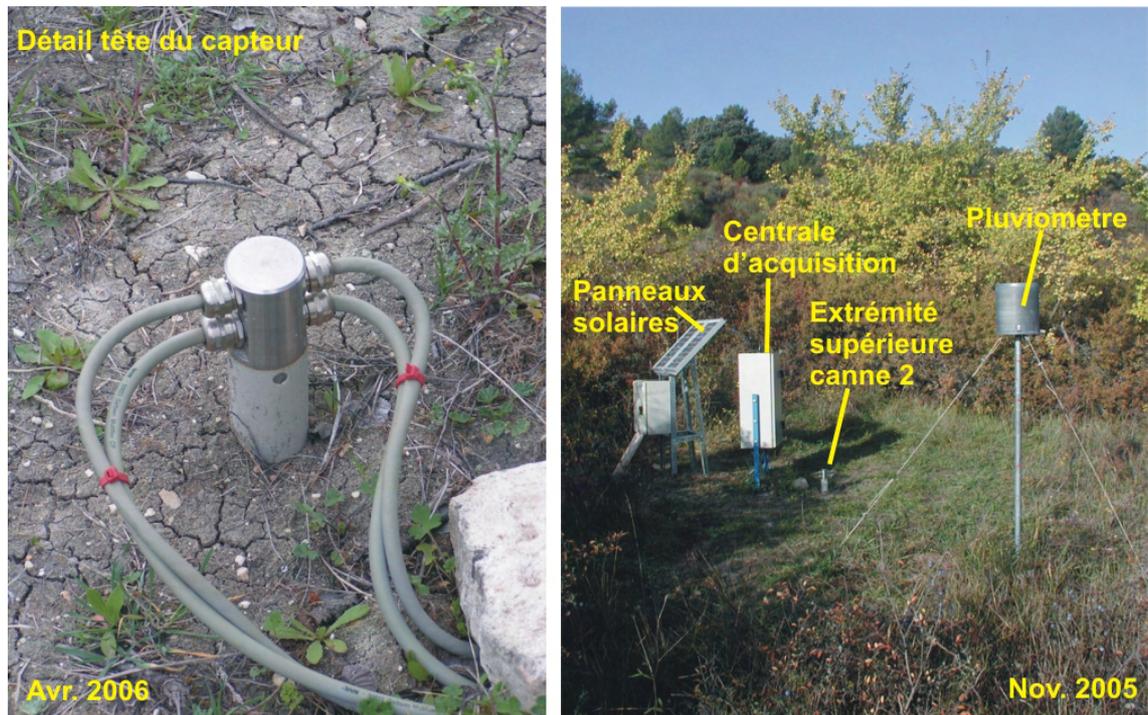


Illustration 63 – Environnement de la canne 2

Le diamètre extérieur des cannes étant de 50 mm, les forages destinés à leur mise en place ont été réalisés à la tarière en diamètre 63 mm, sans apport d'eau. Les cannes ont été descendues immédiatement après la perforation, sans difficulté particulière. L'espace annulaire resté libre (dont le volume théorique est de l'ordre de 8 l) a été comblé par déversement gravitaire d'une petite quantité de sable fin mis en place par voie humide (apport d'environ 20 l d'eau entre le 1^{er} et le 7 décembre 2004) tandis que la partie supérieure de cet orifice était colmatée avec soin sur une profondeur de 20 cm environ par compactage de l'argile environnante puis recouvrement par un film plastique enterré et enfin scellement au mortier (en date du 4 juillet 2005) pour éviter toute infiltration directe d'eau le long des cannes.

Il avait été supposé que les terrains argileux plastiques se refermeraient très rapidement autour des cannes et assureraient ainsi une bonne jonction avec les capteurs de permittivité. Cependant, les mesures obtenues sur ce site montrent que certains capteurs donnent des valeurs aberrantes, particulièrement faibles en périodes de sécheresse, ce qui laisse penser que la dessiccation du sol autour des sondes provoque périodiquement un retrait qui affecte la qualité du contact entre le sol et les électrodes. Même si le rayon d'action des capteurs capacitifs est de plusieurs centimètres, ce défaut de contact se traduit inévitablement par une altération de la qualité des mesures.

Par ailleurs, en période de forte pluviométrie, il a été constaté des phénomènes de divergence des mesures, ce qui traduirait la présence de fortes teneurs en eau du sol environnant, voire de circulations d'eau libre qui pourraient percoler en profondeur dans cet espace annulaire partiellement ouvert. Ces hypothèses sont actuellement en

cours de validation par des observations menées en laboratoire à partir d'une sonde étalon munie d'un capteur unique et qui est mise en place dans une cuve de matériau prélevé en grande quantité sur le site de Mormoiron. C'est pour tenter d'éviter de telles difficultés que l'instrumentation du second site, près de Poitiers, a été adaptée comme indiqué au paragraphe 6.5.3.

5.6. OBSERVATIONS LORS DE LA MISE EN PLACE

5.6.1. Caractérisation géologique

Outre les données bibliographiques et celles recueillies auprès de différents bureaux d'étude ayant procédé à des études de sol dans ce secteur, les informations les plus précises sur la nature du sol au droit de la parcelle expérimentale ont été obtenues à travers le sondage de reconnaissance préalable effectué en septembre 2004 par carottage, puis par les deux sondages à la tarière réalisés en décembre de la même année lors de la mise en place du matériel de mesure, et enfin par la réalisation de plusieurs fosses à la pelle entre juillet 2005 et février 2006.

Les principales observations effectuées lors du sondage carotté préliminaire sont résumées dans le log synthétique ci-dessous (Illustration 64).

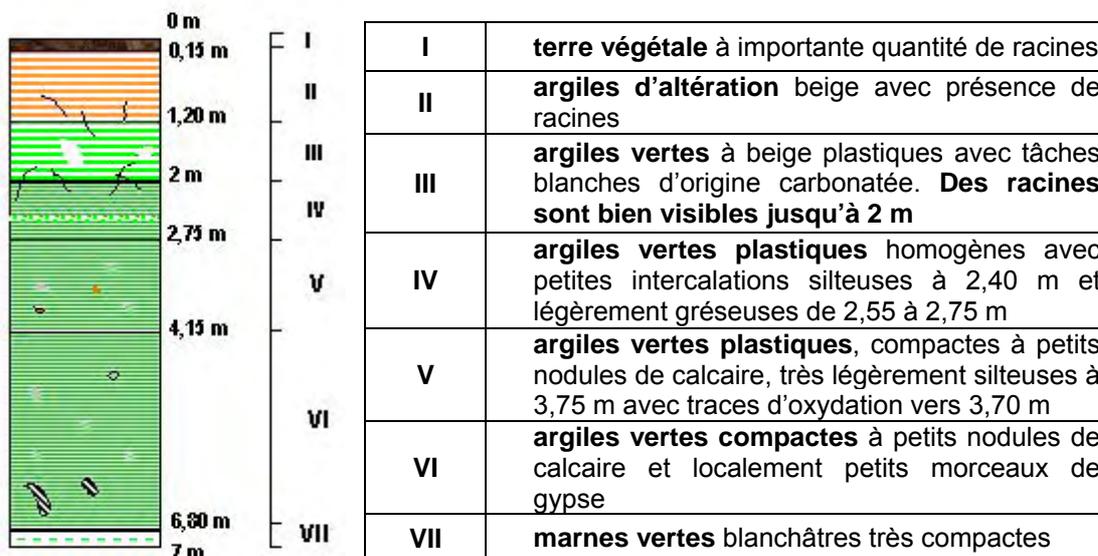


Illustration 64 - Coupe du sondage carotté réalisé le 2 septembre 2004

Les faciès argileux apparaissent sous une très mince couche (0,10 à 0,15 m) de terre végétale brune avec enchevêtrement de racines : ils sont d'abord constitués d'argiles beige-grisâtre avec nombreux granules de calcaire blanc, débris de matière organiques, tâches de rouille localisées et fréquentes radicelles (Illustration 65). A partir d'une profondeur d'environ 1,20 m, le matériau prend une teinte plus verdâtre et présente une consistance plus homogène et plastique, avec toujours des nodules de

calcaire blanc plus ou moins altérés, emballés dans la matrice. La présence de racines est observée au moins jusqu'à une profondeur de 2 m. Entre 2,40 et 2,50 m, on observe un passage d'argile verte légèrement silteuse (Illustration 65) et un autre entre 2,55 et 2,70 m avec localement un passage plus gréseux. Puis on retrouve des argiles vertes relativement homogènes, à consistance plastique en présence d'eau et avec toujours des nodules calcaires blancs épars de taille centimétrique à pluricentimétrique et même localement une plaquette de gypse. Le sondage est arrêté à la cote 6,80 m, dans des argiles marneuses vert-blanchâtre qui se referment très rapidement en présence d'eau (le forage doit être poursuivi avec un fluide de type polymère au-delà d'une profondeur de 5 m).

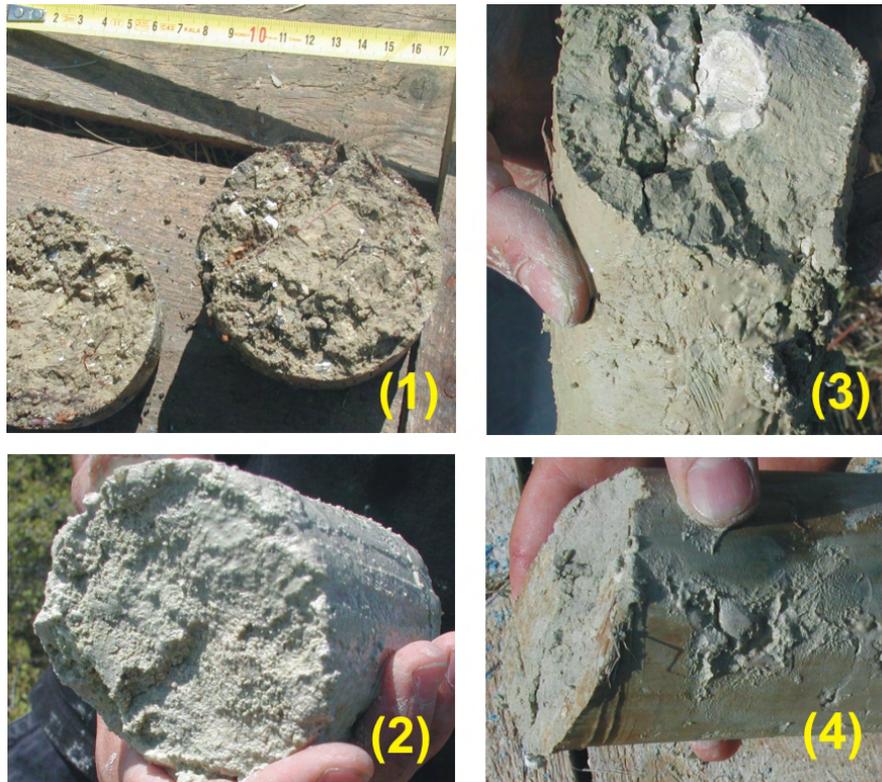


Illustration 65 – Faciès reconnus lors du sondage carotté (sept. 2004) : argile d'altération avec traces de matière organique, prof. 0,20 m (1) ; argile verte légèrement silteuse, prof. 2,50 m (2) ; argile verte avec nodule blanc, prof. 3 m (3) ; argile verdâtre homogène, prof. 4 m (4)

Les deux sondages réalisés à la tarière, à sec, en diamètre 63 mm pour l'installation des deux cannes Humitub en décembre 2004 ont confirmé ces observations (Illustration 66). Le premier sondage (St1) effectué à l'emplacement de la canne 1, en partie haute de la parcelle près d'un orme, montre la présence d'argile beige-verdâtre sur la quasi-totalité du profil, avec une densité variable de granules calcaires blanchâtres de taille pluricentimétrique, plus ou moins argilisés, des tâches de rouille éparses et des zones de teinte plus bleutée. Le matériau est relativement sec jusqu'à une profondeur de 4,50 m puis devient plus humide et présente une consistance nettement plus plastique. Un passage plus silteux est observé sur quelques dizaines de centimètres à partir de 4,50 m (ce qui paraît clairement corrélé avec cet

accroissement de la teneur en eau). Aux alentours de 6,80 m, on observe une nouvelle augmentation de la teneur en eau sans que le faciès devienne plus silteux. Le sondage est arrêté à 7,50 m dans une argile marneuse blanchâtre. Des échantillons sont prélevés tous les 50 cm jusqu'à 7,20 m, conservés en sachets plastique scellés et notés MOR-STi-Ej : Mormoiron – Sondage Tarière i – Échantillon à la profondeur j (indiquée en cm).

Sondage St1 (canne 1)

Coupe	Prof.	Epais.	Description Lithologique
	0,50	0,50	Argile limoneuse brun vert très humide et très plastique.
	1,00	0,50	Argile verte à cailloutis calcaires, humide et plastique.
	1,50	0,50	Argile vert clair peu humide.
	2,00	0,50	Argile vert clair sèche.
	3,00	1,00	Argile vert clair sèche et silteuse.
	4,50	1,50	Argile vert sombre humide.
	5,00	0,50	Argile verte à passées rubéfiées jaune à orange, normalement humide.
	5,50	0,50	Argile verte silteuse à passées rubéfiées jaunes, humide.
	7,50	2,00	Argile verte normalement humide.

Sondage St2 (canne 2)

Coupe	Prof.	Epais.	Description Lithologique
	0,50	0,50	Argile verte peu humide.
	2,50	2,00	Argile verte normalement humide.
	3,00	0,50	Argile vert sombre à passées rubéfiées oranges.
	3,50	0,50	Argile vert clair normalement humide.
	4,00	0,50	Argile vert sombre humide et plastique, à passées rubéfiées oranges.
	4,50	0,50	Argile verte et bariolée jaune.
	5,00	0,50	Argile verte, silteuse et humide.
	6,50	1,50	Argile vert clair humide et plastique.
	7,00	0,50	Argile vert clair, humide et plastique, à passées argileuses bleu clair.
	7,50	0,50	Argile vert clair humide et plastique, venues d'eau constatées aux environs de 7,00m.

Illustration 66 – Coupe lithologique des sondages à la tarière réalisés le 1^{er} décembre 2004 pour la mise en place des cannes de mesure (document Intrasol)

Le second sondage à la tarière a été réalisé le même jour, à l'emplacement de la canne 2, dans une partie plus plane et plus dégagée, à une trentaine de mètres en aval. Il a également fait l'objet de prélèvements réguliers pour analyses en laboratoire. Contrairement au précédent, la partie supérieure du profil (1 m) est franchement humide, puis le matériau est à nouveau très sec et pulvérulent jusque vers 3 m, plus humide au-delà et de consistance plastique après 4,50 m. Les faciès rencontrés sont similaires à ceux observés dans le précédent sondage : argile beige-verdâtre avec granules pluricentimétriques de calcaire blanc plus ou moins argilisés, épars dans la matrice, et ceci sur toute la hauteur du sondage poursuivi jusqu'à une profondeur de 7,50 m. Quelques passées rubéfiées de couleur jaune orangée sont observées entre 3,50 et 4,50 m, ainsi que des niveaux plus silteux entre 4,50 et 5 m. Aucune venue d'eau n'est observée.

Les autres indications sur la nature lithologique du sol ont été recueillies lors de l'ouverture des différentes fosses pour prélèvement d'échantillons intacts. L'épaisseur de l'horizon supérieur riche en humus, ne dépasse guère 10 cm sur l'ensemble du site, sauf en partie supérieure de la parcelle (sondage à la tarière manuelle ST1, localisé sur l'illustration 61), où elle atteint 15 à 20 cm (présence de remblais). Il s'agit d'un niveau riche en matière organique, de teinte brune à noire, à structure grumeleuse fine, offrant peu de résistance à la pénétration et montrant un très dense réseau de racines.

Ce niveau de terre riche en humus surmonte une couche d'argile beige-grisâtre, très plastique lors des observations effectuées en novembre 2005, collante, à structure compacte, comportant de nombreux nodules calcaires de taille centimétrique. Au niveau de ST1, cet horizon à structure massive et relativement humide se prolonge jusque vers 0,50 m de profondeur. Il renferme quelques fragments de briques, signes d'un remaniement de ce matériau de surface (remblai ancien, déversé en contrebas du chemin). Au-delà de cette profondeur, le matériau est plus sec et plus friable, les nodules calcaires présents au sein de la matrice argileuse étant nettement plus altérés.

Les observations effectuées au niveau de la fosse pédologique (Fos3) confirment la présence de trois horizons successifs en partie supérieure du profil (Illustration 67) :

- jusqu'à 0,10 m de profondeur, horizon riche en humus, de couleur brune à noirâtre, à structure grumeleuse fine et chevelu racinaire très dense ;
- de 0,10 à 0,45 m, horizon d'argile collante, de couleur beige jaunâtre, à structure massive et nombreux cailloux calcaires de taille centimétrique (présence de plaquettes de calcaire dur, de 7-8 cm de diamètre et 2-3 cm d'épaisseur). Passage assez brutal entre les horizons 1 et 2 (développement horizontal des racines à l'interface, car elles ont plus de difficulté à pénétrer la couche inférieure). Pas de trace d'hydromorphisme dans l'horizon 2 malgré le taux important d'argile ;
- au-delà de 0,45 m (et au moins jusqu'à 0,90 m), horizon riche en argile et également humide, mais de couleur plus brunâtre et à structure plus développée. Le passage entre les horizons 2 et 3 est relativement progressif. Le réseau racinaire est plus dense dans l'horizon 3 avec de nombreuses racines verticales. On note la présence d'une activité lombricienne soutenue dans cet horizon ainsi que de nombreux nodules calcaires avec présence, vers 0,70 m, de cailloutis de silex noir et d'un nodule de limonite.

Le front d'humidification du sol est manifestement plus profond au niveau de la fosse pédologique (> 0,90 m) que dans le sondage ST1 (autour de 0,50 m), ce qui s'explique par la topographie : La partie supérieure de la parcelle (où se situe également la canne 1, par ailleurs abritée sous un arbre et en contrebas d'une levée de terre) présente une pente plus forte qui favorise l'écoulement, alors que la partie basse de la parcelle (à partir de la fosse et jusqu'à la canne 2) est plus propice à l'infiltration de l'eau de ruissellement.



Horizon 1 :
Niveau riche en humus,
à structure grumeleuse fine,
avec réseau de racines très dense

Horizon 2 :
Argile beige jaunâtre très plastique,
à structure massive peu développée,
nombreux cailloutis calcaires de taille
centimétrique (nodules et plaquettes),
réseau racinaire peu développé

Horizon 3 :
Argile plastique beige à brune,
à structure moyenne à développée,
quelques cailloutis calcaires et
nodules de silex noirs,
réseau racinaire assez dense et
présence de gros lombrics

Illustration 67 - Succession des horizons identifiés au niveau de la fosse pédologique

Lors des ouvertures de fosse faites à la pelle mécanique en vue du prélèvement d'échantillons non remaniés, des observations directes sur des coupes de sol ont pu être faites sur les deux premiers mètres du profil. La première fosse (Fos 2) a été ouverte le 4 juillet 2005 en période très sèche et a permis d'observer dans l'horizon 2 (argile beige grisâtre avec nombreux nodules blanchâtres de taille pluricentimétrique) des fissures de retrait se prolongeant jusqu'à une profondeur maximale de 70 cm. Au dessous, le matériau est plus compact, de couleur dominante verdâtre, avec toujours de nombreux nodules calcaires blanchâtres et des radicelles visibles jusqu'en fond de fouille à 1,90 m. Un passage plus silteux est observé entre 1,70 et 1,80 m sans venue d'eau.

Une autre fosse (Fos 4) a été ouverte le 1^{er} février 2006, dans le même secteur situé en bordure sud de la parcelle mais légèrement plus en aval (cf. Illustration 61). On note en particulier une importante venue d'eau depuis l'amont dans un coin de la fosse,

entre 1,70 m et 1,90 m de profondeur. Le sol correspond à cet endroit à un niveau très silteux et très humide, relativement homogène (Illustration 68). A la même profondeur mais à une distance d'environ 1,80 m plus en aval (côté est), le sol est constitué d'argile compacte, très homogène, à consistance plastique, ce qui indique clairement que ces niveaux silteux, sièges de circulations d'eau temporaires, sont bien des lentilles discontinues et ne correspondent pas à une strate continue qui s'étendrait partout à la même cote.



Illustration 68 – Ouverture d'une fouille à la pelle sur le site expérimental de Mormoiron en février 2006 (1) : faciès argileux (2) et venue d'eau dans un faciès plus silteux (3) à 2 m de distance et à la même profondeur (1,70 m)

5.6.2. Caractérisation physique du matériau

Une mesure de la masse volumique γ_s (masse volumique réelle de la fraction solide, déterminée par pycnométrie après séchage et broyage à une granulométrie inférieure à 100 μm) a été réalisée sur l'échantillon MOR-ST1-E150 (prélevé à une profondeur de 1,50 m) au laboratoire du BRGM. La valeur mesurée est de 2,61 g/cm^3 .

Des analyses granulométriques ont été réalisées, toujours par le laboratoire du BRGM, sur trois échantillons prélevés dans le sondage carotté préliminaire. Les échantillons sont mis en suspension, puis lavés sur un tamis de 80 μm . La fraction supérieure à 80 μm est séchée et pesée, alors que la fraction inférieure à 80 μm est analysée par sédimentation à l'aide de l'appareil SEDIGRAPH 5100. Les résultats de ces analyses sont indiqués dans le tableau ci-après (Illustration 69). La fraction inférieure à 80 μm est systématiquement supérieure à 90 % tandis que la fraction argileuse (inférieure à 2 μm) varie fortement entre 25 et 65 %. Ces données sont confirmées par d'autres

analyses effectuées ultérieurement en vue du calage des modélisations (cf. chapitre 8, Illustration 116).

Référence échantillons	Passant à 80 µm (%) par tamisage	Passant à 2 µm (%) par sédimentation
MOR-SC2-E50	93,46	45,98
MOR-SC2-E195	97,72	64,30
MOR-SC2-E400	90,48	24,61

Illustration 69 – Granulométrie sur des échantillons issus du sondage carotté

Des mesures de calcimétrie ont été réalisées sur ces mêmes échantillons issus du sondage carotté. Avant essai, les échantillons sont séchés et broyés à une granulométrie inférieure à 100 µm (Norme NF X 31-105). Les résultats sont indiqués dans le tableau ci-dessous (Illustration 70) et montrent des valeurs relativement constantes, autour de 40 % de carbonate, ce qui confirme le caractère marneux de la formation.

Référence échantillons	Calcite (CaCO ₃)
MOR-SC2-E50	44,1
MOR-SC2-E195	40,7
MOR-SC2-E400	37,3

Illustration 70 – Calcimétrie sur des échantillons issus du sondage carotté

Des essais au bleu de méthylène sur fraction totale ont été réalisés, toujours au laboratoire du BRGM et sur les échantillons prélevés par carottage. Avant l'essai d'adsorption, les échantillons sont dispersés dans de l'eau additionnée de 10 % d'eau oxygénée, puis laissés au repos 12 h (Norme NF P 94-068). Les résultats obtenus sont présentés ci-dessous (Illustration 71) et montrent des valeurs relativement élevées, comprises entre 5,3 (à 4 m de profondeur, pour un matériau plus silteux) et 12,9 dans un faciès plus riche en argile à une profondeur de 1,95 m (la corrélation avec le pourcentage de fraction fine < 2 µm étant très étroite).

Référence échantillons	VBS (en g de bleu / 100 g de matériau)
MOR-SC2-E50	8,8
MOR-SC2-E195	12,9
MOR-SC2-E300	7,1
MOR-SC2-E400	5,3

Illustration 71 – Valeurs de Bleu de méthylène sur des échantillons issus du sondage carotté

D'autres essais en laboratoire ont été réalisés dans le cadre d'un projet parallèle financé par le RGPU. Ces essais ont été menés par le LMSSMat (Laboratoire de

Mécanique des Sols, Structures, Matériaux de l'Ecole Centrale de Paris) et ont consisté en particulier à déterminer les limites d'Atterberg sur des échantillons prélevés en mars 2005 (Fos 1), à caractériser leur porosimétrie et à tester les cycles de drainage-humidification sur échantillons intacts. On retiendra en particulier que les résultats obtenus fournissent une limite de liquidité W_L de 52 %, une limite de plasticité W_P de 23,3 % et un indice de plasticité I_p de 28,7 %. La caractérisation de la porosimétrie de ces argiles montre la présence de pores d'un diamètre majoritairement de 1 μm , et secondairement de 0,03 μm .

D'autres essais pratiqués par le LMSSMat sur les prélèvements effectués le 4 juillet 2005 (Fos 2) dans des horizons plus silteux ont permis de confirmer l'hétérogénéité de la formation sur le site, puisque le matériau prélevé s'est avéré moins argileux et moins sensible au retrait-gonflement que celui issu des prélèvements du 7 mars 2005 (Fos 1) ou des sondages carottés (SC1 et SC2). Il présente en effet une limite de liquidité comprise entre 31 et 33 %, une valeur de bleu de méthylène de 5 g pour 100 g de matériau, un passant à 80 μm de 78 %, et un passant à 2 μm inférieur à 5 %.

5.6.3. Caractéristiques minéralogiques du matériau

La fraction phylliteuse des échantillons a été déterminée par diffractométrie aux rayons X à partir de lames orientées normales, glycolées pendant 12 heures en tension de vapeur puis chauffées à 490°C pendant 4 heures. L'appareillage utilisé par le laboratoire d'analyse du BRGM est un diffractomètre SIEMENS D5000 automatisé (balayage de 2 à 36°2 θ , vitesse de balayage de 0,02°2 θ /seconde, temps de comptage : 1 seconde par pas, échantillon fixe). Les proportions des différents constituants ont été estimées à partir de l'aire des pics, à l'aide du logiciel DIFFRAC^{plus}. Il faut bien tenir compte du fait que les pourcentages indiqués sont des valeurs relatives des phases phylliteuses présentes dans la fraction dite inférieure à 2 μm de l'échantillon. Les résultats, obtenus à partir de 3 échantillons prélevés dans le sondage carotté, toujours à la même profondeur, sont indiqués ci-après. Ils montrent une grande homogénéité dans la composition minéralogique de la phase argileuse avec une dominance très nette des interstratifiés à dominante de smectite.

Échantillon MOR-SC2-E50 :

Interstratifiés illite/smectite ou micas/smectite: ~99 %
 Illite et/ou micas: ~1 %
 Proportion de smectite dans les interstratifiés: ~69 %

Échantillon MOR-SC2-E195 :

Interstratifiés illite/smectite ou micas/smectite: ~99 %
 Illite et/ou micas: < 1 %
 Proportion de smectite dans les interstratifiés: ~72 %

Échantillon MOR-SC2-E400 :

Interstratifiés illite/smectite ou micas/smectite: ~99 %
 Illite et/ou micas: <1 %
 Proportion de smectite dans les interstratifiés: ~72 %

5.6.4. Teneurs en eau initiales

Les teneurs en eau ont été mesurées au laboratoire du BRGM à partir des échantillons prélevés à la tarière à sec lors de la mise en place des sondes, le 1^{er} décembre 2004. Au droit de la canne 1 (sondage ST1), la teneur en eau en place est relativement constante jusqu'à une profondeur de 4,50 m (de l'ordre de 18 à 20 %, soit en deçà de la limite de plasticité du matériau puisque celle-ci se situe aux alentours de 23 %), ce qui confirme le caractère particulièrement sec du sol dans les premiers mètres (Illustration 72). La teneur en eau augmente sensiblement ensuite pour se stabiliser autour de 34 % au-delà d'une profondeur de 6 m. A titre indicatif, les essais réalisés par le LMSSMat sur un échantillon intact prélevé dans la Fos 2 (faciès toutefois plus silteux) ont montré qu'une teneur en eau à l'état naturel de 31 % correspond à une succion de 8 kPa, un degré de saturation de 90 % et un indice des vides de 0,93.

Echantillon	Profondeur (m)	W (%)
MOR-ST1-E50	0,5	18,00
MOR-ST1-E100	1,0	18,24
MOR-ST1-E150	1,5	20,61
MOR-ST1-E200	2,0	15,88
MOR-ST1-E250	2,5	20,57
MOR-ST1-E300	3,0	17,29
MOR-ST1-E350	3,5	19,76
MOR-ST1-E400	4,0	21,28
MOR-ST1-E450	4,5	17,42
MOR-ST1-E500	5,0	23,70
MOR-ST1-E550	5,5	26,71
MOR-ST1-E600	6,0	27,01
MOR-ST1-E650	6,5	34,51
MOR-ST1-E700	7,0	33,75
MOR-ST1-E750	7,5	34,22

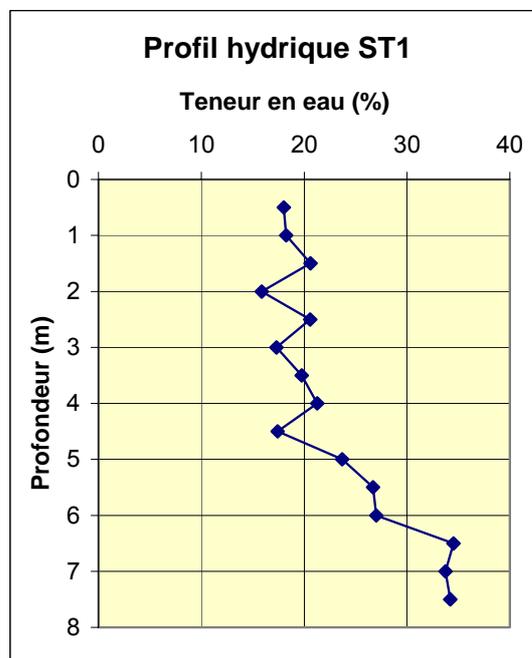


Illustration 72 – Profil hydrique mesuré dans le sondage à la tarière ST1

Au droit de la canne 2 (sondage ST2), la teneur en eau en place (Illustration 73) est très nettement supérieure dans le premier mètre (30 %). Ceci correspond aux observations de terrain et s'explique par une réhumidification du sol au cours de l'automne 2004, ce qui n'a pas été le cas au droit de la canne 1 située sous couvert végétal et dans une zone plus pentue). Au-delà, la teneur en eau est comparable à celle observée dans le profil précédent, avec des valeurs comprises entre 18 et 20 %. On observe toutefois un déficit plus marqué avec des teneurs en eau de l'ordre de 15 % entre 2,50 et 4,50 m de profondeur de 4,50 m. Par ailleurs, on ne note aucune augmentation significative de la teneur en eau au-delà de cette profondeur de 4,50 m, ce qui constitue une différence très marquée (et difficilement explicable) avec le profil précédent.

Echantillon	Profondeur (m)	W (%)
MOR-ST2-E50	0,5	29,28
MOR-ST2-E100	1,0	19,10
MOR-ST2-E150	1,5	21,35
MOR-ST2-E200	2,0	16,53
MOR-ST2-E250	2,5	14,68
MOR-ST2-E300	3,0	14,53
MOR-ST2-E350	3,5	14,39
MOR-ST2-E400	4,0	15,47
MOR-ST2-E450	4,5	15,83
MOR-ST2-E500	5,0	19,46
MOR-ST2-E550	5,5	16,38
MOR-ST2-E600	6,0	18,54
MOR-ST2-E650	6,5	16,67
MOR-ST2-E700	7,0	18,79
MOR-ST2-E750	7,5	17,90

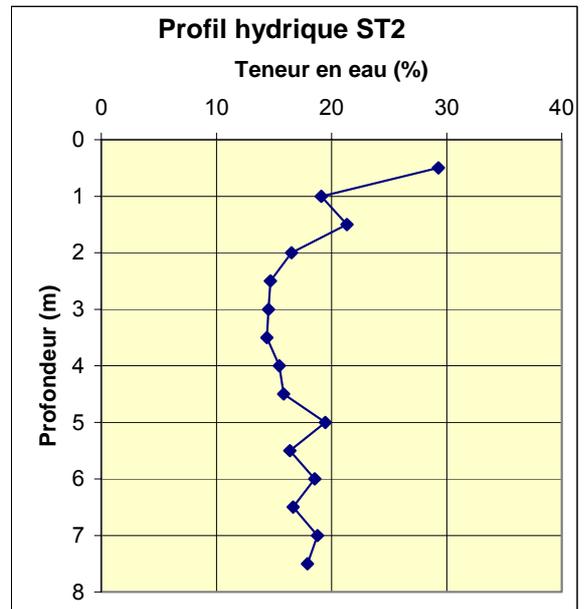


Illustration 73 – Profil hydrique dans le sondage à la tarière 2 de Mormoiron

Une mesure de teneur en eau avait également été effectuée sur l'échantillon MOR-SC2-E50 (prélèvement à 50 cm de profondeur dans le sondage carotté, réalisé le 2 septembre 2004, donc avant toute réhumidification liée aux pluies automnales). Le résultat avait fourni une teneur en eau de 15,41 %.

6. Site expérimental du Deffend

6.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE

Le site retenu pour le suivi des teneurs en eau dans un sol argileux exposé à un climat océanique se trouve sur la commune de Mignaloux-Beauvoir, au lieu-dit Le Deffend, à environ 4 km au sud-est de Poitiers (Illustration 74), dans la Vienne (86). Le terrain est géré par l'Université de Poitiers avec qui le BRGM a signé une convention en novembre 2005 pour la mise à disposition du site pendant la durée de l'expérimentation. Il est également utilisé comme site expérimental par d'autres organismes de recherche dont un Observatoire Régional de l'Environnement et le laboratoire HydrASA (Hydrogéologie, Argiles, Sols, Altération), unité mixte de recherche rattachée au CNRS et à l'ESIP (École Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers).

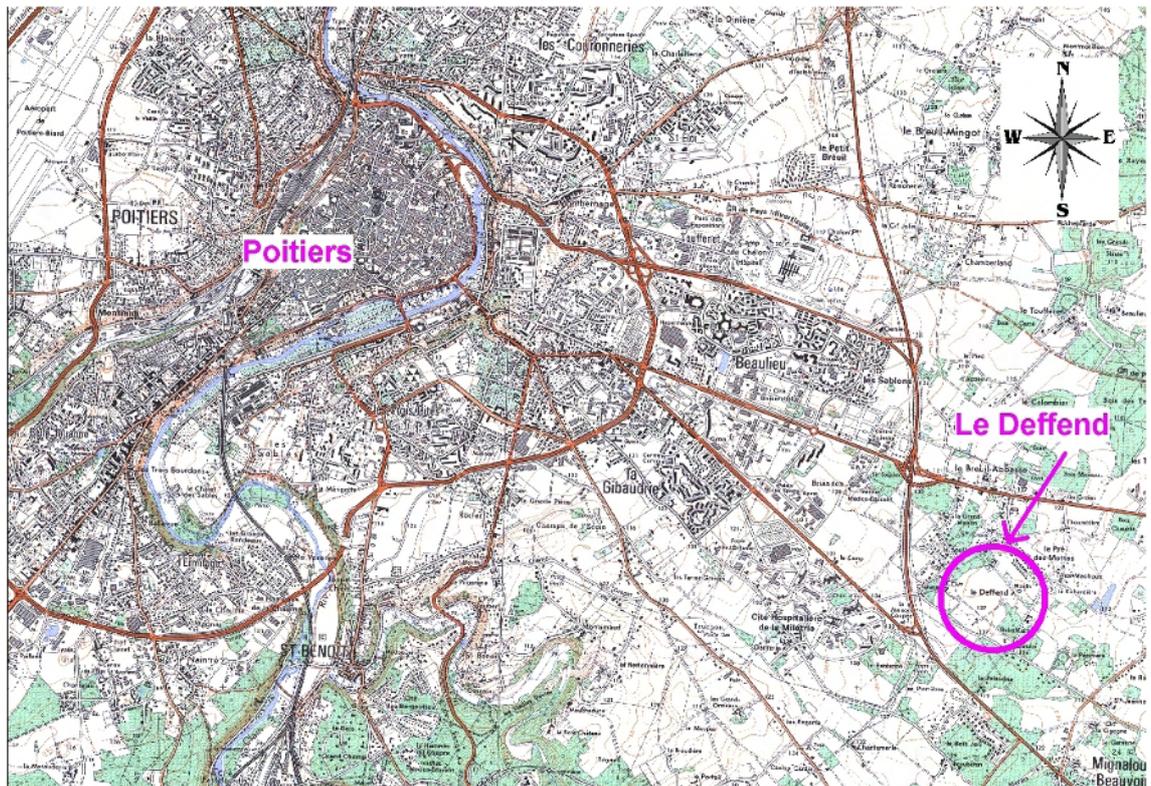


Illustration 74 – Plan de situation du site du Deffend (extrait carte IGN 1/25 000)

6.2. CARACTERISATION GEOLOGIQUE DU SITE

La carte géologique (Poitiers, 1/50 000), indique que la partie principale du site est recouverte par des formations argilo-sableuses du Tertiaire (*Complexe des Bornais*), constituées d'argiles silteuses, de couleur grise à jaunâtre, parfois ocre à rouge (Illustration 75). La base de ces dépôts intègre localement des argiles de décalcification des calcaires du Dogger (Bajocien à Bathonien) dont le toit présente de nombreuses ondulations. Ces niveaux calcaires affleurent directement en partie orientale du site (notamment sous le château et l'ancien moulin). Quant à l'extrémité nord du site, comprise entre les vergers du Conservatoire régional du patrimoine végétal et le lotissement du Pré des Mottes, elle est constituée, d'après la carte géologique, de marnes mises en place entre l'Éocène supérieur et l'Oligocène inférieur (désignées sous le nom de *Marnes de l'Oligocène*). Il s'agit d'argiles grises à verdâtres et de marnes blanches à nodules de calcaire nacré, généralement coiffées par des niveaux de calcaires lacustres souvent silicifiés.

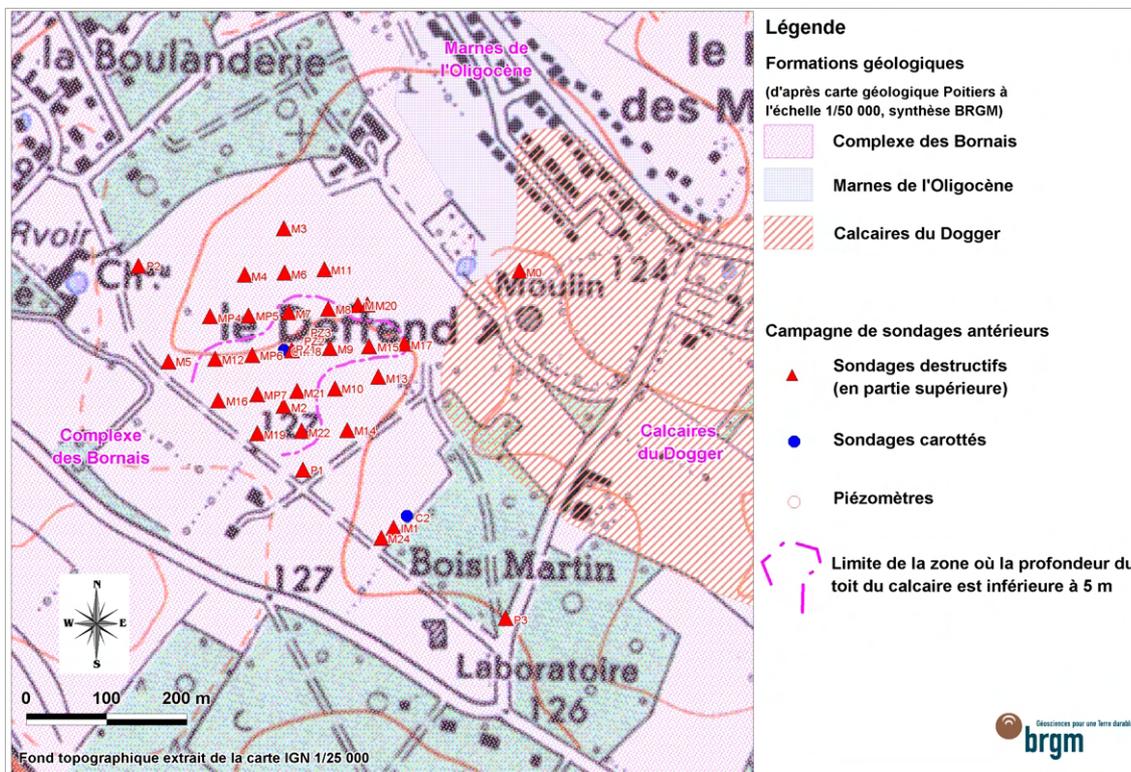


Illustration 75 - Contexte géologique du site du Deffend et sondages antérieurs disponibles

De nombreux sondages profonds (120 m pour la plupart d'entre eux) ont été réalisés sur le site en 2002 et 2004, dans le cadre d'un programme de suivi hydrogéologique du site (Compère, 2005). Ces sondages ont été réalisés en destructif jusqu'au toit du calcaire, puis carottés ensuite. Ils permettent d'indiquer la profondeur du toit du calcaire (Dogger), laquelle varie fortement (entre 0,50 et 27 m, par rapport au terrain naturel), mais sont peu utiles pour caractériser le recouvrement superficiel composé de terrains argilo-sableux du Tertiaire (*Complexe des Bornais*) mais aussi, au moins

localement, d'argiles de décalcification. L'emplacement de ces sondages (notés principalement M0 à M24) apparaît sur l'illustration 75. L'interprétation de ces sondages permet d'identifier, dans la partie centrale de la zone investiguée, un secteur où le toit du calcaire est très superficiel. La limite du secteur où l'épaisseur du recouvrement tertiaire est inférieure à 5 m est représentée par un trait (tireté violet) sur la carte de l'illustration 75.

La zone située entre les sondages M4 et MP5 (carré de 15 m de côté), dans un secteur où l'épaisseur du recouvrement argilo-limoneux varie entre 8 et 15 m, est réservée pour des investigations à usage géotechnique conduites par le laboratoire HydrASA et a fait l'objet de plusieurs sondages complémentaires à faible profondeur (Illustration 76). Une première campagne menée en avril 2004 a consisté en des prélèvements à la tarière motorisée à faible profondeur (0 à 1,20 m) et en la réalisation d'un sondage à une profondeur de 12 m. Les essais de caractérisation en laboratoire montrent des profils de valeurs au bleu de méthylène (Vb) variant entre 0 et 10,3 (avec des valeurs supérieures à 6 au-delà de 3 m de profondeur) et des indices de plasticité (Ip) compris entre 9,2 et 54,7 %.

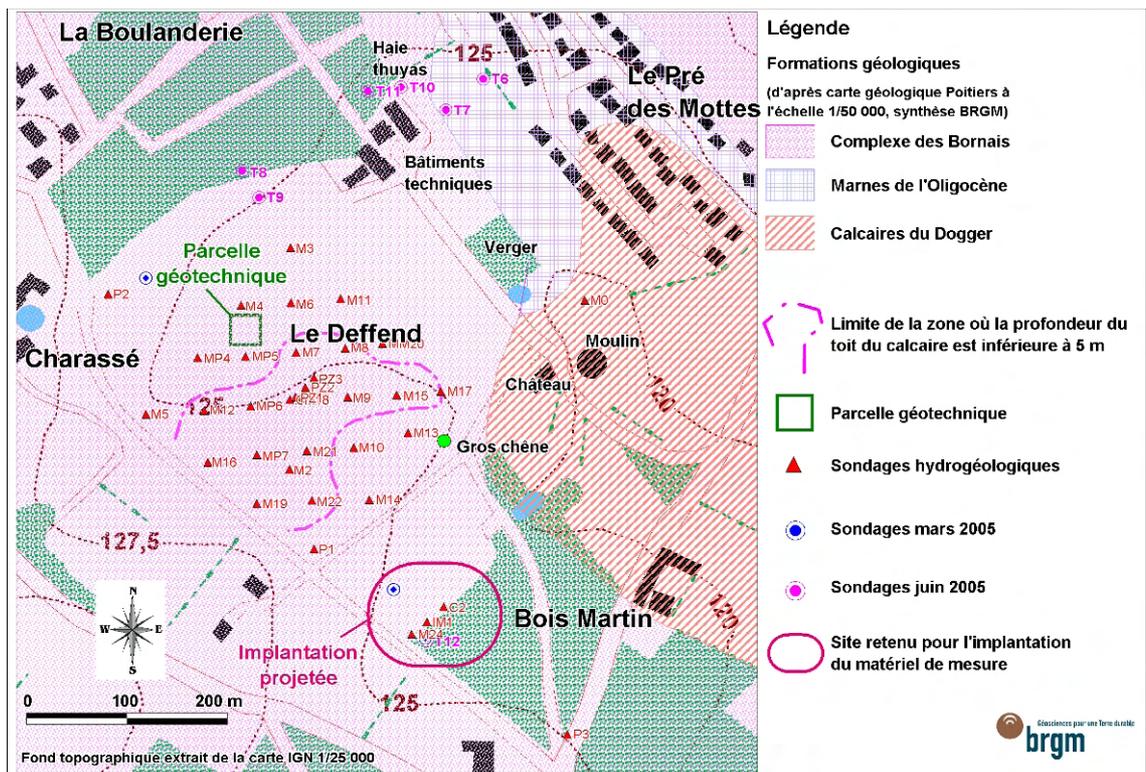


Illustration 76 - Implantation des sondages préliminaires et localisation du site retenu pour l'installation du matériel de mesure

Une deuxième campagne de sondages, réalisée en mars 2005, a complété les investigations sur cette parcelle géotechnique (avec un sondage destructif à 12 m de profondeur et 2 sondages carottés à 5,60 et 13,50 m) et permis de tester deux secteurs susceptibles d'être équipés pour l'instrumentation du site par Humitub pour le

suivi des teneurs en eau en continu dans le sol. Le premier secteur (noté « site A » sur l'illustration 76), situé au nord-ouest de la parcelle, près du réservoir AEP de Charassé, a fait l'objet de 2 nouveaux sondages (ST1 et ST2), de part et d'autre du forage antérieur P2, arrêtés tous deux sur dalle calcaire à 4 m de profondeur.

Le second secteur testé se trouve au sud-est de la parcelle, en lisière d'une zone boisée (lieu-dit Bois Martin). Deux sondages y ont été réalisés à la tarière, à une profondeur respective de 9 m (ST3, situé en lisière de la forêt) et 8 m (ST4, situé une soixantaine de mètres plus à l'ouest au milieu d'un champ labouré). Ces deux sondages ont rencontré, sur toute leur hauteur, des limons bruns plus ou moins argileux, avec de faibles teneurs en carbonates (généralement inférieures à 5 %), sauf à la base de ST3 où l'on se rapproche manifestement du substratum calcaire à partir de 8,50 m de profondeur.

Les valeurs de bleu mesurées en sondage sont assez faibles dans ST4 (2 à 4) puis augmentent sensiblement (7 à 8) au-delà de 6 m de profondeur. Elles atteignent des valeurs élevées (7 à 9) dès la profondeur de 3 m dans le sondage ST3. Trois autres sondages (M24, IM1 et C2), destructifs en partie supérieure, avaient déjà été réalisés dans le même secteur lors de la campagne d'investigation antérieure. Le sondage destructif M24 a rencontré des argiles et argiles calcaires jusqu'à 15 m de profondeur et le sondage C2 a rencontré le toit du calcaire vers 7 à 8 m de profondeur, tandis que l'analyse des cuttings de IM1 indique la présence de calcaire oolithique et d'argiles marron immédiatement sous la terre végétale. Quant au forage P1, situé environ 80 m à l'ouest de ST4, il montre la présence d'argiles rouges avec grains de quartz jusque vers 13 m de profondeur, puis d'argiles calcaires jusqu'à 28 m.

Une troisième campagne de reconnaissance s'est déroulée sur le site en juin 2005. La localisation de ces sondages notés T6 à T12, est indiquée sur l'illustration 76. Le sondage T6 a été réalisé à l'extrémité nord de la parcelle, le long de la rangée d'arbres qui délimite le lotissement du Pré des Mottes, dans un secteur où la carte géologique indique la présence des *Marnes de l'Oligocène*. Ce sondage a rencontré une argile brune finement silteuse jusqu'à une profondeur d'au moins 8 m, avec deux niveaux indurés siliceux respectivement à 4,50 et 5,50 m de profondeur, sur quelques dizaines de centimètres d'épaisseur. La présence de ces niveaux indurés difficiles à perforer à la tarière et les valeurs de bleu relativement faibles (1 à 4) mesurées sur ce sondage ne permettaient pas de retenir ce secteur pour l'instrumentation. Le sondage T7, réalisé au sud-ouest du précédent, en secteur non arboré, est plus favorable (Vb variant entre 2 et 7) mais a rencontré également un niveau siliceux induré à 5,50 m de profondeur.

Les sondages T8 et T9, réalisés à l'ouest des bâtiments techniques (derrière l'antenne) ont également rencontré des bancs de calcaire silicifié dur, rendant localement impossible la perforation à la tarière au-delà d'une profondeur de 3,50 m. Les valeurs de bleu mesurées varient entre 3 et 8 dans T8 et entre 1 et 9 dans T9 (avec une nette décroissance au-delà de 3,50 m de profondeur). Quant aux sondages T10 et T11 prévus derrière les bâtiments techniques, ils ont dû être abandonnés après refus sur banc induré à 2,50 m de profondeur sur T10.

Un dernier sondage, noté T12, a été réalisé à l'occasion de cette campagne, légèrement au nord de ST3. Il a rencontré de l'argile brune avec quelques passées silteuses jusqu'à une profondeur de 8 m, avec traversée d'un banc induré de calcaire blanchâtre entre 3 et 3,50 m, lequel n'avait pas été repéré sur ST3. Les valeurs de bleu oscillent entre 2 et 6 sur tout le profil, avec une pointe à 10 entre 1 et 1,50 m de profondeur.

L'ensemble de ces investigations a finalement conduit à retenir, comme emplacement pour la mise en place des capteurs d'humidité, un terrain au sud du site du Deffend (noté « emplacement projeté » sur l'illustration 76), de part et d'autre de l'alignement des forages profonds IM1, M24 et C2. A l'ouest de cet alignement s'étend une parcelle plane labourée jusqu'en 2005 (Illustration 77) et actuellement enherbée. A l'est des forages profonds, cette parcelle se termine par un fossé d'environ 1 m de profondeur qui longe une parcelle boisée (lieu-dit « Bois Martin ») légèrement surélevée par rapport à la zone de prairie. La lisière occidentale de cette parcelle boisée est constituée d'un peuplement de feuillus avec une nette prédominance de chênes et présence subordonnée de châtaigniers et hêtres

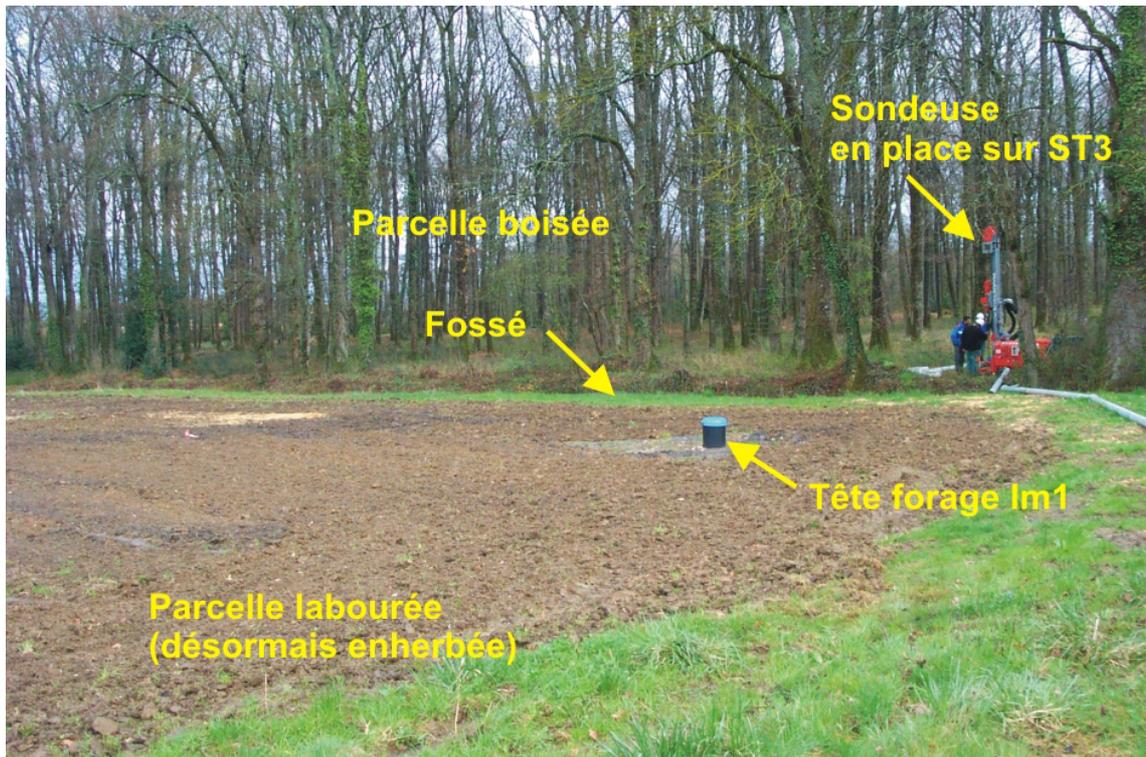


Illustration 77 – Environnement du site retenu pour l'installation du matériel expérimental (photo prise lors de la réalisation du sondage ST3, mars 2005)

6.3. SUSCEPTIBILITE AU RETRAIT-GONFLEMENT DES ARGILES

Dans le cadre de sa mission de service public, le BRGM a été chargé de réaliser en 2002 la carte de l'aléa retrait-gonflement des argiles sur l'ensemble du département de

la Vienne. L'établissement de cette carte repose en particulier sur la lecture de la carte géologique locale, après harmonisation, et sur l'interprétation des formations argileuses et marneuses, ainsi que sur le recensement des sinistres déclarés.

La carte ainsi réalisée (Illustration 78) avait placé en aléa faible les affleurements du Dogger (à dominante calcaire mais localement recouverts d'argiles de décalcification) et en aléa moyen les recouvrements d'argiles sableuses tertiaires (*Complexe des Bornais*) dans lesquels se trouve la zone retenue pour l'implantation des capteurs d'humidité. La parcelle instrumentée est représentée par un point bleu sur cette extrait de la carte d'aléa et apparaît donc dans une zone d'aléa moyen. Quant aux *Marnes de l'Oligocène*, qui s'étendent localement au nord du site du Deffend, elles ont été considérées en aléa fort car leur fraction argileuse est essentiellement formée de montmorillonite. Malheureusement, il n'a pas été possible d'y implanter le matériel expérimental pour différentes raisons liées à la fois à l'organisation interne du site, à l'occupation de l'espace et à l'environnement géologique (présence de bancs durs localement silicifiés à faible profondeur).

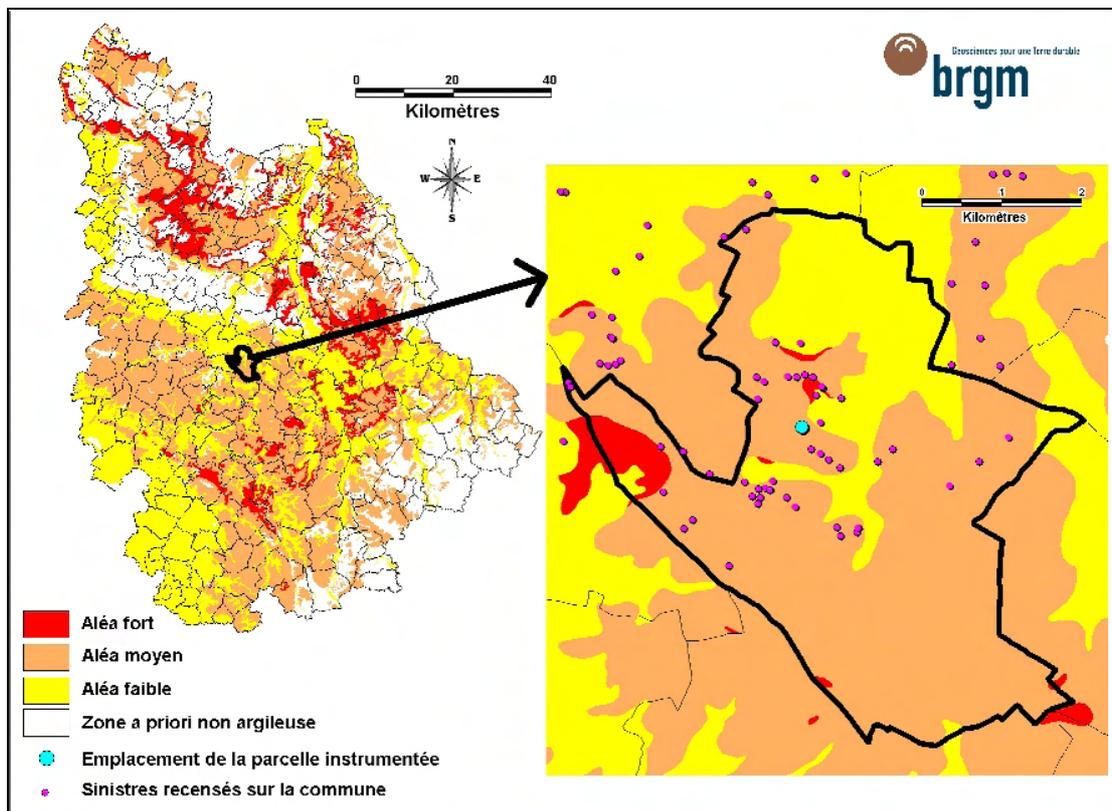


Illustration 78 - Carte d'aléa retrait-gonflement sur le département de la Vienne et la commune de Mignaloux-Beauvoir

Au cours de l'étude menée en 2001-2002 en vue d'établir la carte départementale d'aléa retrait-gonflement des argiles, une cinquantaine de sites de sinistres consécutifs à ce phénomène avait été identifiée dans la seule commune de Mignaloux-Beauvoir,

dont 28 dans un rayon de 1 km autour du Deffend. Il est à noter par ailleurs qu'au cours de l'été 2003, environ 600 sinistres supplémentaires attribués au phénomène de retrait-gonflement des argiles ont été recensés sur le territoire des 10 communes qui constituaient à cette date la Communauté d'Agglomération de Poitiers, dont une bonne part dans la commune de Mignaloux-Beauvoir, qui est donc particulièrement touchée par ce risque.

6.4. CARACTERISATION CLIMATIQUE DU SITE

Le site retenu est soumis à un climat de type océanique. Les données fournies par Météo-France correspondent aux cumuls journaliers calculés à la station de Poitiers-Biard (située à environ 8 km du Deffend et sensiblement à la même altitude) et couvrent une période allant du 1^{er} janvier 1949 au 31 décembre 2005. Elles ont été traitées de manière à faire ressortir les caractéristiques du climat local et les grandes variations pluriannuelles. L'illustration 79 représente ainsi les moyennes trentenales des précipitations mensuelles sur la période concernée 1970-2000.

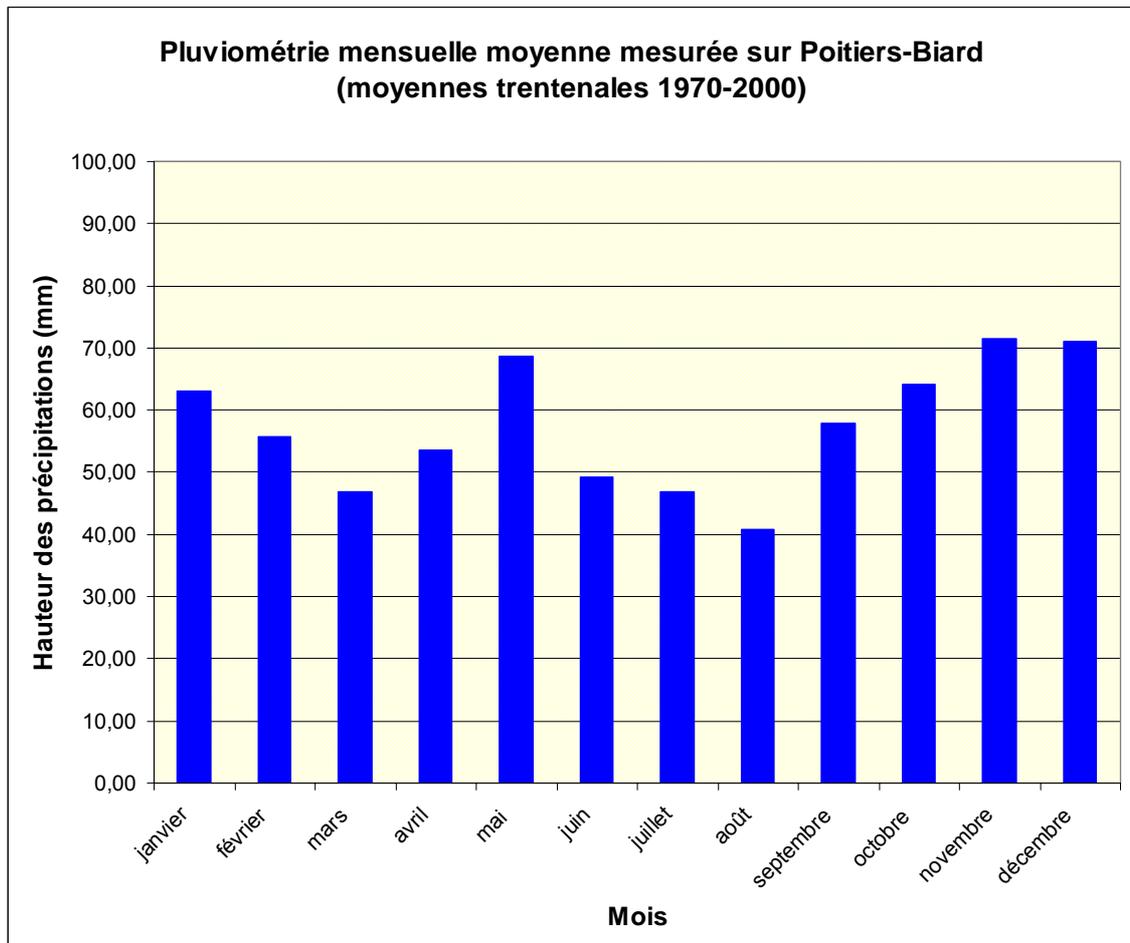


Illustration 79 - Précipitations mensuelles moyennes sur Poitiers-Biard (données Météo France)

Ce graphique présente des variations de répartition des précipitations beaucoup moins marquées que pour la station de Carpentras : on distingue là encore deux périodes de précipitations plus intenses : le printemps (mois de mai en particulier) et l'hiver (principalement en novembre-décembre). L'été apparaît légèrement plus sec que le reste de l'année, mais ce minimum estival est nettement moins marqué qu'en climat méditerranéen : toutes les valeurs de précipitations mensuelles moyennes sont comprises entre 41 et 72 mm d'eau (alors que la fourchette va de 29 à 96 mm pour Carpentras). La moyenne trentennale des cumuls annuels de précipitations s'élève à 690 mm.

L'analyse des données journalières permet de plus de déterminer un certain nombre de critères caractéristiques : sur l'ensemble de la période de mesures disponibles (1949-2005), la pluviométrie moyenne est de 1,88 mm d'eau par jour, mais seuls 55 % des jours ne présentent aucune précipitation. Ramenée aux seuls jours effectivement pluvieux, la moyenne de précipitation journalière s'élève à 4,15 mm d'eau par jour de précipitation. La plus importante précipitation journalière observée entre 1949 et 2005 correspond à 70,6 mm d'eau le 8 juin 1949, ce qui est très inférieur au record de pluviométrie journalière enregistré à Carpentras (212 mm, en début d'automne).

La situation climatique de Poitiers apparaît donc bien distincte de celle de Carpentras, avec une répartition des précipitations plus régulière au cours de l'année. La proportion de jours de pluies atteint ici 45 % alors qu'elle n'est que de 28 % à Carpentras. Bien que le cumul de précipitations annuelles en moyenne trentennale sur la période 1970-2000 soit du même ordre sur chacun des deux sites (690 mm à Poitiers contre 655 mm à Carpentras) la répartition saisonnière de ces précipitations y est très différente. En climat méditerranéen, à Carpentras, l'hiver et l'été sont nettement plus secs qu'en climat océanique, à Poitiers, alors que d'importants orages au printemps et en automne élèvent le niveau des précipitations du Vaucluse bien au dessus de celles de la Vienne au cours de ces deux périodes.

Par ailleurs, les variations interannuelles de pluviométrie sont plutôt moins marquées à Poitiers qu'à Carpentras. Le graphique de l'illustration 80 montre le cumul annuel de précipitation sur l'ensemble de la période de mesures disponibles (57 ans sur Poitiers-Biard), la moyenne annuelle sur cette période étant de 686 mm avec un écart-type de 131 mm (donc sensiblement inférieur à celui calculé à Carpentras). Les années les plus pluvieuses, avec un cumul de précipitation supérieur à la moyenne augmentée d'un écart-type (soit un cumul annuel supérieur à 817 mm) sont au nombre de 8, les plus récentes observées étant 1984 et 1999 (avec un cumul annuel de 906 mm pour cette année, le record étant l'année 1960 avec un cumul de 991 mm, soit un excédent de 44 % par rapport à la moyenne). Les années les plus déficitaires, avec un cumul annuel inférieur à la moyenne annuelle moins l'écart-type sont également au nombre de 8 sur cette période, les plus récentes étant 1989, 1990, 1991 et 2005, avec un record enregistré en 1953 (précipitation annuelle de 337 mm soit un déficit égal à 50 % de la moyenne annuelle).

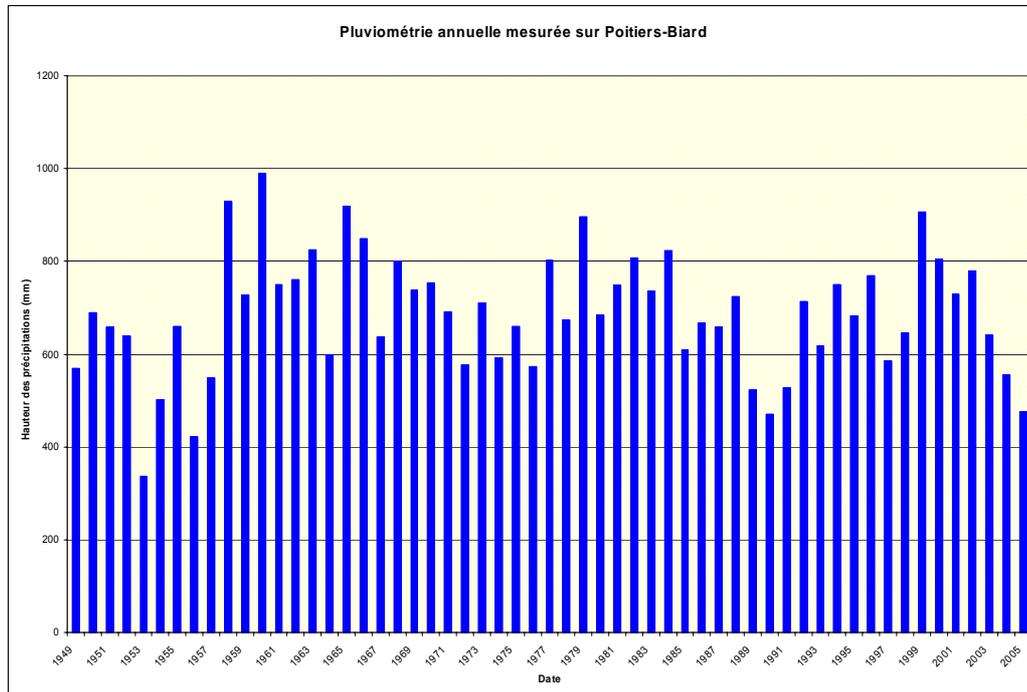


Illustration 80 – Cumuls annuels de précipitations mesurés à Poitiers-Biard sur la période 1949-2005 (données Météo France)

L'illustration 81 permet de visualiser les moyennes journalières de températures selon les saisons, enregistrées à Poitiers-Biard sur l'ensemble de la période de mesures disponibles (1949-2005). En moyenne, la température journalière varie entre 4 °C en janvier et 19 °C en juillet, selon une courbe en cloche. On notera en particulier que la moyenne des températures journalières maximales en été atteint les 25 °C, alors que l'hiver, la moyenne des températures journalières minimales descend jusqu'à -3 °C. Cependant, ces valeurs moyennes peuvent être largement dépassées sur certaines périodes, comme le 5 août 2003, où la température a atteint les 30,6 °C, et le 16 janvier 1985, où elle est tombée à -13,1 °C.

L'analyse des relevés quotidiens de température permet de calculer la température moyenne sous abri à Poitiers-Biard, qui est de 11,3 °C, alors que 4,15 % des jours présentent une température moyenne journalière inférieure à 0 °C (contre 2,1 % seulement à Carpentras). Globalement les températures moyennes journalières et surtout les amplitudes thermiques annuelles sont donc sensiblement supérieures sur Carpentras, même si les écarts ne sont pas très élevés et ne dépassent pas quelques degrés.

L'évaluation de l'évapo-transpiration potentielle (ETP) est fournie quotidiennement par Météo-France sur le site de Poitiers-Biard depuis janvier 1949, à partir d'une formule de calcul de type Monteith. Ces ETP journalières sont représentées sur le graphique de l'illustration 82 sous forme de moyennes mensuelles calculées sur l'ensemble de la période de mesures disponibles (1949-2005) à partir des valeurs journalières moyennes et maximales.

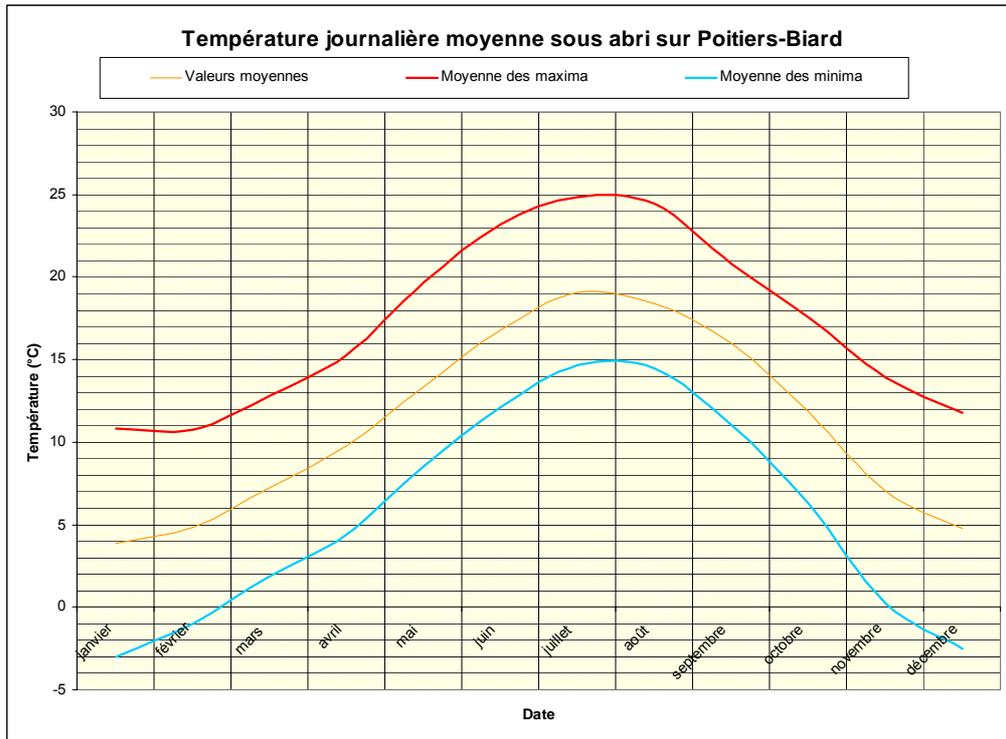


Illustration 81 – Températures journalières moyennes (valeurs moyennes et moyenne des extrêmes) sur la période 1949-2005, à Poitiers-Biard (données Météo France)

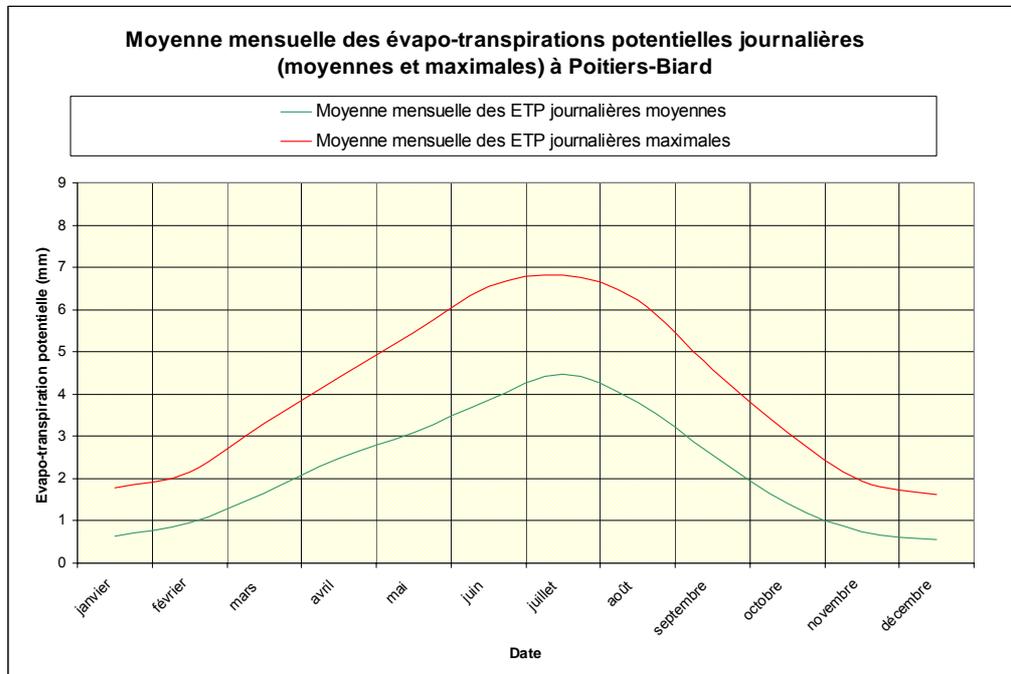


Illustration 82 – Moyennes mensuelles sur la période 1949-2005 des évapotranspirations potentielles moyennes et maximales à Poitiers-Biard (données Météo-France)

Ce graphique met en évidence un pic annuel en juillet avec une valeur moyenne de 4,5 mm/jour, inférieure de 30 % à celle mesurée à Carpentras à cette période de l'année. La moyenne mensuelle des ETP journalières maximales s'élève à 6,8 mm/jour, ce qui est également très inférieur aux valeurs maximales enregistrées à Carpentras.

La superposition sur un même graphique (Illustration 83) des cumuls mensuels moyens (sur l'ensemble de la période de mesures disponibles, soit 1949-2005) de précipitations et d'ETP indique que, comme à Carpentras l'ETP cumulée sur une année (819 mm en moyenne) est supérieure au cumul de précipitations enregistré (686 mm). Toutefois, l'écart annuel entre ces deux grandeurs n'est que de 133 mm en moyenne alors qu'il atteignait 504 mm à Carpentras. Le bilan des pluies efficaces (P-ETP) est positif durant les mois d'automne et d'hiver (octobre à février) tandis que l'ETP excède nettement les précipitations durant le printemps et surtout l'été avec un déficit maximal en juillet où l'ETP atteint 139 mm en moyenne alors que le cumul mensuel de pluie est de 46 mm, soit un déficit potentiel de 93 mm (alors qu'il atteint 169 mm pour la même période à Carpentras). Inversement, en hiver, le solde positif des pluies efficaces est très supérieur à celui enregistré en climat méditerranéen avec un maximum qui dépasse 50 mm pour chacun des mois de novembre et décembre (alors qu'à Carpentras le pic, observé en octobre ne dépasse pas 30 mm). Globalement, les conditions de recharge de la réserve en eau des sols sont donc nettement plus favorables à Poitiers qu'à Carpentras.

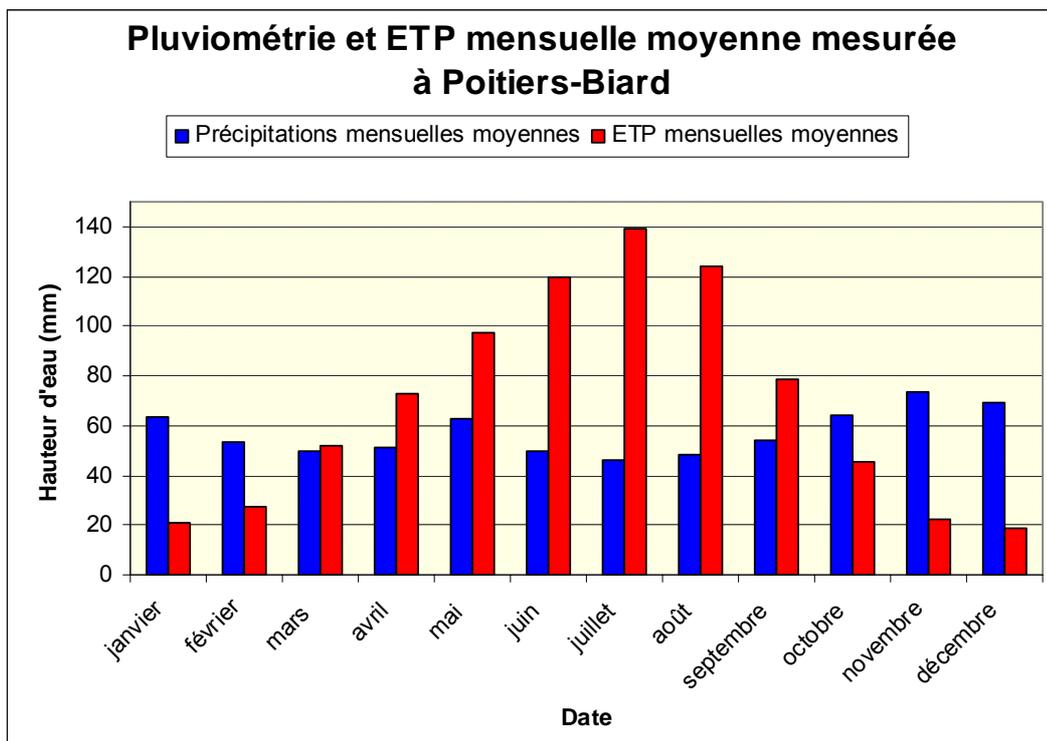


Illustration 83 – Moyenne mensuelle sur la période 1949-2005 des précipitations et ETP à Poitiers-Biard (données Météo-France)

Comme à Carpentras, il est apparu utile d'analyser les variations interannuelles de ce bilan P-ETP, même si ces données ne prennent en compte ni la part de la pluie qui ruisselle ni l'évapotranspiration réelle. Ce bilan annuel sur la période 1949-2005 est figuré sur le graphique de l'illustration 84 qui montre que, contrairement à Carpentras, la pluie efficace annuelle peut s'avérer positive sur certaines années, notamment en 1958 (où l'excédent a atteint 231 mm, avec un cumul annuel de précipitation de 929 mm), mais aussi en 1951, 1960, 1963, 1965, 1966, 1977, 1979, 1987, 1988, 1992 et, plus récemment, en 1999 et 2000). Les années où le déficit hydrique a été maximal correspondent sensiblement à celles qui ont été repérées comme telles à Carpentras, à savoir 1949, 1953, 1956, 1974, 1976, 1989, 1990, 1991, 1997, 2003, 2004 et 2005, toutes années pour lesquelles ce déficit a dépassé 250 mm. Le déficit observé en 2005 atteint 481 mm et n'a été dépassé qu'une seule fois en 56 années d'observation (492 mm en 1953). Il s'ajoute aux déficits déjà élevés notés en 2003 (344 mm) et 2004 (296 mm), avec, comme à Carpentras (mais dans une moindre mesure), un déficit cumulé sur 3 ans supérieur à celui observé en 1989-1991.

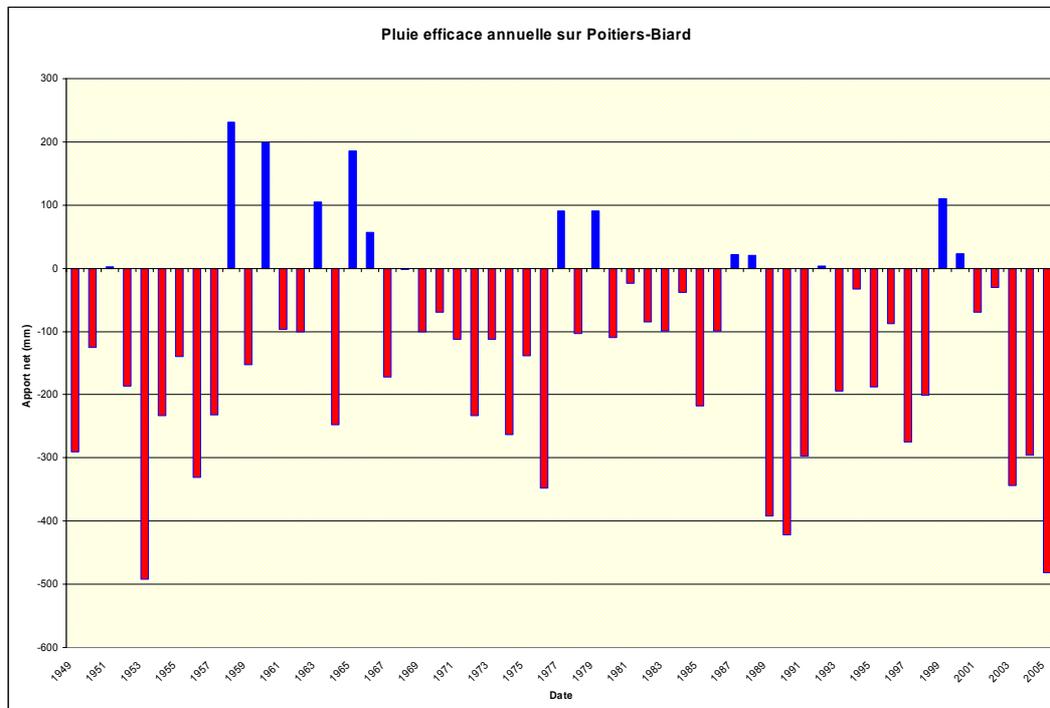


Illustration 84 – Précipitations efficaces annuelles entre 1949 et 2005 sur Poitiers-Biard

Afin de caractériser l'état hydrique dans lequel se trouvait le sol du Deffend lors de la mise en place du système d'instrumentation fin 2005, les données mensuelles de précipitations et d'ETP sur la période 2002-2005 ont été comparées aux valeurs moyennes calculées sur l'ensemble de la période de mesures disponibles, soit 1949-2005, comme indiqué sur les graphiques de l'illustration 85.

En 2002, l'ETP était conforme à la normale et la pluviométrie nettement excédentaire en automne, d'octobre 2002 jusqu'à janvier 2003. L'année 2003 s'est caractérisée par

une pluviométrie déficitaire pour tous les mois de février à septembre (sauf juin qui était normal), avec un cumul pluviométrique sur cette période de 285 mm (inférieur de 30 % à la normale saisonnière sur cette période) et surtout une ETP anormalement élevée de 884 mm (supérieure de 24 % par rapport au cumul habituel sur cette période). Cette période de sécheresse intense a été suivie par un automne 2003 relativement arrosé (avec de forts excédents pluviométrique en octobre 2003 et de nouveau en janvier 2004). L'année 2004 a été proche des normales avec toutefois des mois de juin et septembre très secs et surtout un automne-hiver très déficitaire en pluies, de novembre 2004 à mars 2005. Les ETP ont été sensiblement supérieures aux normales saisonnières de juin à septembre 2005 tandis que la pluviométrie a été inférieure à la normale pendant tous les mois de juillet à novembre 2005. Comme à Carpentras, le matériel d'instrumentation a donc été installé dans un sol dont l'état hydrique était manifestement plus sec que son état habituel à cette période de l'année. C'est d'ailleurs ce qui a été observé lors de la mise en place du matériel.

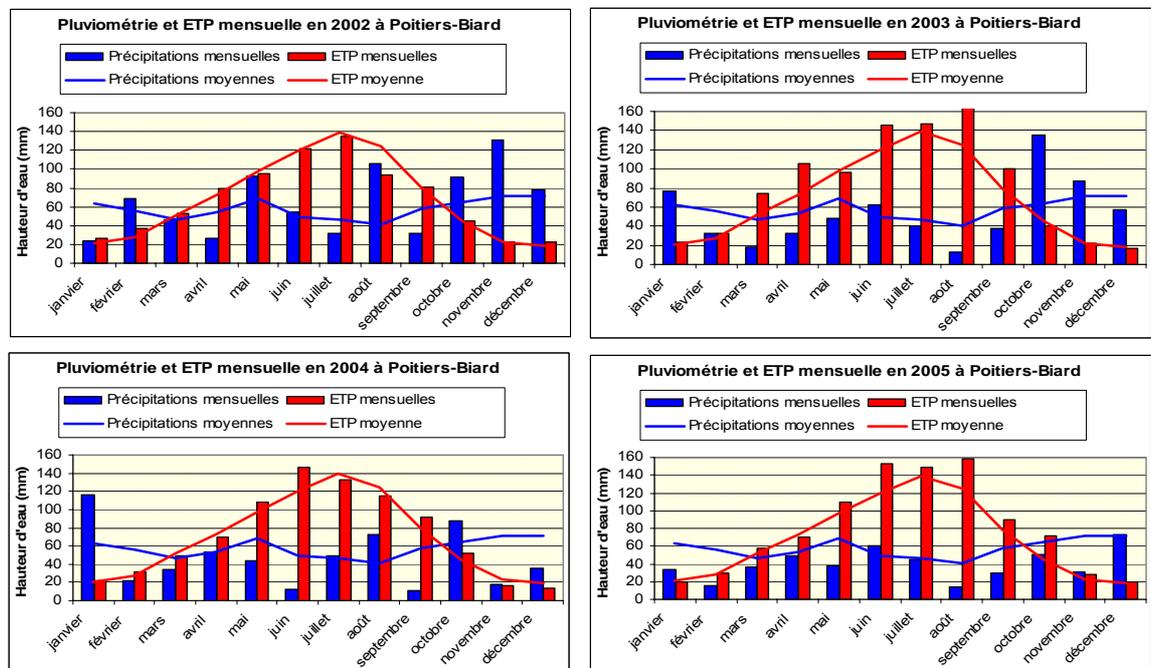


Illustration 85 – Précipitations et ETP mensuelles des années 2002-2005, comparées aux moyennes mensuelles sur la période 1949-2005 (données Météo-France)

6.5. INSTRUMENTATION DU SITE DE POITIERS

6.5.1. Modifications par rapport au site de Mormoiron

Ce site a été instrumenté à partir de fin novembre 2005, soit près d'une année après celui de Mormoiron. Ce décalage dans le temps a été partiellement imposé par les difficultés rencontrées pour sélectionner un site acceptable en climat océanique qui remplisse les différentes conditions recherchées, puis par les nombreuses investigations complémentaires rendues nécessaires pour caractériser les formations

géologiques superficielles sur le site du Deffend, afin d'identifier le secteur le plus favorable pour l'implantation du matériel d'acquisition, et enfin par les nécessités de contractualisation avec l'Université de Poitiers, gestionnaire du site.

Ce délai a été néanmoins mis à profit pour suivre les enregistrements effectués à Mormoiron et rechercher des solutions techniques pour pallier les difficultés de mesure liées, d'une part aux défauts de contact entre les électrodes des Humitub et le terrain et d'autre part à la trop grande sensibilité des capteurs qui les rend manifestement instables lorsque la teneur en eau dépasse un certain seuil.

Pour tenter de résoudre ce premier problème, les capteurs de permittivité ont été placés en grappes avec un seul capteur par canne de sondage alors qu'à Mormoiron, les capteurs étaient placés de manière échelonnée le long d'une canne unique. Pour ce qui est de la deuxième difficulté identifiée, c'est l'écartement entre les deux électrodes constituant chacun des capteurs Humitub qui a été modifié : il est de 10 mm pour les capteurs déployés à Mormoiron et a été augmenté à 11,8 mm pour ceux fabriqués pour le site du Deffend, tout en conservant le même diamètre pour les électrodes annulaires (soit 50 mm), ce qui réduit donc légèrement la gamme de sensibilité des capteurs.

Comme pour le site de Mormoiron, les capteurs Humitub mis en place sont placés à des profondeurs par rapport au terrain naturel allant de 0,5 à 7 m. Le nombre de capteurs mis en place a cependant été réduit d'une unité car le coût total de l'équipement et de sa mise en place est nettement plus élevé. Chaque grappe contient en définitive 11 capteurs, placés à des profondeurs espacées de 50 cm jusqu'à 4 m, puis de 1 m pour les 3 derniers capteurs. Les profondeurs d'investigation sont donc identiques à celles de Mormoiron à la seule exception de la profondeur de 4,50 m qui a été supprimée.

Comme à Mormoiron, les capteurs de température associés à chaque Humitub ne sont pas tous reliés à la centrale d'acquisition car le nombre de voies disponible n'est pas suffisant, mais au Deffend le nombre d'enregistrement des températures dans le sol est supérieur. Pour la grappe 1, située en lisière du bois, 5 capteurs de température ont été reliés à la centrale d'acquisition mais une des voies ne fonctionne pas, de telle sorte que les températures y sont mesurées respectivement à 0,5 m, 1,50 m, 2,50 m et 5 m. Pour la grappe 2, située en prairie, tous les capteurs ont été reliés mais là encore une des voies fournit un signal manifestement erroné si bien que la température n'est pas disponible pour la profondeur de 7 m.

Par ailleurs, il est à noter que le site du Deffend a été équipé en parallèle et dans le cadre d'un autre projet de recherche coordonné par le BRGM et co-financé par le RGCU (Réseau Génie Civil et Urbain), par quatre extensomètres en forage destinés à mesurer les mouvements verticaux du sol induits par les phénomènes de retrait-gonflement des argiles. Les mesures issues de ces extensomètres et qui concernent respectivement les profondeurs de 0,20 m, 0,50 m, 1 m et 1,50 m, pourront ainsi être corrélées avec les variations de teneurs en eau mesurées par les Humitub installés dans le cadre du présent projet.

Le site du Deffend est déjà équipé d'une station météorologique dans le cadre du programme de recherche mené en parallèle par l'Université de Poitiers sur ce même site et qui vise, au travers d'un réseau de piézomètres implantés dans la nappe du Dogger, à identifier les propriétés hydrauliques de cet aquifère fracturé et à mieux comprendre les mécanismes de transferts verticaux de l'eau et des polluants d'origine agricole au sein de cet aquifère. Cette station, implantée en novembre 2002, se situe à 250 m environ au nord-ouest de la grappe 2. Elle enregistre en continu (avec un pas de mesure de 30 mn) la pluviométrie, la température au sol et à 2 m, l'humidité de l'air, le point de rosée et la vitesse du vent à 2 m au dessus du sol. L'alimentation électrique de cette station, assurée par des capteurs solaires, subit régulièrement quelques défaillances mais la corrélation entre les valeurs mesurées et celles enregistrées en parallèle à la station Météo-France de Poitiers-Biard étant excellente (au moins pour la température et pour la pluviométrie), les paramètres météorologiques locaux peuvent être considérés comme connus de manière satisfaisante. La station météorologique de Météo-France, située à l'aéroport de Poitiers, sur le territoire de la commune de Biard, et disposant de données d'évapotranspiration depuis 1964, n'est éloignée du site du Deffend que de 8 km à vol d'oiseau et se situe dans un environnement géomorphologique très comparable (sur le plateau à une altitude de 120 m NGF), bien qu'en rive gauche du Clain alors que le site du Deffend se trouve en rive droite. Pour ces différentes raisons, il n'a donc pas été nécessaire d'équiper le site expérimental de nouveaux capteurs météorologiques.

En ce qui concerne le système d'alimentation électrique du dispositif expérimental mis en place au Deffend, il s'agit, comme dans la première phase d'installation de Mormoiron, d'une batterie de type automobile, de puissance 45 Ah, abritée dans une armoire électrique étanche. Une des voies de la centrale d'acquisition permet le contrôle de charge de cette batterie qui doit être changée régulièrement par les agents du Service Géologique Régional du BRGM, basé à Poitiers. A l'avenir, ce système sera remplacé soit par une alimentation par capteurs solaires (si l'ensoleillement sur le site s'avère suffisant, ce qui n'est pas évident au vu des déboires constatés sur la station météorologique déjà installée), soit par un réseau de trois batteries placées en parallèle pour augmenter la puissance disponible, ce qui suppose l'installation d'une armoire électrique supplémentaire.

6.5.2. Chronologie de l'installation

Les premiers contacts avec l'Université de Poitiers pour l'utilisation potentielle du site du Deffend ont été pris en janvier 2005. Une visite du site a été organisée le 9 mars 2005. Les sondages de reconnaissance complémentaires organisés sur le site se sont déroulés fin mars et début juin 2005, dans le cadre d'une formation technique organisée par l'ESIP. Le choix définitif de l'implantation des capteurs a été arrêté fin octobre 2005 et le matériel préparé courant novembre pour une installation effectuée du 28 novembre au 2 décembre 2005. Le câblage des différents appareils a été achevé le 6 décembre 2005, date d'acquisition des premières mesures (MINAUS S.A., 2005).

Lors de la période d'installation du matériel, le sol était relativement sec en surface, surtout en lisière de la zone boisée, ce qui résultait d'un automne exceptionnellement

peu arrosé dans la zone. L'hiver et le printemps qui ont suivi l'installation se sont révélés assez pluvieux, les premiers enregistrements traduisant donc plutôt une réhumidification des sols, au moins dans leur partie la plus superficielle.

6.5.3. Dispositif mis en place

Comme à Mormoiron, le matériel installé a été réparti en deux secteurs, dénommés ici grappes 1 et 2. La grappe 1, qui correspond à 11 forages équipés d'Humitubs placés à des profondeurs variant entre 0,5 et 7 m (soit 0,5 m, 1 m, 1,5 m, 2 m, 2,5 m, 3 m, 3,5 m, 4 m, 5 m, 6 m et 7 m) est située en sous-bois, en lisière de la forêt (Illustration 86), à l'intérieur d'un quadrilatère de 4 m x 6 m, qui s'étend dans une clairière bordée de chênes. Ces capteurs sont tous connectés à un multiplexeur placé dans une armoire électrique, reliée elle-même à la centrale d'acquisition par un câble enterré à faible profondeur (environ 20 cm), protégé par un fourreau en PVC annelé de couleur verte, dont l'emplacement est matérialisé en surface par des piquets. La grappe 2, située en prairie à plus de 30 m des arbres les plus proches, est constituée également de 11 forages équipés d'Humitubs placés aux mêmes profondeurs que précédemment ainsi que de 4 extensomètres ancrés à 7 m de profondeur, le tout situé dans un quadrilatère de 4,50 m x 6 m.

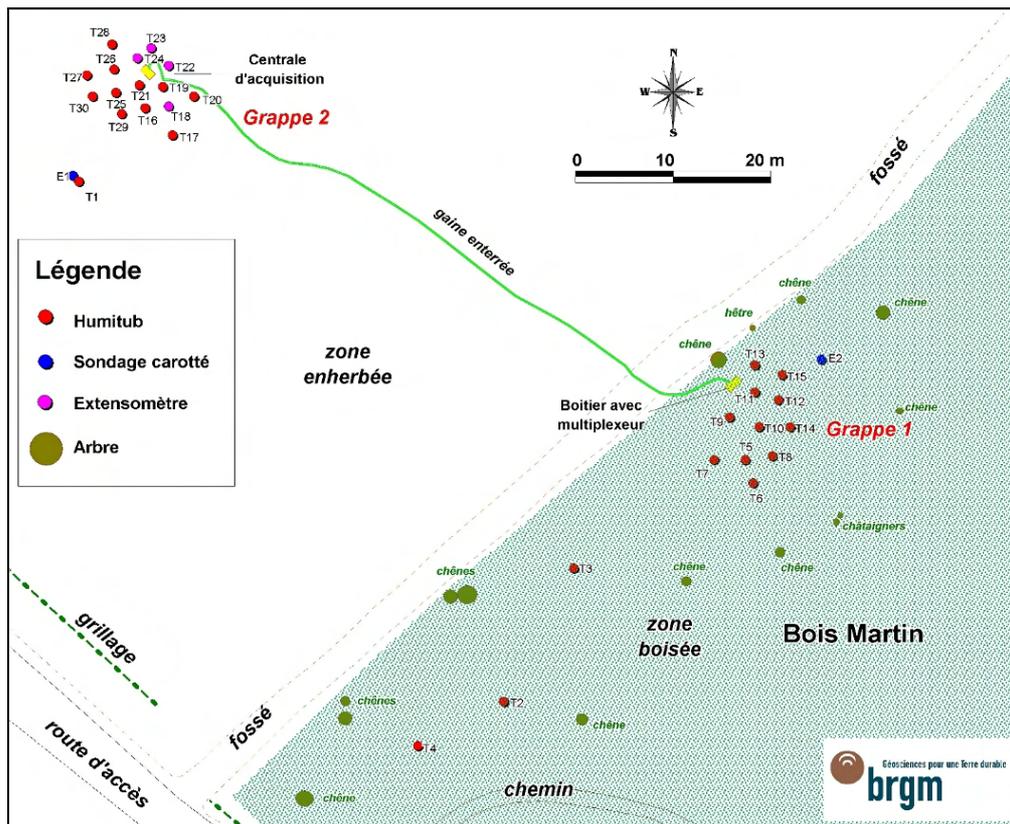


Illustration 86 – Disposition des différents éléments mis en place par le BRGM sur le site du Deffend pour l'acquisition des mesures expérimentales

Afin de limiter les problèmes d'infiltration d'eau autour des capteurs, la technique d'installation a été modifiée par rapport au site de Mormoiron. Chaque forage abrite une canne munie d'un capteur unique placé à une profondeur déterminée, le capteur étant situé à 20 cm de l'extrémité de la canne afin d'éviter la déformation de l'environnement de mesure. Les cannes ont été mises en place dans un forage réalisé à la tarière en diamètre 89 mm (bien supérieur au diamètre des cannes, qui est de 50 mm), à l'exception des 50 derniers centimètres qui ont été forés en diamètre de 50 mm de manière à s'ajuster étroitement autour de la partie sensible de la canne de mesure et minimiser ainsi l'espace annulaire libre autour des capteurs Humitub (Illustration 87). L'espace annulaire laissé libre autour de la partie supérieure de la canne (jusqu'à 30 cm au dessus des capteurs) a ensuite été comblé d'abord par un bouchon de perlite (billes de bentonite déversées depuis la surface et légèrement compactées puis humectées par apport de quelques litres d'eau) sur une hauteur moyenne de 50 cm, lui-même surmonté par un scellement au coulis de ciment jusqu'à la surface du sol. La tête des tubes est ensuite protégée par un capot constitué d'un tube PVC de diamètre 80 mm, dont l'orifice est scellé par un ruban adhésif étanche.

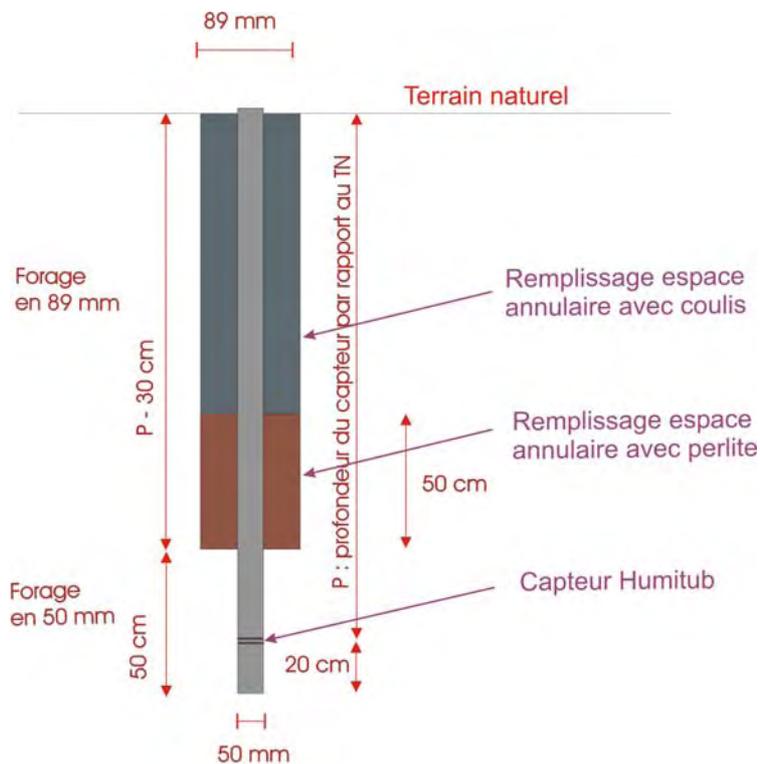


Illustration 87 – Schéma de principe d'installation des cannes Humitub au Deffend

Tous ces sondages, tant pour la reconnaissance préalable que pour la mise en place des capteurs d'humidité et de déplacement, ont été réalisés entre le 28 novembre et le 2 décembre 2005 avec l'appui logistique de la société Solen-CEBTP dans le cadre d'un autre projet de recherche (sur co-financement RGPU). Leur implantation est

précisée dans le tableau récapitulatif de l'illustration 88, qui indique également la profondeur exacte (par rapport au niveau du terrain naturel) des capteurs installés.

Sondage	Date exécution	X (m)	Y (m)	Prof. atteinte (m)	Type de foration	Equipement mis en place ou destination du sondage
E1	28-nov-05	452 098,9	2 174 521,2	7,10	carottage	prélèvement échantillons intacts sous gaine PVC
E2	02-déc-05	452 142,9	2 174 510,4	6,70	carottage	prélèvement échantillons intacts sous gaine PVC
T1	28-nov-05	452 099,3	2 174 520,9	7,50	tarière	prélèvement échantillons remaniés
T2	28-nov-05	452 124,2	2 174 490,1	6,10	tarière	reconnaissance géol pour implantation matériel
T3	28-nov-05	452 128,4	2 174 498,0	2,70	tarière	reconnaissance géol pour implantation matériel
T4	28-nov-05	452 119,2	2 174 487,4	6,20	tarière	reconnaissance géol pour implantation matériel
T5	29-nov-05	452 138,4	2 174 504,4	7,15	tarière	Humitub grappe 1 - profondeur 7 m
T6	29-nov-05	452 138,9	2 174 503,0	1,00	tarière	Humitub grappe 1 - profondeur 0,70 m
T7	29-nov-05	452 136,6	2 174 504,4	0,70	tarière	Humitub grappe 1 - profondeur 0,50 m
T8	29-nov-05	452 140,0	2 174 504,6	1,72	tarière	Humitub grappe 1 - profondeur 1,50 m
T9	29-nov-05	452 137,5	2 174 506,9	2,20	tarière	Humitub grappe 1 - profondeur 2 m
T10	30-nov-05	452 139,2	2 174 506,4	5,25	tarière	Humitub grappe 1 - profondeur 5 m
T11	30-nov-05	452 139,0	2 174 508,4	3,30	tarière	Humitub grappe 1 - profondeur 3 m
T12	30-nov-05	452 140,4	2 174 508,0	3,70	tarière	Humitub grappe 1 - profondeur 3,50 m
T13	30-nov-05	452 139,0	2 174 510,0	2,82	tarière	Humitub grappe 1 - profondeur 2,60 m
T14	30-nov-05	452 141,1	2 174 506,4	6,15	tarière	Humitub grappe 1 - profondeur 6 m
T15	30-nov-05	452 140,6	2 174 509,4	4,20	tarière	Humitub grappe 1 - profondeur 4 m
T16	30-nov-05	452 103,2	2 174 525,3	7,15	tarière	Humitub grappe 2 - profondeur 7 m
T17	30-nov-05	452 104,8	2 174 523,7	1,80	tarière	Humitub grappe 2 - profondeur 1,60 m
T18	30-nov-05	452 104,5	2 174 525,4	7,00	tarière	Extensomètre Ex1- profondeur 0,10 m
T19	30-nov-05	452 104,2	2 174 526,5	3,32	tarière	Humitub grappe 2 - profondeur 3,10 m
T20	30-nov-05	452 106,0	2 174 525,9	2,20	tarière	Humitub grappe 2 - profondeur 2 m
T21	01-déc-05	452 102,8	2 174 526,6	5,25	tarière	Humitub grappe 2 - profondeur 5 m
T22	01-déc-05	452 104,5	2 174 527,8	7,15	tarière	Extensomètre Ex2- profondeur 1 m
T23	01-déc-05	452 103,5	2 174 528,8	7,10	tarière	Extensomètre Ex3 profondeur 0,50 m
T24	01-déc-05	452 102,7	2 174 528,2	7,15	tarière	Extensomètre Ex4- profondeur 1,50 m
T25	01-déc-05	452 101,4	2 174 526,2	4,20	tarière	Humitub grappe 2 - profondeur 4 m
T26	01-déc-05	452 101,3	2 174 527,5	6,30	tarière	Humitub grappe 2 - profondeur 6,05 m
T27	01-déc-05	452 099,7	2 174 527,2	1,20	tarière	Humitub grappe 2 - profondeur 0,80 m
T28	01-déc-05	452 101,2	2 174 529,0	0,70	tarière	Humitub grappe 2 - profondeur 0,50 m
T29	01-déc-05	452 101,8	2 174 524,9	2,70	tarière	Humitub grappe 2 - profondeur 2,45 m
T30	01-déc-05	452 100,1	2 174 525,9	3,76	tarière	Humitub grappe 2 - profondeur 3,50 m

Remarque : les coordonnées X-Y indiquées sont des coordonnées métriques en système Lambert II étendu déterminées de manière approximative par simple levé au décamètre et report sur plan cadastral calé sur les scans IGN à l'échelle 1/25 000

Illustration 88 – Coordonnées et destination des différents sondages réalisés sur le site du Defend pour la mise en place des capteurs

6.6. OBSERVATIONS LORS DE LA MISE EN PLACE

6.6.1. Programme de reconnaissance

En préalable à la mise en place des différents capteurs ont été réalisés plusieurs sondages de reconnaissance en vue d'une part de vérifier la nature lithologique des terrains sur les 7 premiers mètres à l'emplacement envisagé pour l'installation des deux grappes de capteurs et, d'autre part, de prélever des échantillons pour la caractérisation en laboratoire des terrains rencontrés.

En zone herbeuse (grappe 2) ont été réalisés un premier sondage à la tarière (noté T1 sur le plan de l'illustration 86) jusqu'à une profondeur de 7,50 m par rapport au terrain

naturel, puis un sondage carotté situé 40 cm plus à l'ouest, noté E1 et arrêté à la profondeur de 7,10 m. Ces deux sondages ont été rebouchés au coulis de ciment en fin de campagne.

En zone boisée ont été réalisés 4 sondages successifs à la tarière, notés T2 à T5 et dont l'emplacement est également indiqué sur le plan de l'illustration 86. Le sondage T2, pourtant situé à 3 m seulement de ST3 réalisé en mars 2005, a été arrêté à une profondeur de 6,10 m sur un bloc (ou un banc) de calcaire siliceux. Le sondage T3, implanté 5,50 m au sud-ouest de T2 est arrêté à 2,70 m et le sondage T4, situé à 9 m au nord de T2 bute également sur un bloc (ou un banc) de calcaire blanc à une profondeur de 6,20 m. Quant au sondage à la tarière noté T5, il a été implanté à 12 m au nord-est de T3, en bordure sud d'une petite clairière qui s'étend en limite de la zone boisée. Ce dernier sondage a pu être poursuivi dans des terrains limono-argileux jusqu'à une profondeur de 7,15 m et le secteur environnant a donc été retenu pour l'implantation de la grappe 1, le sondage T5 étant lui-même équipé avec un capteur Humitub. Un sondage carotté (noté E2 sur le plan de l'illustration 86) a par ailleurs été effectué à l'extrémité nord de la zone d'implantation de la grappe 1 (à une distance de 7 m du sondage T5), jusqu'à une profondeur de 6,70 m. Les sondages T2 à T4 (ainsi que les anciens sondages ST3 et T12 situés dans le même secteur) et le sondage carotté E2 ont été rebouchés au coulis de ciment en fin de campagne.

6.6.2. Caractérisation géologique

• Origine des observations

La caractérisation des terrains rencontrés en sondage a été faite à partir des observations visuelles effectuées dans les sondages à la tarière (diamètre 63 mm), donc sur échantillons largement remaniés par la perforation et dont la profondeur de prélèvement est entachée d'incertitude. Outre les premiers sondages de reconnaissance effectués jusqu'à une profondeur de 7 m pour valider l'implantation des grappes (T1 pour la zone de prairie et T5 pour la zone boisée), les sondages réalisés ensuite pour la mise en place des capteurs ont également été exploités pour préciser la nature des terrains rencontrés.

Par ailleurs, les deux sondages carottés E1 et E2 ont permis de prélever des échantillons non remaniés selon un profil quasi continu sur les 7 premiers mètres. Ces sondages ont été réalisés à sec par battage (et roto-percussion lorsque la perforation devenait trop difficile) pour éviter de modifier la teneur en eau et donc la consistance du matériau. Les carottes ont été prélevées à l'intérieur d'un chemisage en tube PVC de diamètre 80 mm (à l'exception de l'extrémité de chaque passe qui reste dans la trousse coupante d'où elle est ensuite extraite pour être emballée en sachet plastique étanche, ce qui représente en moyenne 10 cm pour chaque passe de 1 m).

Il est à noter que ce système de prélèvement n'empêche pas totalement un certain remaniement des matériaux extraits, du fait des frottements exercés à la surface interne du tube PVC, ce qui se traduit par une légère compression de l'échantillon. Dans les situations les plus défavorables rencontrées (forage E1 : profondeur de 1 à 2 m), la longueur de la carotte récupérée ne dépasse pas 60 cm pour une longueur

perforée de 1 m, ce qui traduit un taux de compression très élevé de l'échantillon prélevé. Il s'agit là cependant d'une situation extrême : pour les autres passes, ce phénomène de compression du matériau prélevé a été quasi nul.

L'inconvénient majeur des sondages effectués ainsi est que cette technique ne permet pas une visualisation directe sur le terrain des échantillons prélevés. En l'occurrence, les carottes extraites du Deffend ont été expédiées au LAEGO (Laboratoire Environnement, Géomécanique et Ouvrages, de l'Institut National Polytechnique de Lorraine) où elles ont été décrites en février 2006 et serviront de matière première pour une batterie d'essais de caractérisation en laboratoire dans le cadre d'un autre programme de recherche. Les éléments de description de ces carottes seront néanmoins pris en compte dans la suite de ce rapport, au moins de manière succincte.

Enfin, quelques éléments supplémentaires permettant la caractérisation des horizons de surface ont pu être obtenus par l'examen visuel d'une tranchée creusée en septembre 2005 par des pédologues du laboratoire HydrASA à environ 90 m au nord-ouest de la grappe 2, jusqu'à une profondeur maximale de 1,50 m et sur une longueur d'environ 15 m. Des bougies poreuses ont été mises en place dans cette tranchée par HydrASA pour suivre l'évolution de la succion dans les différents niveaux et une caractérisation fine des différents horizons identifiés est en cours. Cette tranchée permet de suivre les variations spatiales d'épaisseur des couches les plus superficielles et son observation complète donc utilement les renseignements obtenus en forage. On notera au passage que les parois de cette tranchée, ouverte courant 2005, étaient déjà fortement desséchées lors de leur observation, le 1^{er} décembre 2005, avec notamment des fissures de dessiccation largement ouvertes dans les parties les plus argileuses (Illustration 89).

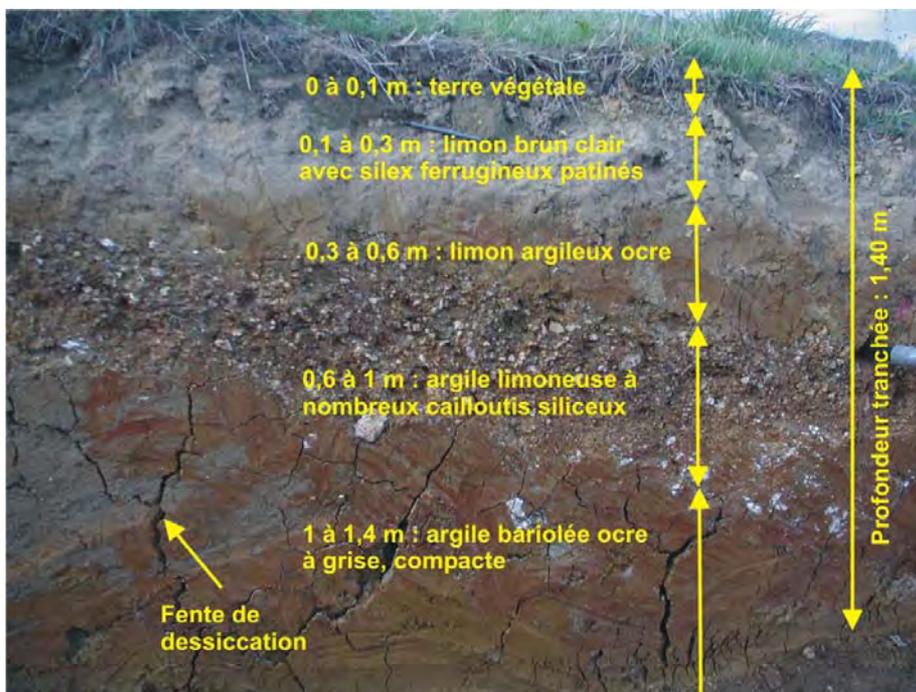


Illustration 89 - Vues de la tranchée d'observation ouverte par hydrASA

• **Zone de prairie (grappe 2)**

La coupe lithologique la plus précise dans ce secteur a été établie par le LAEGO suite à l'ouverture des carottes conditionnées sous gaine PVC dans le sondage E1 à des fins de prélèvement d'échantillons non remaniés pour des essais de laboratoire prévus dans le cadre d'un autre projet de recherche (RGCU). La succession des faciès lithologiques rencontrés dans ce sondage carotté est indiquée sous forme de tableau synthétique (Illustration 90), sachant que cette description se réfère pour l'essentiel à un simple examen visuel des faces externes de la carotte pour ne pas détériorer le matériau intact prélevé pour les essais de laboratoire.

Profondeur (m par rapport TN)	Log	Description lithologique (d'après rapport LAEGO - 24 février 2006)	% argile
0,00 à 0,40		Limon argileux brun jaunâtre, riche en mat. org. en partie supérieure, avec nombreuses racines	40%
0,40 à 0,70		Limon légèrement argileux jaune brunâtre avec 3 à 5 % de graviers siliceux et ferrugineux de taille modale qq mm et de diamètre maximal 2 cm	20%
0,70 à 1,00		Limon argileux jaune brunâtre avec 2 à 3 % de graviers siliceux et ferrugineux de taille modale 2 à 3 mm et de diamètre maximal 1 cm	40%
1,00 à 1,60		Limon sablo-argileux brun foncé à structure grumeleuse, sans mat. org. ni graviers	25%
1,60 à 2,00		Limon argileux bariolé brun jaunâtre, gris et rouge, avec 2 à 10 % de graviers siliceux et ferrugineux de taille modale 6 à 7 mm et de diamètre maximal 1,5 cm	40%
2,00 à 2,70		Limon argileux brun très pâle avec 2 à 3 % de graviers ferrugineux	40%
2,70 à 2,80		Limon sableux brun très pâle	10%
2,80 à 3,02		Limon argileux brun jaunâtre	50%
3,02 à 3,10		Limon argileux brun foncé avec quelques radicules mais peu de mat. org.	25%
3,10 à 3,27		Limon sableux quartzeux	10%
3,27 à 3,80		Argile limoneuse jaune brunâtre	50%
3,80 à 4,25		Argile limoneuse brun jaunâtre à brune	50%
4,25 à 4,70		Limon argileux brun jaunâtre	40%
4,70 à 5,15		Argile limoneuse brun jaunâtre avec tâches noires millimétriques ferro-manganique	65%
5,15 à 5,75		Argile limoneuse brun jaunâtre, localement jaune rougeâtre, avec présence en périphérie de blocs de calcaire oolithique	65%
5,75 à 5,98		Argile limoneuse brun jaunâtre avec présence très localisée de sable carbonaté jaunâtre, test HCl positif	65%
5,98 à 6,60		Argile limoneuse brun jaunâtre avec tâche millimétriques noires ferro-manganiques et rouges pas de graviers ni de cailloutis, test HCl positif	65%
6,60 à 6,98		Argile limoneuse brun jaunâtre, test HCl positif	65%
6,98 à 7,10		Calcaire oolithique et graveleux, jaune clair, partiellement fragmenté, test HCl positif	0%

Illustration 90 - Log lithologique du sondage carotté E1 (description synthétique)

Pour cette description lithologique, les couleurs correspondent à des observations à sec et se réfèrent au nuancier « MUNSSELL Soil Color Charts » (Illustration 91). Les pourcentages d'argile sont évalués à partir de tests simples : fabrication d'une bille puis d'un boudin de quelques mm de diamètre, obtenu à partir d'un pàton proche de la limite de plasticité, et dont on observe la tenue lorsque l'on en fait un anneau. Les tests d'effervescence à l'acide chlorhydrique pour déterminer la présence de calcaire sont faits avec de l'acide HCl 1,2 N et le résultat n'est indiqué que lorsqu'il est positif.

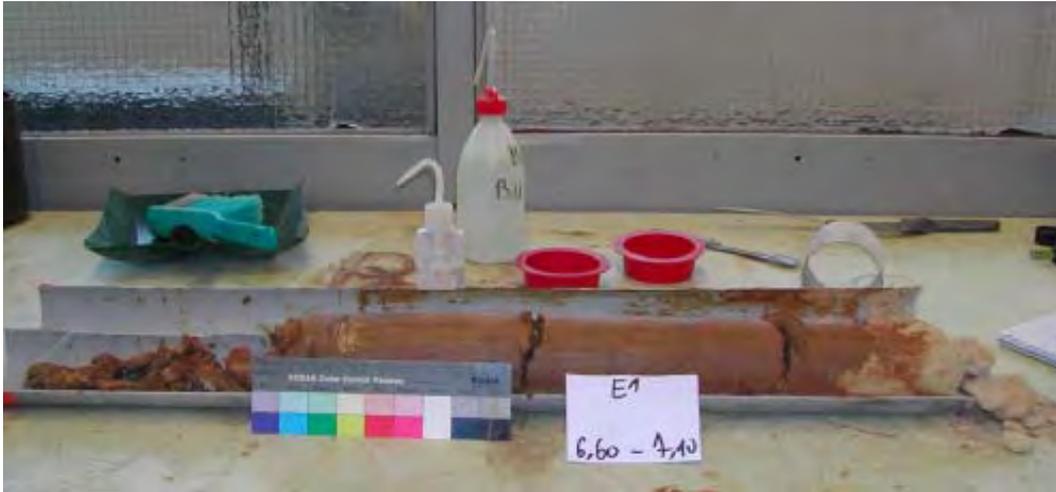


Illustration 91 – Fragment de carotte recueilli à la base du sondage E1 en zone de prairie (photo LAEGO)

Les observations effectuées lors de la réalisation des différents sondages à la tarière, dont le sondage T1 réalisé à 40 cm seulement de E1, permettent de compléter cette coupe lithologique dans le secteur de la grappe 2. Globalement, la couche de terre végétale constituée d'un limon argileux brun riche en matière organique et en radicelles ne dépasse pas 10 à 20 cm d'épaisseur. Elle surmonte un sol limoneux brun, très sec lors de la perforation, comprenant de très nombreux éléments graveleux de silex plus ou moins ferrugineux, de taille millimétrique à centimétrique. A une profondeur de 1,40 m, le sondage T1 montre une argile légèrement limoneuse de couleur brun-jaune à ocre avec de petits grains de silice blanchâtre puis on observe une argile bariolée ocre à grise avec des cailloutis calcaires et siliceux de forme arrondie. A 3 m, on observe dans T1 une argile limoneuse de couleur beige crème à ocre qui devient plus humide à partir de 4,50 m avec une consistance franchement plastique et présence de nombreux cailloutis de taille millimétrique à centimétrique (Illustration 92). Le sondage T1, est arrêté à une profondeur de 7,50 m dans une argile beige très plastique après avoir raboté quelques blocs de calcaire oolithique beige crème, ce qui confirme que le toit du calcaire est proche.

Cette coupe type se retrouve globalement dans les autres sondages réalisés à la tarière pour la mise en place des capteurs de la grappe 2, avec quelques variantes dont les plus notables sont les suivantes. Dans le sondage T18, on retrouve une argile limoneuse rouge à ocre avec de nombreux éléments graveleux plus ou moins siliceux, puis une argile beige de consistance plus plastique avant de rencontrer des blocs de calcaire blanc entre 4 m et 4,30 m au sein d'une argile beige jaunâtre localement légèrement panachée et renfermant de nombreux cailloutis calcaires, puis un nouveau bloc de calcaire siliceux entre 4,70 et 5,70 m. Dans le sondage T21, situé à 2 m seulement de T18, on rencontre une argile limoneuse très rouge jusqu'à 2,60 m puis un sable beige siliceux très fin jusqu'à une profondeur de 3,40 m (Illustration 93) et enfin des argiles limoneuses beiges à grisâtres, de plus en plus plastiques jusqu'à l'arrêt de la perforation à 5,25 m. Ce niveau sableux n'a pas été retrouvé dans le sondage T25 situé pourtant à une distance de 1,30 m seulement.



Illustration 92 – Matériaux prélevés dans le sondage à la tarière T1 (prairie)



Illustration 93 – Sable fin de couleur beige rencontré dans T21 sous des argiles rougeâtres

Dans le sondage T25, on rencontre un limon argileux brun avec des cailloutis de silex rouges et quelques éléments calcaires blancs jusqu'à 1,60 m, puis une argile beige légèrement bariolée de veines grisâtres avec des granules calcaires blancs de taille millimétriques à centimétriques jusque vers 2,40 m, puis une argile grise à beige plus plastique, d'aspect bariolé, grise vers 2,80 m et beige jaunâtre avec granules blancs millimétriques en fin de perforation à 3,70 m. Dans T26, le sondage met en évidence la

présence d'un bloc calcaire vers 5,50 m au sein d'une argile beige jaunâtre avec granulés millimétriques blancs, puis d'un nouveau bloc vers 5,90 m, le sondage étant arrêté à 6,30 m dans une argile beige. Dans T27, le terrain rencontré à une profondeur de 0,70 m est une argile limoneuse ocre rougeâtre, assez sèche, avec de nombreux cailloutis de silex à patine blanche ou rouge. Enfin, les sondages T28 et T29 montrent la présence d'un limon brun très sec jusqu'à 1 m de profondeur.

• Zone boisée (grappe 1)

Comme en prairie, la coupe continue la plus précise est celle obtenue après examen par le LAEGO des carottes prélevées dans le sondage E2, réalisé en limite nord de la zone d'implantation des capteurs. L'essentiel des faciès lithologiques décrits à partir de ce sondage carotté est indiqué dans le tableau de synthèse ci-après (Illustration 94). Il est à noter que la perforation a été très difficile avec un premier blocage à 2 m de profondeur dans un limon argileux bariolé, de couleur beige à ocre, très sec et raide, renfermant de nombreux éléments lithiques de taille millimétrique à centimétrique, de formes arrondies et de nature siliceuse (jaspe rouge). Cette formation d'argile à cailloutis siliceux (qui correspond au faciès rencontré dans la fosse pédologique jusqu'à 1 m de profondeur) se développe ici au moins jusqu'à 3 m et a nécessité une foration à la tarière entre 2,60 et 3,60 m.

Les autres sondages effectués dans ce secteur boisé (Illustration 95) ont été implantés plus au sud. Les sondages de reconnaissance préalables réalisés à la tarière (diamètre 63 mm) sont distants de E2 de 19 m pour le plus proche (T3) et 33 m pour le plus éloigné (T4), le sondage T2 étant en position intermédiaire. Dans ce dernier, les terrains rencontrés en tête jusqu'à une profondeur de 1,10 m sont constitués d'un limon sableux ocre à roux, très sec, fin en surface et un peu plus grossier à partir de 0,50 m (Illustration 95). De 1,10 m à 2,40 m, la tarière rencontre un limon argileux de couleur beige à ocre, toujours très sec et renfermant quelques éléments de silex. Ce limon argileux devient grisâtre à partir de 2,40 m tout en restant très sec et très dur jusqu'à 3 m. La teneur en argile augmente progressivement mais le sol reste très raide jusque vers 4,30 m. Au-delà, on rencontre une argile plus franche et à consistance plus plastique, d'abord brune puis jaunâtre avec de nombreux granules blancs de taille millimétriques. Des blocs de calcaires siliceux empêchent de poursuivre la foration au-delà de 6,10 m sur T2 et 5,80 m sur T4.

Le sondage T3 doit être arrêté à 2,70 m car la progression devient trop difficile dans un terrain sec, très raide, avec de nombreux cailloutis de silex. Quant au sondage T4, il rencontre des niveaux de limon argileux à partir de 1,50 m mais avec un passage de limon sableux blanc très sec entre 2 m et 2,50 m de profondeur. Au-delà de 3,70 m la tarière pénètre dans une argile à consistance plastique de couleur brun-roux puis traverse un bloc calcaire entre 4,50 et 4,80 m avant de rencontrer une argile beige jaunâtre avec nombreux granules calcaires blancs de taille millimétrique comme dans T2 jusqu'à 6,20 m de profondeur (arrêt sur bloc ou banc de calcaire blanc).

Le sondage T5, situé à 7 m seulement au sud-ouest de E2 a pu être poursuivi jusqu'à une profondeur de 7,15 m. Comme les précédents, il rencontre en tête un limon roux à ocre très sec et pulvérulent jusqu'à une profondeur de 1,50 m, puis un limon argileux d'abord bariolé avec des teintes beiges à grises, plus homogène (couleur beige) à

partir de 2,50 m. Le sondage traverse un bloc de calcaire dur entre 3,50 et 4 m puis des niveaux argileux, de couleur beige avec de nombreux cailloutis blancs de taille centimétrique. La matrice argileuse prend des teintes ocres vers 5 m mais renferme toujours de très nombreux cailloutis siliceux. A 6 m, on rencontre une argile beige finement litée avec des granules blancs de taille millimétrique et ceci jusqu'à l'arrêt de la perforation.

Profondeur (m par rapport TN)	Log	Description lithologique (d'après rapport LAEGO - 24 février 2006)	% argile
0,00 à 0,15		Limon argileux brun foncé avec matière organique	
0,15 à 0,31		Limon brun jaunâtre	
0,31 à 1,10		Limon argileux brun jaunâtre avec 5 % de graviers siliceux (quartz) blancs, noirs et rouges, de taille modale quelques mm et de diamètre maximal 1 à 2 cm. A sec, débit polyédrique prononcé	33%
1,10 à 1,75		Limon argileux panaché, de couleur dominante brun jaunâtre et secondairement brun foncé	33%
1,75 à 2,00		Limon argileux jaune brunâtre, gris et rouge, avec éléments quartzeux et ferrugineux	40%
2,00 à 2,50		Limon peu argileux de couleur jaune pâle avec 3 à 5 % de graviers siliceux (silex ou quartz) de taille modale 3 à 5 mm avec un diamètre maximal de 1 cm. Présence de concrétions ferrugineuses de taille modale 7 mm et diamètre maximal 1,5 cm, ainsi que quelques inclusions d'argilite rouge	10%
2,50 à 2,60		Limon argileux brun jaunâtre avec 5 à 7 % de graviers quartzeux de taille modale 2 à 3 mm et diamètre maximal 1 cm, ainsi que des concrétions ferrugineuses de taille modale 6 à 7 mm, de diamètre maximal 1,5 à 2 cm. Présence d'un gros fragment de grès ou quartzite (silcrete ?) de 3,5 cm	35%
2,60 à 2,85		Limon argileux brun jaunâtre avec 5 à 7 % de graviers quartzeux de taille modale 2 à 3 mm, de diamètre maximal 1 cm, ainsi que des concrétions ferrugineuses de taille modale 6 à 7 mm, de taille maximale 1,5 à 2 cm. Débit polyédrique	35%
2,85 à 3,60		Pas de récupération	
3,60 à 3,70		Limon argileux brun jaunâtre	35%
3,70 à 4,00		Limon argileux jaune avec graviers de grès ou quartzite de 1,5 cm de diamètre, accompagnés d'éléments ferrugineux et de petits fragments de silex	35%
4,00 à 4,25		Pas de récupération	
4,25 à 4,70		Limon argileux brun olivâtre clair avec quelques éléments de couleur jaune pâle et jaune rougeâtre, avec 5 à 10 % de concrétions ferrugineuses et de graviers quartzeux de taille centimétrique	25%
4,70 à 5,00		Limon sableux jaune pâle avec quelques zones de couleur rose très riches (15 %) en graviers siliceux de taille modale 4 à 5 mm et diamètre maximal 4 cm, accompagnés de concrétions ferrugineuses de taille modale 3 à 4 mm et diamètre maximal 1,5 cm	10%
5,00 à 5,18		Limon argilo-sableux de couleur jaune olivâtre avec 10 à 20 % de graviers rougeâtres gréseux et ferugineux de taille modale 7 mm et diamètre maximal 1,5 à 2 cm	25%
5,18 à 5,75		Argile limoneuse de couleur jaune olivâtre avec structure à débit polyédrique	60%
5,75 à 6,00		Limon argilo-sableux de couleur jaune olivâtre avec 30 à 50 % de graviers de grès et quartzite de taille modale 1 cm et diamètre maximal 2 à 3 cm	25%
6,00 à 6,17		Limon argileux de couleur jaune avec 10 à 20 % de graviers divers à dominante de grès et quartzite ferrugineux de taille modale 5 mm et diamètre maximal 6 cm. Présence d'un grand fragment de silex et de 5 à 10 % de quartz ou de fragments de silex plus ou moins ferruginisés de taille modale 1 à 2 mm	30%
6,17 à 6,39		Limon argileux de couleur blanche avec peu ou pas de concrétions mais quelques tâches noirâtres	50%
6,39 à 6,45		Limon jaune avec 3 à 5 % de graviers plus ou moins siliceux et ferrugineux de taille modale 1 à 1,5 mm et diamètre maximal 7 mm	50%

Illustration 94 - Log lithologique du sondage carotté E2 (description synthétique)



Illustration 95 – Remontée de cuttings au cours de sondages effectués à la tarière en zone boisée

Lors du sondage T10, situé à 2 m seulement au nord de T5, la tarière traverse également un bloc (ou banc) de calcaire blanchâtre entre 3,20 et 3,80 m. La foration se poursuit dans une argile ocre, localement bariolée, très sèche jusqu'à 4,50 m, contenant de nombreux cailloutis de taille centimétrique. A 5,20 m, le sondage est arrêté dans une argile ocre avec de nombreux cailloutis de calcaires siliceux blancs.

Le sondage T12, situé à 2 m de T10 et 3 m de E2, rencontre une argile limoneuse ocre rougeâtre, très sèche, avec de nombreux silex rouges vers 2 m de profondeur. La matrice limono-argileuse prend ensuite des teintes jaunâtre puis bariolées à dominante rougeâtres vers 3 m de profondeur. Dans le sondage T14 très proche, la tarière traverse un bloc de calcaire jaunâtre entre 3,50 et 4 m, sous ce niveau d'argile ocre à rougeâtre. La matrice argileuse renferme de nombreux fragments de silex vers 5 m de profondeur, rendant la perforation assez difficile.

6.6.3. Teneurs en eau initiales

Les teneurs en eau naturelles lors de la mise en place des capteurs ont été mesurées en laboratoire à partir de deux séries de prélèvements.

La première série a été effectuée à partir d'échantillons remaniés prélevés à la tarière et mis en sachets plastiques scellés, les mesures de teneurs en eau étant effectuées par le laboratoire HydrASA à Poitiers dans un délai très court de quelques jours (mesures par étuvage selon la norme NF P 94-050). Pour cette série de mesure, des prélèvements ont été effectués à intervalles réguliers (tous les 50 cm environ) le long des sondages réalisés en continu jusqu'à 7 m (T1 et T4) et des prélèvements

ponctuels ont été réalisés en fin de chacun des sondages destinés à l'implantation de capteurs Humitub, à la cote de leur mise en place.

La seconde correspond aux deux carottes prélevées en continu sur une longueur de 7 m, emballées sous gaine PVC dont les extrémités ont été scellées dans des sachets plastiques. Ces carottes ont été conservées à l'abri pendant près de 2 mois avant d'être ouvertes pour les mesures de teneur en eau, réalisées par le LAEGO à Nancy, à raison d'une vingtaine de mesures réparties le long de chaque carotte. Les teneurs en eau massiques ont également été mesurées par étuvage selon la norme NF P 94-050 et les poids volumiques secs ont été déterminés par immersion (norme NF P 94-053), ce qui permet d'évaluer aussi les teneurs en eau volumiques in situ. Cette deuxième série de valeurs assure une plus grande précision quant aux profondeurs de prélèvement des échantillons mais le décalage dans le temps entre la date de prélèvement et celle des mesures laisse craindre que le matériau se soit partiellement desséché dans l'intervalle.

• Zone de prairie (grappe 2)

Les différentes mesures de teneurs en eau disponibles à ce stade pour la zone de prairie où a été installée la grappe 2 sont regroupées sur les graphiques synthétiques de l'illustration 96. Les deux graphiques de gauche correspondent à de véritables profils mesurés en continu le long d'un même sondage (carotté pour celui de gauche et à la tarière pour celui du centre) tandis que le graphique de droite est une compilation des mesures effectuées lors de la mise en place des capteurs, dans des sondages distants de 6 m pour les plus éloignés d'entre eux.

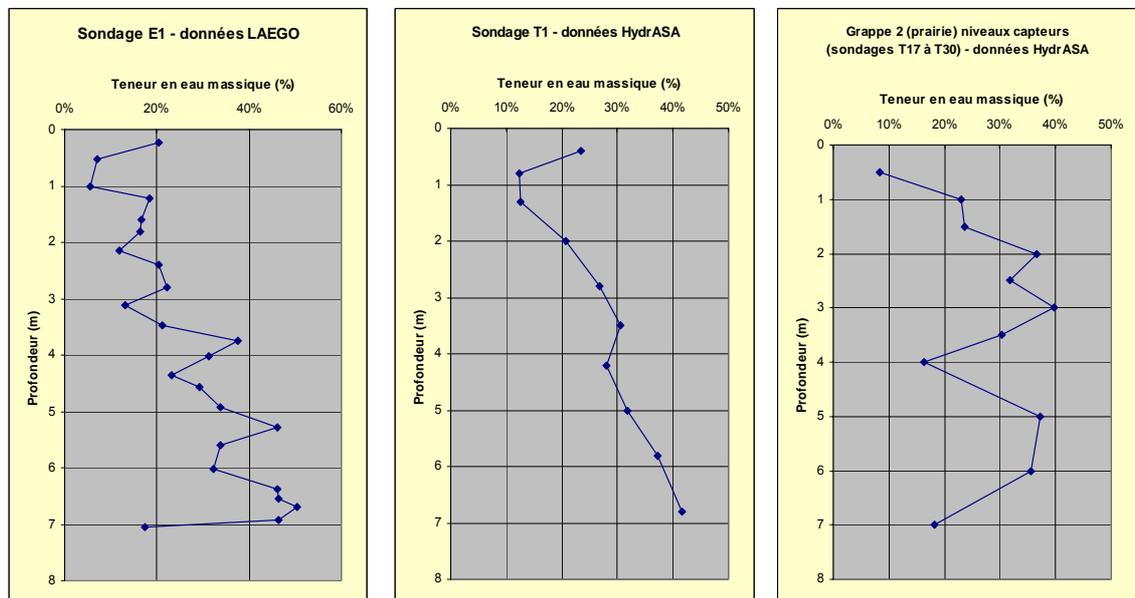


Illustration 96 – Profils hydriques mesurés dans la zone de prairie lors de l'installation des capteurs (données LAEGO et HydrASA)

L'hétérogénéité lithologique rencontrée dans ce secteur rend délicate les interprétations de ces profils hydriques. On peut néanmoins en tirer les observations suivantes. La zone réhumidifiée en tête, avec des teneurs en eau de 20 à 25 %, ne s'étend pas au-delà de 30 à 40 cm de profondeur. Les limons situés en dessous sont très secs jusque vers 1 m à 1,20 m de profondeur (5 à 7 % mesuré dans E1, 12 à 13 % dans T1) puis leur teneur en eau augmente régulièrement jusqu'à atteindre 30 à 40 % entre 3 et 4 m de profondeur. On observe ensuite une valeur plus faible (18 à 22 %) vers 4 m à 4,50 m, puis à nouveau une augmentation progressive jusqu'à 50 % à 6,70 m dans E1. La teneur en eau chute ensuite à 17 % dans E1 au contact du toit du calcaire.

Par rapport à ce schéma global, les décalages d'un profil à l'autre peuvent être localement importants. Ainsi, un prélèvement effectué dans le niveau de sable fin propre rencontré à 2,70 m dans T21 présente une teneur en eau de 8 % alors qu'elle est plutôt voisine de 20 à 30 % à cette profondeur dans les autres sondages.

• **Zone boisée (grappe 1)**

De même que dans la zone précédente et comme indiqué sur l'illustration 97, les mesures de teneurs en eau disponibles à ce stade sont multiples et correspondent d'une part aux prélèvements effectués sur les carottes du sondage E2, d'autre part aux échantillons prélevés lors des sondages à la tarière T2 à T4 et enfin aux échantillons prélevés à la cote de mise en place de chacun des 11 capteurs Humitub de la grappe 1, dans des sondages distants de 7 m pour les plus éloignés d'entre eux.

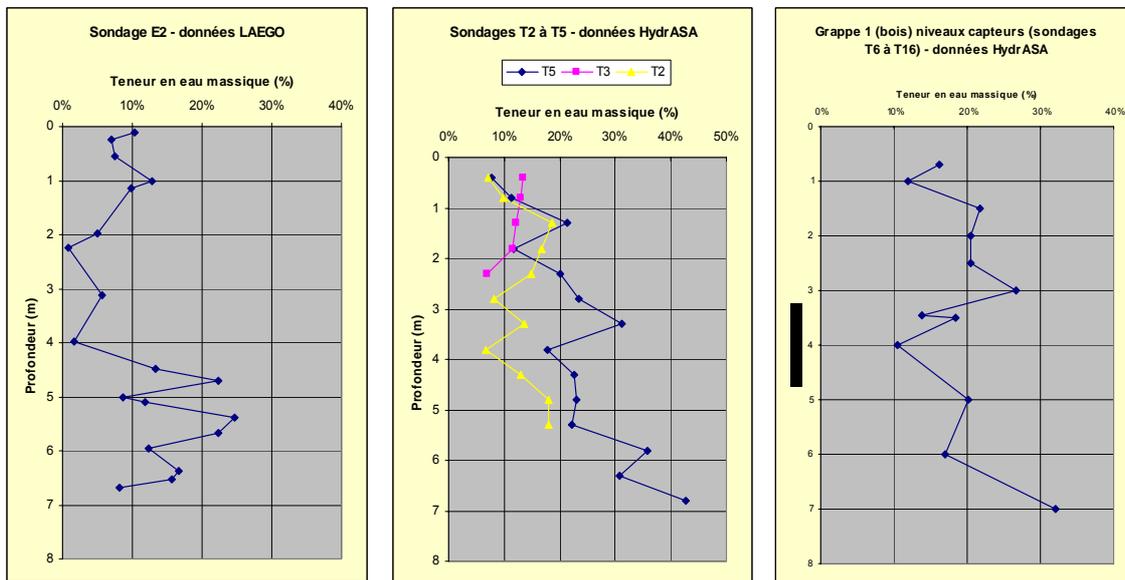


Illustration 97 – Profils hydriques mesurés dans la zone boisée lors de l'installation des capteurs (données LAEGO et HydrASA)

Comme en zone de prairie, les teneurs en eau sont très faibles en tête de sondage (de l'ordre de 8 à 12 %) mais cette fois dès la surface du sol. Dans les échantillons prélevés à la tarière, les premières valeurs supérieures à 20 % se situent entre 1,20 et

1,50 m de profondeur mais ne dépassent guère ce niveau jusqu'à une profondeur de 2,50 m (alors qu'à cette profondeur, la teneur en eau mesurée en prairie est plutôt de l'ordre de 30 %). On observe un pic de teneur en eau (27 à 31 %) vers 3 m de profondeur, puis à nouveau une décroissance avec un minimum vers 4 m (10 à 18 %) et enfin une augmentation assez régulière en fin de forage jusqu'à des valeurs de 32 à 40 % vers 7 m de profondeur. Il est à noter que deux échantillons prélevés sensiblement à la même profondeur (3,50 m) dans deux sondages adjacents (T10 et T12, écartés de 2 m seulement) présentent des teneurs en eau respectives (mesurées par le même opérateur) de 13,8 % et 18,5 %, soit un écart de 34 % qui est très significatif.

Comme en prairie, les valeurs mesurées sur carottes sont sensiblement inférieures (toutes comprises entre 0 et 13 % jusqu'à une profondeur de 4,50 m et atteignant au maximum 25 % à 5,40 m), ce qui pourrait s'expliquer à la fois par une dessiccation des échantillons durant les deux mois de stockage avant analyse et par des difficultés de foration se traduisant par un échauffement et donc un dessèchement du matériau.

6.6.4. Synthèse des données actuelles

Les éléments actuellement disponibles tant sur la nature lithologique des terrains rencontrés en sondage que sur les teneurs en eau enregistrées lors de l'installation des capteurs confirment la forte hétérogénéité des terrains sur le site expérimental.

• Zone de prairie (grappe 2)

En zone de prairie, l'horizon le plus superficiel est plus riche en matière organique, de couleur brune, et présente une teneur en eau très supérieure à celle rencontrée en sous-bois, ce qui traduit une réhumidification préalable qui n'a pas encore eu lieu sous les arbres.

Sous ce niveau de terre végétale dont l'épaisseur n'excède pas quelques dizaines de centimètres, on retrouve un sol limoneux très sec avec également de très nombreux éléments lithiques aux formes émoussées constitués de graviers siliceux et fragments de silex de teinte blanchâtre à rougeâtre. Cette matrice limono-argileuse de couleur dominante brun rougeâtre, localement bariolée et riche en cailloutis, se développe jusqu'à une profondeur moyenne de 2 m. Elle surmonte un limon argileux de teinte beige jaunâtre, localement légèrement panaché de veines grisâtres, avec de nombreux petits granules de calcaire siliceux blanc, de taille millimétrique à centimétrique. Une lentille de sable beige siliceux très fin et relativement propre, dont l'emprise ne dépasse pas quelques mètres, a été traversée entre 2,60 et 4,30 m dans le seul sondage T21, sous une argile limoneuse très rouge. A partir d'une profondeur variant entre 3 et 4 m selon les sondages, on observe des argiles limoneuses de couleur dominante beige crème et de consistance plus franchement plastique au moins à partir de 4,50 m de profondeur. Elles renferment également de nombreux granules arrondis de calcaire siliceux blanc de taille infra-centimétrique. Quelques blocs de calcaire siliceux sont rencontrés en sondage, notamment dans T18 (entre 4,80 m et 5,70 m) et T26 (de 5,50 m à 5,60 m puis de 5,85 m à 5,95 m), toujours dans une matrice argileuse beige jaunâtre de consistance très collante avec de multiples granules calcareux blancs.

L'ensemble de ces terrains, relativement hétérogènes dans le détail mais dont les principaux faciès se retrouvent d'un sondage à l'autre, correspond comme en zone boisée à des formations détritiques continentales rattachées au *Complexe des Bornais*. En revanche, l'épaisseur de ce recouvrement alluvial est ici restreinte puisque les premiers blocs de calcaire oolithique apparaissent dans T1 entre 6 et 7 m de profondeur, au sein d'une argile beige très plastique qui se révèle calcaire (effervescence à HCl) à partir de 5,75 m dans le sondage carotté E1. Le toit du calcaire, constitué de calcaire oolithique et graveleux, vraisemblablement daté du Bathonien (Jurassique moyen), apparaît à 7 m dans E1 et aux alentours de 7,50 m dans T1 pourtant tout proche. Il n'a pas été rencontré plus au nord dans les autres sondages descendus à 7 m de profondeur pour la mise en place des extensomètres et des capteurs profonds.

• Zone boisée (grappe 1)

En zone boisée, les différents sondages effectués montrent que le sol de surface est un limon fin, roux, très sec, sur environ 0,5 à 1 m d'épaisseur. Il surmonte un limon plus argileux, de couleur ocre à localement bariolé (avec des teintes grises à rougeâtres), très riche en éléments lithiques siliceux (dominante de silex et jaspe rougeâtres), aux formes émoussées et de taille millimétrique à centimétrique. Ce niveau d'argile limoneuse à cailloutis, proche de celui observé de visu dans la fosse pédologique, se développe ici sur plusieurs mètres d'épaisseur même si sa teneur en argile augmente sensiblement à partir de 2 m et sa teinte dominante devient plutôt brun jaunâtre à beige, avec une consistance plus homogène mais toujours de nombreux éléments siliceux jusque vers 4 à 5 m de profondeur. Ce matériau d'origine détritique continentale, non carbonaté (pas d'effervescence à HCl des éléments lithiques de forme roulée contenus dans la matrice argilo-limoneuse), correspond vraisemblablement à des dépôts alluviaux d'âge tertiaire (probablement pliocène) rattaché au *Complexe des Bornais*. Localement, il présente quelques passées de limon sableux blanc à jaune pâle comme dans T4 et E2 entre 2 m et 2,50 m, ainsi que dans E2 entre 4,70 m et 5 m.

En partie sud de la zone instrumentée, les sondages préalables T12 (juin 2005) et T3 (novembre 2006) ont rencontré à partir de 3,50 m un matériau argileux de couleur brun ocre, à consistance plastique englobant un bloc ou un banc de calcaire siliceux (un peu avant 3,50 m dans T12, à partir de 4,50 m dans T3, ce qui plaide plutôt pour des blocs discontinus). Un niveau de calcaire induré est également traversé par les sondages T5 et T14 entre 3,50 et 4 m de profondeur, ainsi que par T10 entre 3,20 et 3,80 m.

Sous ces blocs ou ce banc de calcaire, le terrain devient plus argileux et prend une teinte dominante beige jaunâtre à localement ocre avec encore de nombreux cailloutis de calcaire siliceux blanchâtres de taille millimétrique à centimétrique et parfois des tâches noirâtres manganésifères. A la base du sondage T5 (à partir de 6 m de profondeur), cette argile limoneuse beige devient finement litée mais reste riche en granules blancs de calcaire siliceux roulés. Ces faciès sont a priori caractéristiques des niveaux de base de la formation, décrites sur les notices des cartes géologiques de Poitiers et Chauvigny comme des argiles limoneuses panachées grises à jaunâtres.

Ce dépôt assez épais de matériaux détritiques hétérométriques du *Complexe des Bornais* constitue la totalité du sondage carotté E2 (jusqu'à une profondeur de 6,45 m) et se poursuit dans le sondage ST3 (mars 2005) jusqu'à une profondeur de 9 m. Les deux sondages T2 et T4 (situés de part et d'autre de ST3, à une distance de l'ordre de 3 m) arrêtés sur blocs de calcaire siliceux à des profondeurs respectives de 6,10 m et 6,20 m, sont vraisemblablement encore dans cette formation détritique continentale qui comporte donc localement des blocs relativement volumineux.

• Évolution des teneurs en eau entre 2005 et 2006

Les teneurs en eau mesurées fin novembre 2006 ont été comparées aux quelques données antérieures récoltées lors des investigations préalables conduites avec l'aide du laboratoire HydrASA en mars et juin 2005 (Illustration 98).

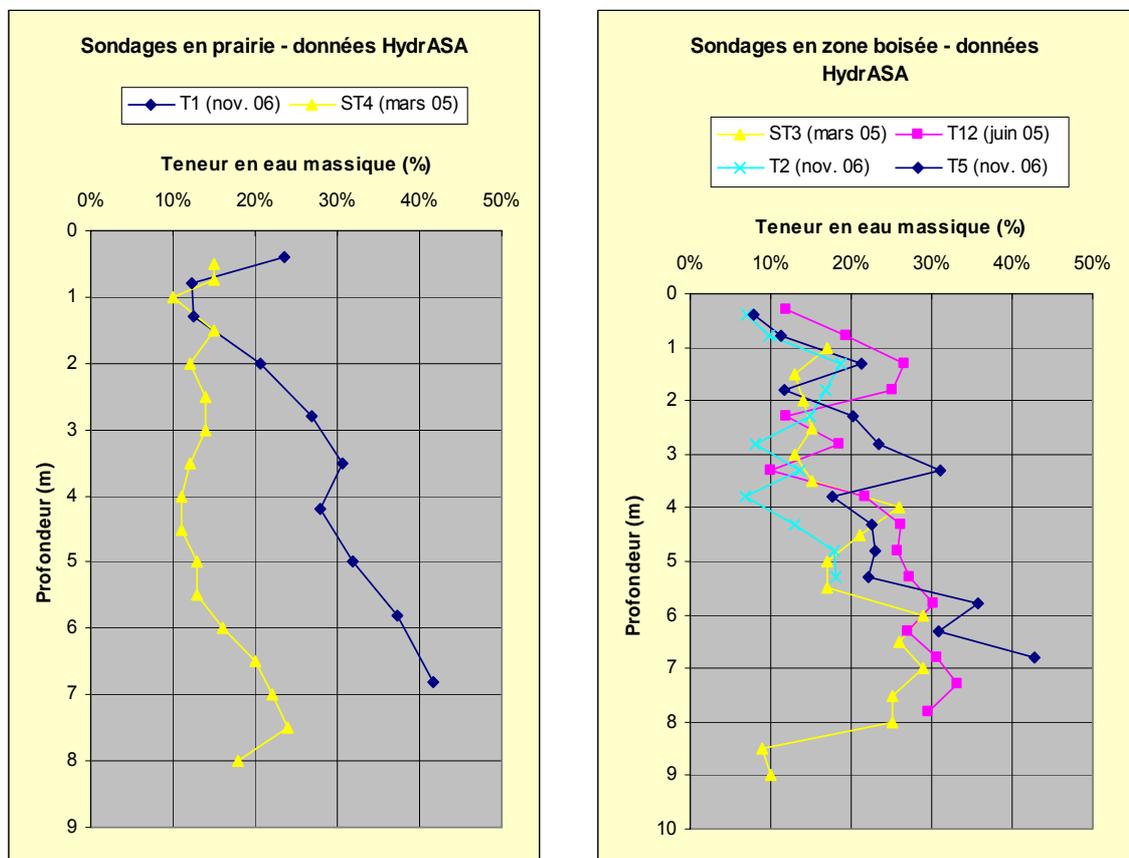


Illustration 98 – Profils hydriques enregistrés en novembre 2006 comparés aux données antérieures disponibles dans les mêmes secteurs

En zone boisée, les horizons de surface (jusqu'à 2 m de profondeur) sont effectivement plus secs qu'en juin 2005, ce qui paraît cohérent avec l'évolution des conditions climatiques sur cette période. Au-delà de cette profondeur, les variations locales de faciès lithologique jouent manifestement un rôle non négligeable, ce qui obligera à une certaine prudence dans l'interprétation des mesures d'humidité, même

effectuées à partir de sondages géographiquement distants de quelques mètres seulement.

Pour ce qui concerne la zone de prairie, pour laquelle l'emplacement exact de ST4 n'a pu être retrouvé sur le terrain, l'écart entre les données mesurées en mars 2005 et novembre 2006 ne peut s'expliquer par les seules évolutions météorologiques et traduit soit une différence lithologique significative entre les deux profils de mesure, soit des conditions de prélèvement ou de conservation des échantillons très différentes. Une comparaison du profil hydrique mesuré sur T1 en novembre 2006 avec celui observé sur ST4 en mars 2005 (Illustration 98) montre une évolution très sensible au delà de 2 m de profondeur : en mars 2005, les teneurs en eau étaient comprises entre 10 et 15 % jusqu'à une profondeur de 5 m puis augmentaient ensuite régulièrement jusqu'à 22 % à 7 m de profondeur ; en novembre 2006, elles augmentent de manière régulières à partir de 1,50 m jusqu'à dépasser 40 % à 7 m, ce qui constitue un écart considérable, difficilement explicable à ce stade. Ces valeurs élevées se retrouvent d'ailleurs dans les mesures effectuées sur les échantillons carottés (teneurs en eau de 30 à 50 % pour des profondeurs comprises entre 3,50 m et 7 m) et pour le calage des Humitub (35 à 40 % entre 3 et 6 m de profondeur, avec cependant un creux à 4 m).

7. Interprétation des premiers résultats

7.1. SITE DE MORMOIRON

7.1.1. Source des données

Les 24 capteurs Humitub et le pluviomètre ont été installés début décembre 2004 sur le site de Mormoiron et sont opérationnels depuis le 9/12/2004. La centrale d'acquisition enregistre quatre fois par jour les mesures d'intensité fournies par les capteurs, sur une plage comprise entre 4 et 20 mA. Ces données sont télétransmises une fois par semaine au BRGM. Cependant, en raison de problèmes de télétransmission ou liés à des dysfonctionnement du matériel, ainsi que des pannes de batterie avant l'installation du panneau solaire (novembre 2005), des lacunes de données existent sur plusieurs périodes (26/01 au 10/03/05, 01/04 au 08/04/05, 02/05 au 18/05/05, 28/07 au 29/07/05, 18/08 au 31/08/05, 25/09 au 30/09/05, 16/10 au 21/10/05, 30/01 au 02/02/06 pour l'ensemble des capteurs, ainsi que du 27/05 au 03/06/05 et à partir du 05/04/06 uniquement pour la canne 1).

En l'absence d'étalonnage définitif des capteurs Humitub (essais complémentaires en cours au laboratoire), il a été jugé préférable de présenter dans un premier temps ces résultats bruts en intensité, laquelle est directement reliée à la teneur en eau du sol. La période du 9 décembre 2004 au 28 février 2006 a été retenue pour présenter la plupart des résultats qui figurent dans le présent rapport de phase 1.

Pour les données météorologiques, nous disposons également des enregistrements de la station Météo-France de Carpentras (située à moins de 10 km à l'ouest) à partir du 1^{er} janvier 1964, ce qui permet de connaître, outre les précipitations, les températures et l'évapo-transpiration journalières.

7.1.2. Mesures météorologiques

La pluviométrie étant le paramètre météorologique le plus important pour la corrélation avec les teneurs en eau dans le sol et pouvant donner lieu à des variations locales non négligeables, le choix a été fait d'installer un pluviomètre sur le site expérimental, à proximité immédiate des capteurs Humitub. Pour les autres paramètres (température, rayonnement, vent,...), il a été décidé de prendre les valeurs de la station météorologique de Carpentras.

Les mesures enregistrées par le pluviomètre installé sur le site de Mormoiron peuvent être comparées avec les cumuls journaliers de précipitation relevés par Météo-France à Carpentras, depuis le 9 décembre 2004, date de début d'enregistrement à Mormoiron, avec néanmoins quelques lacunes dans les mesures effectuées par le BRGM (cf. supra).

L'illustration 99 présente cette comparaison entre les précipitations journalières enregistrées à Carpentras par Météo-France (en bleu) et celles mesurées à Mormoiron par le pluviomètre installé sur le site (en rouge).

Pour ce qui concerne les mesures effectuées sur le site de Mormoiron, le pas de temps des mesures a varié au cours de la période mais est désormais stabilisé à 4 mesures journalières (à 0h, 6h, 12h et 18h) et le cumul journalier est calculé de 0h à minuit. Ceci peut expliquer un léger décalage avec les mesures de Météo-France qui sont cumulées de 6h à 6h (en temps universel).

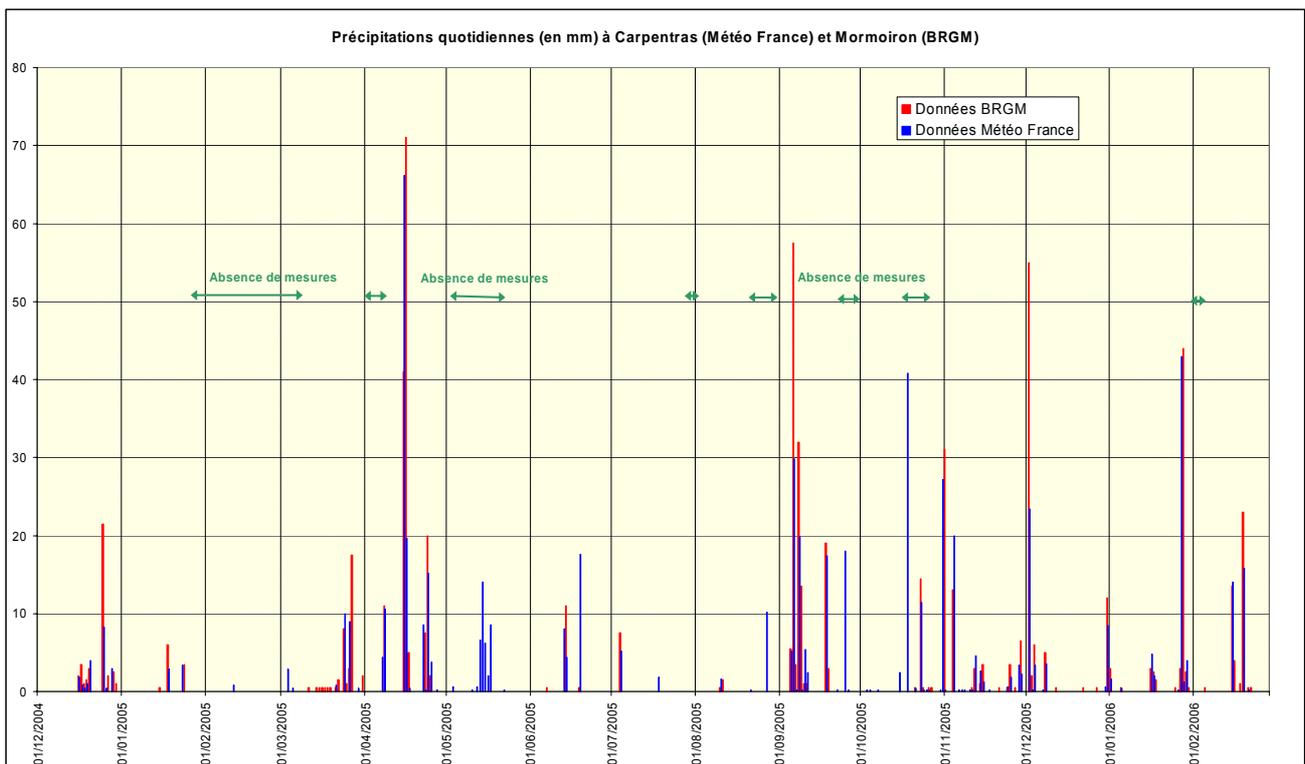


Illustration 99 – Comparaison des précipitations journalières enregistrées à Carpentras (station Météo-France) et à Mormoiron (données BRGM)

Si l'on raisonne sur les périodes où l'on dispose de données pour les deux enregistrements (c'est-à-dire en faisant abstraction des périodes de lacunes), on peut noter les éléments suivants :

- d'un point de vue général, les mesures par le pluviomètre du BRGM sur site et les enregistrements de la station Météo-France de Carpentras sont relativement similaires du point de vue des dates des principales précipitations ;
- le cumul des précipitations sur la période de comparaison est supérieur de 25 % à Mormoiron par rapport à celui de Carpentras : cela peut s'expliquer par le fait que la station de Carpentras est située en plaine à une altitude de 99 m NGF, tandis que le site expérimental est localisé dans un environnement plus accidenté, sur le

flanc est d'un coteau dont le sommet culmine à 374 m, le terrain lui-même étant à une altitude de 280 m NGF. Cette différence d'altitude, et la proximité de plusieurs reliefs avec notamment le Mont Ventoux (1 910 m) situé à 14 km à vol d'oiseau en direction du nord-est sont à même d'expliquer la plus forte pluviosité enregistrée sur le site de Mormoiron par rapport à la station Météo-France de Carpentras ;

- l'examen détaillé des chroniques journalières montre que cette différence de cumul n'est ni systématique, ni régulière, ce qui confirme donc que la différence ne peut pas être imputable à un problème de calage du pluviomètre, mais bien à des variations spatiales de la pluviosité.

Afin de disposer d'une chronique pluviométrique complète pendant la durée de l'expérience, qui soit la plus proche possible des précipitations effectives sur le site de Mormoiron, les données mesurées par le pluviomètre installé sur le site ont été complétées par celles de la station Météo-France de Carpentras pour les périodes de lacunes. Le choix a été fait de ne pas pondérer les précipitations de Carpentras pour compléter la chronique des jours de lacunes (par exemple par le rapport entre les précipitations de Mormoiron et celles de Carpentras pour l'ensemble de la période où la comparaison est possible), car l'examen des chroniques montre que ce rapport est très irrégulier d'un épisode pluviométrique à un autre, en raison des variations spatiales des précipitations : un tel ajustement pourra être fait ultérieurement lorsque les périodes de comparaison entre les enregistrements de Mormoiron et Carpentras seront plus étendues et notamment après l'observation d'au moins deux années de mesures météorologiques. L'installation du panneau solaire en novembre 2005 a considérablement réduit les périodes de lacunes de mesures sur le site de Mormoiron et l'on devrait ainsi être à même de proposer ultérieurement un ajustement plus approprié.

L'illustration 100 présente la reconstitution de la chronique journalière des précipitations sur le site de Mormoiron, entre le 9/12/2004 et le 28/02/2006 à partir des données mesurées complétées par les données Météo-France de Carpentras pour les périodes de lacunes. L'illustration 101 présente les cumuls mensuels de précipitations sur le site de Mormoiron, reconstitués selon le même procédé.

Dans le paragraphe suivant qui présente les résultats des capteurs Humitub en fonction des précipitations, ce sont ces chroniques journalières reconstituées qui ont été utilisées.

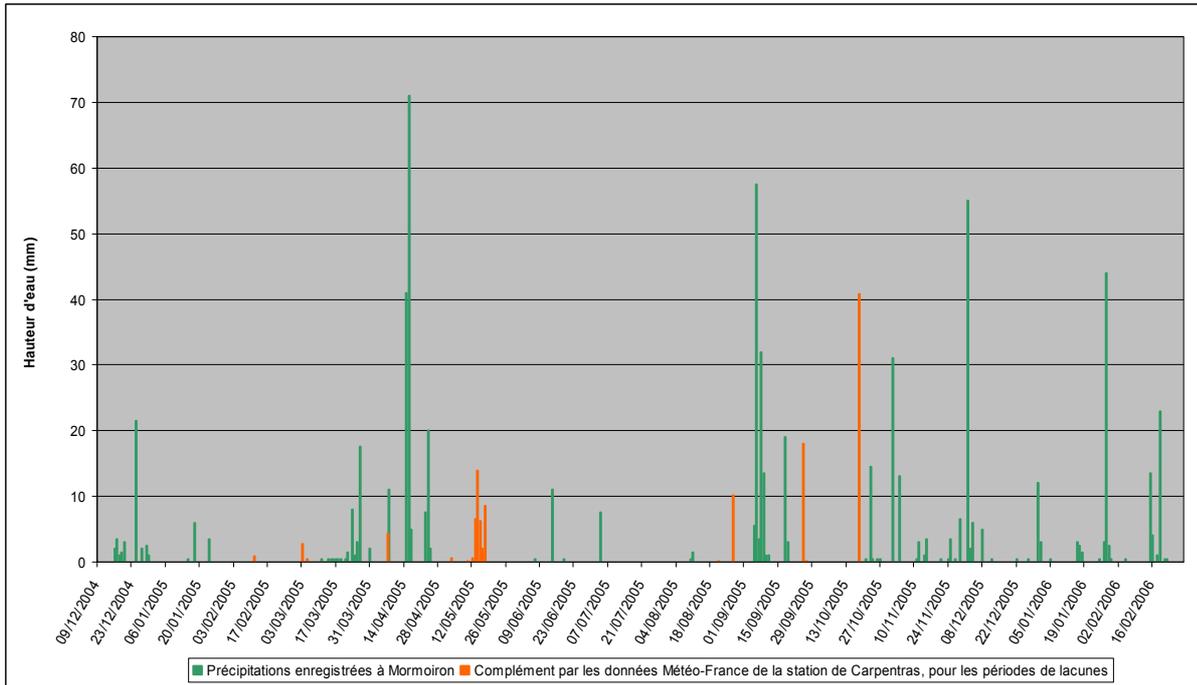


Illustration 100 – Reconstitution de la chronique journalière des précipitations sur le site de Mormoiron entre le 9/12/2004 et le 28/02/2006 à partir des données mesurées complétées par les données Météo-France de Carpentras pour les périodes de lacunes

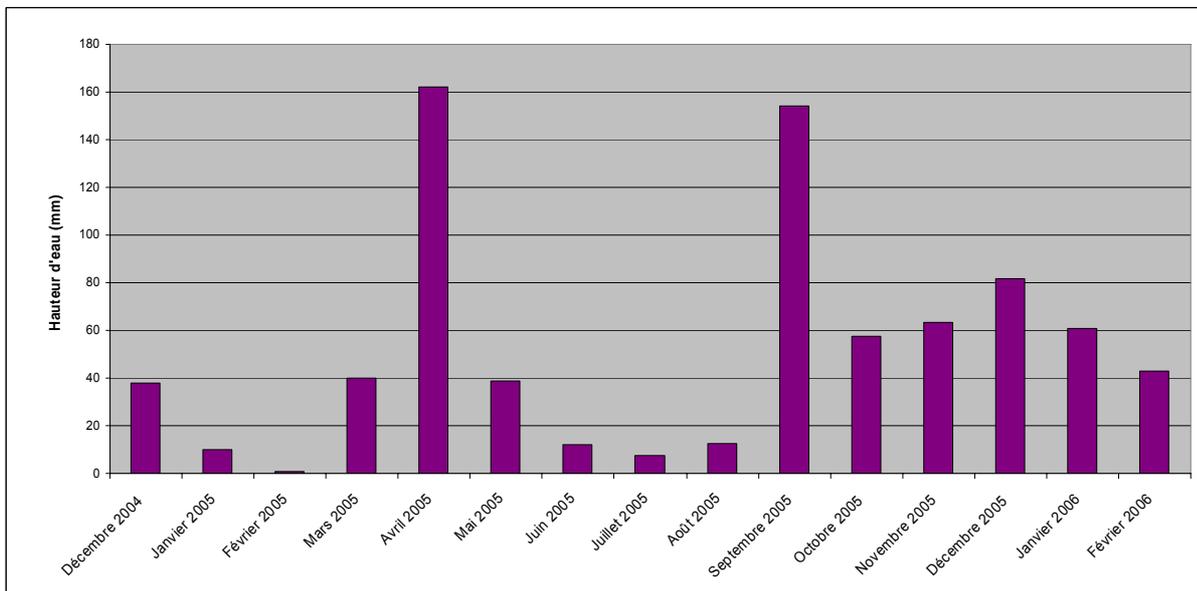


Illustration 101 – Reconstitution des cumuls mensuels de précipitations sur le site de Mormoiron entre le 9/12/2004 et le 28/02/2006 à partir des données mesurées complétées par les données Météo-France de Carpentras pour les périodes de lacunes

Ces histogrammes mettent en évidence de nombreux épisodes pluviométriques particulièrement intenses : les 15 et 16 avril 2005 (112 mm), du 6 au 9 septembre 2005 (106,5 mm), le 18 octobre 2005 (40,8 mm à Carpentras), le 2 décembre 2005 (55 mm), le 28 janvier 2006 (44 mm). En termes de cumul mensuels, deux mois apparaissent comme particulièrement pluvieux dans la période considérée : ceux d'avril 2005 (162 mm) et de septembre 2005 (154 mm). On peut également noter que l'été 2005 a été particulièrement sec avec un cumul de précipitation limité à 31,9 mm entre juin et août 2005, à peine supérieur au cumul exceptionnellement bas enregistré pour ces 3 mois d'été en 2003 (23 mm) et très inférieur à la moyenne trentennale qui s'élève à 125 mm pour cette même période à Carpentras. L'hiver 2004-2005 (et particulièrement janvier et février 2005) a été également très sec. En revanche, le printemps 2005 a été arrosé, avec un pic très marqué en avril, tout comme l'automne 2005 et l'hiver 2005-2006 (de septembre 2005 à février 2006).

7.1.3. Mesures par les cannes Humitub

Comme cela a été précisé précédemment, les mesures des capteurs Humitub sont présentées en intensité (mA), ce qui correspond aux résultats bruts enregistrés par la centrale d'acquisition, sur une plage de 4 à 20 mA. La corrélation avec les teneurs en eau sera précisée dans la suite du programme, une fois les divers travaux d'étalonnage terminés. Ces résultats permettent toutefois de raisonner de façon qualitative, puisque les teneurs en eau sont directement reliées aux intensités mesurées.

Mise en évidence des limites de la gamme de mesures

Le paragraphe 3.1.4 rappelle les difficultés inhérentes aux mesures de teneurs en eau en profondeur dans des sols argileux et il précise les limites de fonctionnement des capteurs Humitub. Ces difficultés se sont retrouvées dans les résultats des mesures in situ et sont illustrées par les exemples qui suivent.

La principale difficulté rencontrée dans les mesures effectuées sur les sites expérimentaux et notamment à Mormoiron est un phénomène que l'on peut qualifier de « saturation du capteur » et qui conduit, pendant certaines périodes, à des mesures aberrantes, se traduisant sur les courbes par des fluctuations erratiques de l'intensité de sortie.

L'analyse des observations effectuées en laboratoire tend à indiquer que cette saturation des capteurs se produit très en deçà de la limite théorique de 20 mA à un niveau qui reste à déterminer avec précision mais qui rend impossible toute mesure lorsque le terrain au contact avec la sonde dépasse une certaine teneur en eau. Les indications des capteurs deviennent donc inexploitable au-delà d'un certain seuil d'humidité, a fortiori lorsque des circulations d'eau se produisent à proximité immédiate de la canne, soit à la faveur d'apport latéral dans des lentilles de matériau à plus forte perméabilité (argiles silteuses), soit par infiltration directe dans l'espace annulaire susceptible de se former en périphérie de la canne du fait de sa mise en place ou en raison du retrait du sol environnant qui se dessèche.

Un exemple de ce phénomène de saturation enregistré sur le site de Mormoiron est présenté sur l'illustration 102 : il s'agit de l'intensité mesurée sur le capteur à 1,5 m de profondeur sur la canne 2. Comme pour tous les graphiques présentés dans la suite de ce chapitre, les résultats sont présentés directement en intensité (données brutes) et sont corrélés avec la pluviométrie mesurée simultanément sur le site (corrigée des valeurs de Carpentras pour les périodes manquantes). Les lacunes visibles sur certaines courbes correspondant aux périodes d'interruption de l'enregistrement, comme précisé plus haut (paragraphe 7.1.1).

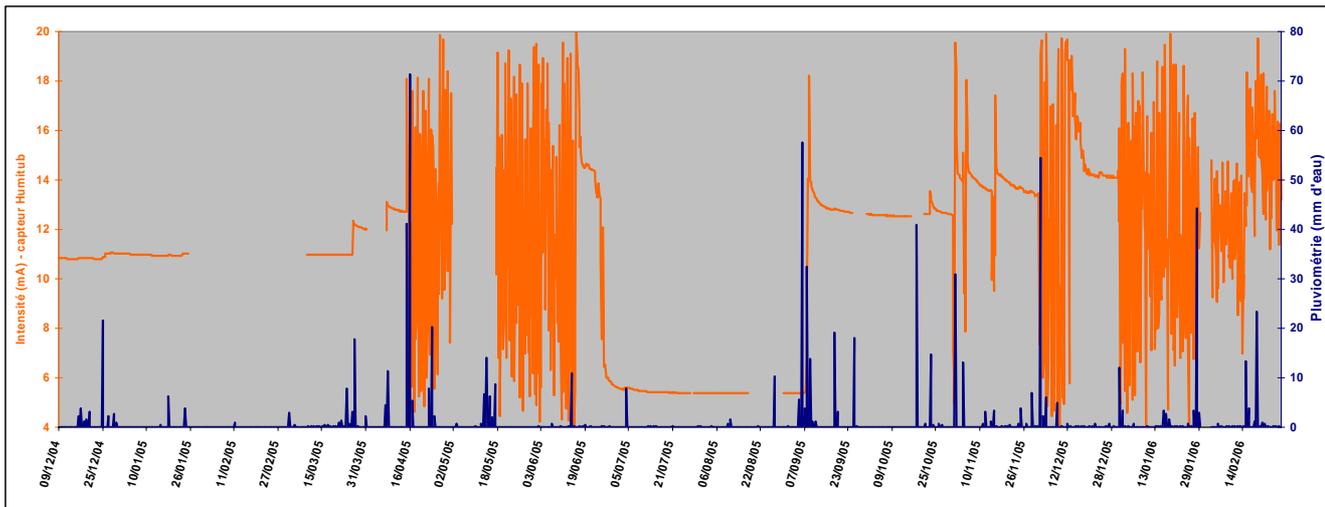


Illustration 102 – Intensité mesurée par le capteur Humitub à 1,5 m de profondeur sur la canne 2 et pluviométrie – site de Mormoiron (du 9/12/04 au 28/02/06)

On peut remarquer sur cette courbe que l'épisode pluvieux très intense des 15 et 16 avril 2005 (112 mm) est à l'origine de la première saturation du capteur, laquelle se poursuit jusqu'à la mi-juin. Les pluies de septembre et octobre, qui interviennent après plusieurs mois secs se traduisent par des phénomènes de saturation de courte durée (1 ou 2 jours). La pluie du 2 décembre 2005 (55 mm) entraîne quant à elle une saturation des capteurs pour une durée plus longue (10 jours). Ensuite, la saturation reprend le 31/12/2005, suite à un épisode pluvieux de faible intensité (12 mm), et se poursuit au-delà du mois de février 2006.

Ces éléments montrent le fort impact des pluies très intenses, qui sont à l'origine des principales périodes de saturation du capteur. On peut noter que le temps de réaction est très rapide, ce qui exclut a priori une humidification résultant de la propagation progressive du front de saturation au travers des horizons supérieurs. Ce phénomène pourrait résulter d'écoulements parasites le long de la canne, mais ne permet pas d'exclure toute possibilité d'infiltration naturelle dans le sol, soit en raison de la macroporosité du matériau (liée à la texture du sol), soit en raison du drainage latéral d'horizons plus perméables.

Cependant, l'intensité des épisodes pluvieux n'est pas le seul paramètre déclencheur de ces phénomènes de saturation : la pluviométrie dans les semaines et les mois précédant ces épisodes pluviométriques intenses joue également un rôle primordial.

Ainsi, l'épisode des 15 et 16 avril 2005 (à l'origine de la première saturation) a été précédé de plusieurs pluies d'ampleur modérées fin mars et début avril. De même, l'épisode de fortes précipitations du 2 décembre 2005 (à l'origine de la seconde période de saturation de plusieurs jours) a été précédé de plusieurs pluies importantes entre septembre et novembre. A l'inverse, les 106,5 mm d'eau tombés entre le 6 et le 9 septembre 2005 à l'issue d'une longue période de sécheresse n'entraînent pas de saturation durable, tandis que la troisième longue période de saturation n'est déclenchée que par une pluie de 12 mm (le 31/12/2005), mais qui intervient après un automne particulièrement pluvieux. L'état hydrique du sol au début d'une pluie est donc manifestement un élément prépondérant pour la propagation en profondeur du front de saturation : dans un sol déjà très humide, les précipitations vont se traduire par des fronts d'humidité pouvant entraîner rapidement la saturation des capteurs.

L'illustration 103 montre l'intensité mesurée sur le capteur situé à 0,5 m de profondeur sur la canne 2, sur cette même période de 15 mois, corrélée avec la pluviométrie.

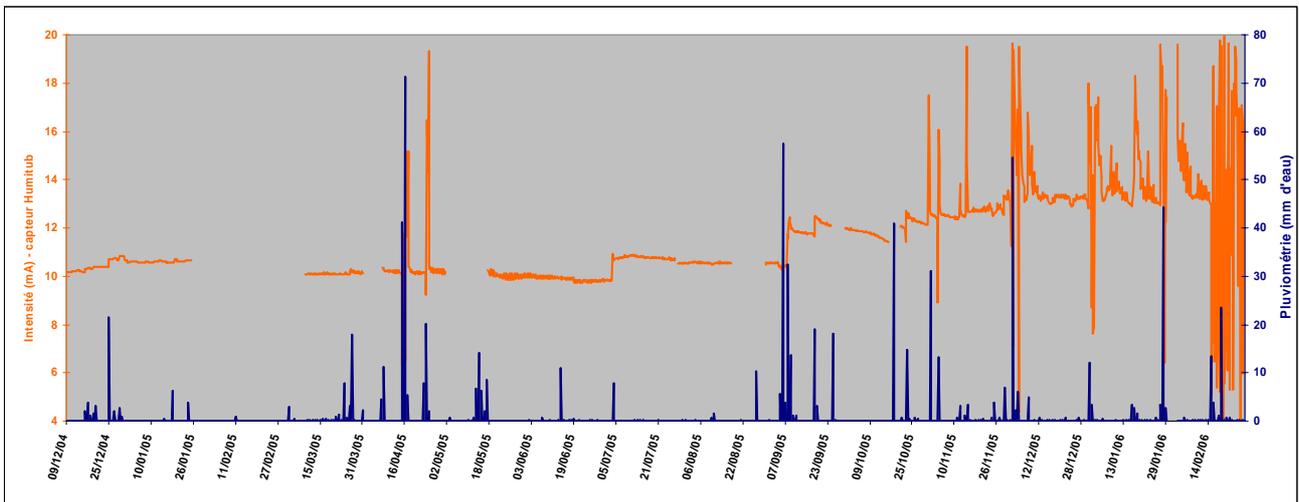


Illustration 103 – Intensité mesurée par le capteur Humitub à 0,5 m de profondeur sur la canne 2 et pluviométrie – site de Mormoiron (du 9/12/04 au 28/02/06)

On peut noter que les périodes de saturation sont plus rares et moins longues que pour le capteur situé 1 m plus bas. Ainsi, au printemps 2005, deux périodes de saturation très brèves (24 heures) se sont produites les 18 et 25/04, suite à un épisode pluvieux intense, suivi d'une pluie plus modérée. Après l'été particulièrement sec, les précipitations de l'automne n'induisent pas de saturation en septembre et octobre, et des saturations courtes (24 heures) à trois reprises en novembre. En décembre et janvier en revanche, chaque pluie provoque une saturation de quelques jours, tandis qu'à partir du 16 février 2006 jusqu'à la fin du mois, la saturation perdure. Ces résultats confirment donc les hypothèses énoncées plus haut, à savoir une saturation des capteurs causée par des teneurs en eau élevées dans le sol, avec la mise en évidence de l'impact à la fois des épisodes pluviométriques intenses et du cumul de précipitations dans la période précédant la saturation.

Une autre limite concerne les mesures effectuées in situ et se traduit par une chute des intensités enregistrées par certains capteurs pendant la période sèche de l'été 2005. Ce problème, qui se traduit par un créneau bas dans les mesures, ne concerne que certains capteurs et pour des périodes relativement courtes.

Un exemple de cette observation est présenté sur l'illustration 104, où ce phénomène est visible à deux reprises, les 13/07 et 05/08/2005 (comme sur l'ensemble des autres graphiques présentés ici et comme précisé plus haut, les interruptions de la courbe correspondent à des lacunes d'enregistrement) .

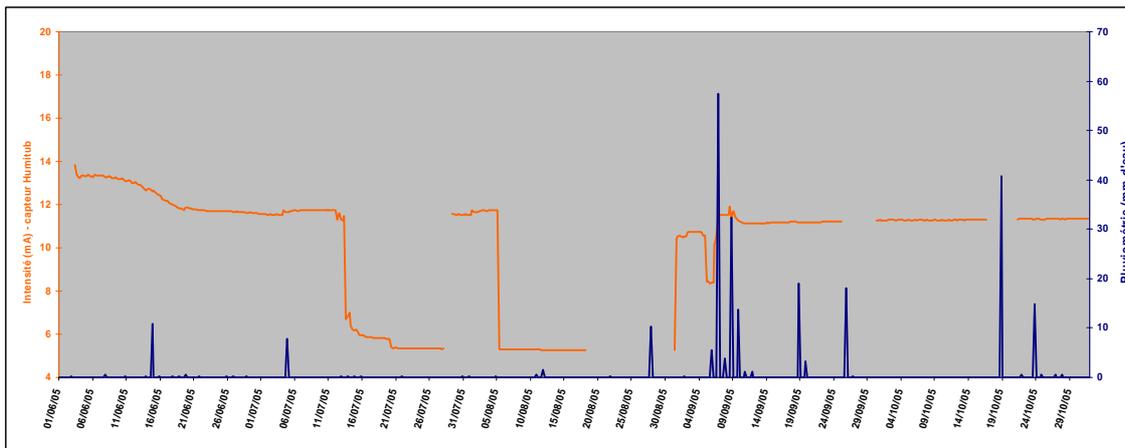


Illustration 104 - Intensité mesurée par le capteur Humitub à 0,5 m de profondeur sur la canne 1 et pluviométrie – site de Mormoiron (période du 01/06/2005 au 31/10/2005)

Après cette chute brutale, la valeur mesurée par le capteur est stable ou légèrement décroissante, de l'ordre de 5 à 6 mA, et cette valeur est trop faible pour avoir une signification physique correspondant à une permittivité mesurée dans le sol (cf. § 3.1.5). Ce phénomène, qui se produit pendant les périodes sèches, pourrait s'expliquer par un retrait du sol autour du capteur du fait de la diminution de la teneur en eau dans les terrains argileux, qui induirait l'apparition d'un espace annulaire rempli d'air entre la canne et le sol. Cette interface perturberait les mesures de permittivité, lesquelles sont très sensibles au contact entre le capteur et le terrain, comme cela a déjà été souligné.

Premières interprétations de quelques mesures des capteurs Humitub

Les quelques graphiques précédents montrent déjà l'évolution des intensités de sortie fournies par certains capteurs et présentées en parallèle de la pluviométrie. Ce paragraphe montre d'autres exemples, notamment en superposant les résultats issus de différents capteurs, et en se focalisant sur certaines périodes.

Le graphique présenté sur l'illustration 105 concerne différents capteurs Humitub de la canne 1, placés à des profondeurs respectives de 0,5 m, 1 m, 1,5 m, 5 m et 7 m. Les résultats représentés ici correspondent à la période comprise entre le 09/12/2004 et le 23/04/2005, c'est-à-dire pendant l'hiver 2004 et le début de printemps 2005. Cette

période a été caractérisée par une pluviométrie globalement faible, mise à part les précipitations très fortes survenues les 15 et 16 avril 2005 (112 mm).

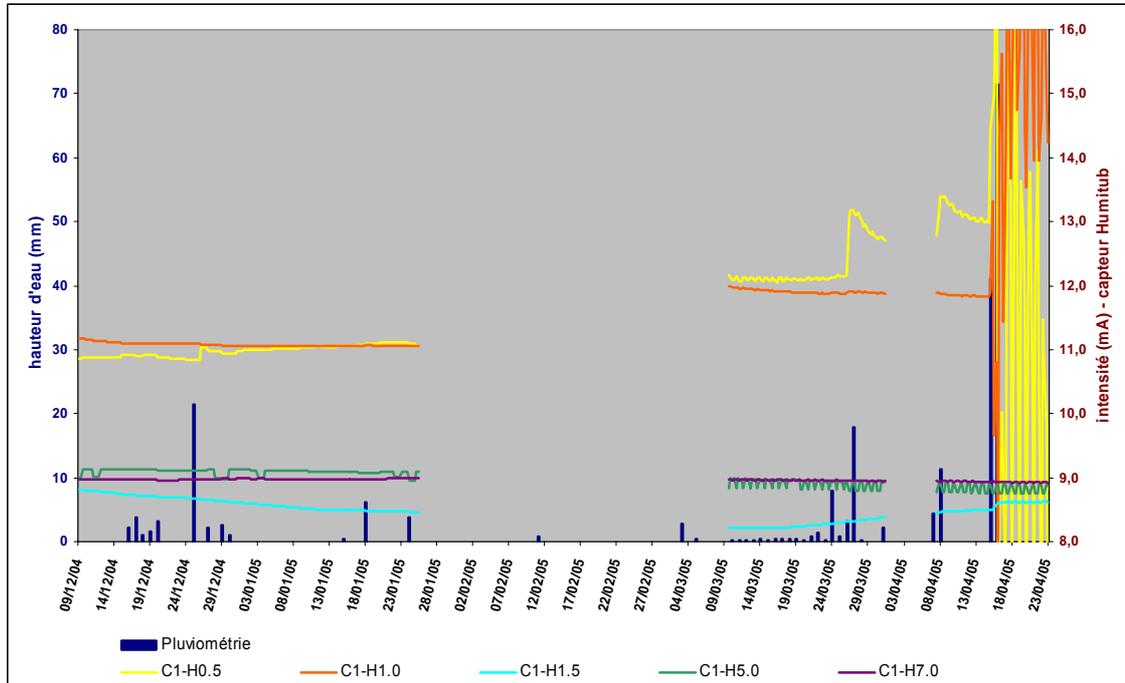


Illustration 105 - Intensités en sortie des capteurs Humitub de la canne 1 à 0,5 m, 1 m, 1,5 m, 5 m et 7 m de profondeur et pluviométrie – site de Mormoiron (du 09/12/2004 au 23/04/2005)

On observe que les variations d'intensités mesurées par les capteurs, donc les variations d'humidité dans le sol, sont très différentes entre les horizons proches de la surface et les plus profonds. Ainsi, des pics d'intensités sont observés pour le capteur à 0,5 m de profondeur pour les pluies du 25/12/2004 (21,5 mm), du 27/03/2005 (17,5 mm) et du 08/04/2005 (11 mm), alors que ce n'est pas le cas pour les capteurs plus profonds. Les intensités enregistrées par les capteurs à 1 m et 1,5 m de profondeur augmentent sans à-coup au cours de l'hiver et au début du printemps (notamment après la première période de lacune pour le capteur à 1,5 m). Les intensités mesurées par les capteurs plus profonds (5 et 7 m) ne varient que très peu pendant la période (ou alors sous forme de petites oscillations périodiques liées à des instabilités non significatives).

L'épisode pluvieux très intense des 15 et 16 avril 2005 (112 mm) a conduit à la saturation quasi-immédiate des capteurs situés à 0,5 et 1 m de profondeur, alors qu'il se traduit seulement par une légère augmentation de l'intensité mesurée par le capteur situé à 1,5 m de profondeur et qu'il n'a aucune incidence visible sur les deux autres capteurs plus profonds présentés ici. Ceci tendrait à montrer que l'impact d'une telle pluie intense dans un sol en cours de réhumidification progressive ne s'étend pas au-delà de cette profondeur de 1 m. Par conséquent, le phénomène de saturation concomitante qui apparaît sur les capteurs intermédiaires (entre 2 et 4,5 m) et qui n'a pas été figuré sur le graphique de l'illustration 105 par souci de lisibilité, ne pourrait

s'expliquer que par des circulations temporaires d'eau le long de la canne ou des apports latéraux dans des niveaux plus silteux.

Le graphique de l'illustration 106 présente les intensités mesurées par le capteur Humitub de la canne 2 situé à 2 m de profondeur entre le 9/12/2004 et le 28/02/2005. Il permet de suivre les variations de l'intensité mesurée par ce capteur sur quasiment l'ensemble de la période considérée, ce qui permet d'avoir une idée précise de l'évolution des teneurs en eau dans le sol à 2 m de profondeur : on observe ainsi que les variations sont très atténuées par rapport à celles observées pour les capteurs proches de la surface (comme cela a été présenté sur l'illustration 103 par exemple).

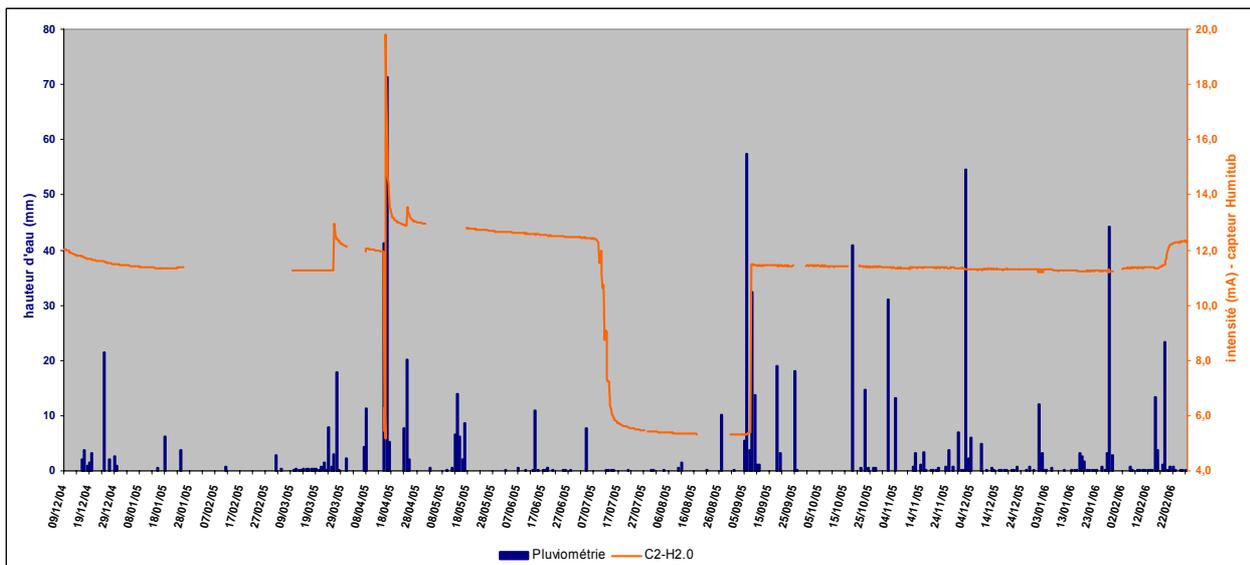


Illustration 106 - Intensité mesurée par le capteur Humitub de la canne 2 à 2 m de profondeur et pluviométrie – site de Mormoiron (période du 09/12/2004 au 28/02/2005)

On observe dans un premier temps que la dessiccation progresse jusqu'à mi-janvier pour quasiment se stabiliser jusqu'au 26/03/2006, ce qui signifie que les pluies hivernales, très inférieures aux normales saisonnières, n'ont pas réhumidifié le sol en profondeur. Le premier pic d'intensité apparaît autour du 26/03/2005, suite à un cumul de pluie de 31,2 mm entre le 22 et le 27/03/2005 et il se traduit par une augmentation substantielle de l'intensité. L'épisode pluviométrique très intense des 15 et 16 avril 2005 (112 mm) a entraîné une saturation pendant 24 heures et s'est, là encore, traduit par une augmentation de l'intensité. Un nouveau pic d'intensité est visible quelques jours après (le 25/04/2005, suite à un cumul de 29,5 mm d'eau sur 72 heures). L'intensité mesurée suit ensuite une décroissance lente jusqu'à la première quinzaine de juillet où une chute brutale des valeurs est observée, vraisemblablement dû à un phénomène de retrait du sol argileux, donc sans relation linéaire avec une diminution de teneur en eau. Les fortes précipitations de début septembre 2005 (106,5 mm entre le 6 et le 9/09/2005) mettent un terme à ce créneau bas et l'intensité reste ensuite stable jusqu'à mi-février 2006 : ainsi, les nombreux épisodes pluviométriques de l'automne 2005 et du début de l'hiver 2005-2006 ne se sont pas traduits par une remontée de la teneur en eau à cette profondeur de 2 m. Par contre, la ré-

humidification débute à partir de mi-février, après des précipitations soutenues fin janvier et mi-février 2006.

Le graphique présenté sur l'illustration 107 montre les intensités mesurées par les 8 premiers capteurs de la canne 2 (de 0,5 à 4 m, espacés de 0,5 m) pour la période du 01/09/2004 au 28/02/2005. Afin d'assurer une meilleure lisibilité, les phases de saturation ont été ramenées à une intensité artificielle de 20 mA. Ces différentes courbes permettent de visualiser à nouveau des observations faites à partir des exemples présentés précédemment :

- les fortes précipitations de début septembre 2005 (106,5 mm d'eau entre le 6 et le 9 septembre, après un été très sec) se traduisent par une hausse des intensités mesurées sur tous les capteurs (excepté celui situé à 4 m de profondeur). On peut noter que cette hausse est très marquée pour les capteurs pour lesquels les valeurs estivales étaient anormalement basses, vraisemblablement en raison d'un retrait des terrains argileux. Cette hausse est quasi-immédiate sur tous les capteurs (et c'est même le capteur à 2,5 m de profondeur qui répond en premier, 24 heures avant les autres), ce qui signifie que des écoulements rapides dans le sol se sont produits lors de cette pluie intense. Ces écoulements préférentiels ont pu se produire soit au travers de la macroporosité qui caractérisent les sols argileux desséchés, soit par circulation dans des niveaux plus silteux, soit par infiltration directe dans les vides de l'espace annulaire situé entre la canne et le sol ;
- ces fortes précipitations de début septembre 2005 ne conduisent à une saturation que sur le capteur situé à 1 m de profondeur (pendant un peu plus de 24 h) et partiellement sur le capteur à 1,5 m de profondeur (pendant quelques heures seulement). Ainsi, seuls les horizons de surface sont concernés (et encore pas le capteur à 0,5 m) et pendant une durée très courte, ce qui la rapidité de propagation du front de ré-humidification dans le sol au cours de cet événement ;
- après le pic d'intensité consécutif à ces pluies intenses de début septembre 2005, toutes les valeurs enregistrées sont très supérieures à ce qu'elles étaient auparavant, ce qui signifie que cet épisode pluvieux a nettement contribué à réhumidifier les terrains, et ce sur une grande profondeur ;
- ce pic d'intensité est suivi par une phase de décroissance sur tous les capteurs jusqu'à 3 m de profondeur : cette décroissance est particulièrement rapide pour les capteurs proches de la surface et à peine marquée pour les capteurs situés à 2 et 2,5 m de profondeur : on a donc l'impression que l'humidité apportée par ce premier front se diffuse ensuite progressivement vers la profondeur, à une vitesse plus lente que l'arrivée du premier pic. Quant aux capteurs plus profonds, ils augmentent sensiblement à partir du 12/09/2005, quelques jours après cet épisode pluvieux, ce qui tendrait à indiquer que le front de saturation issu de cette réhumidification brutale se propage progressivement au moins jusqu'à une profondeur de 4 m. Cette croissance de l'intensité mesurée est assez rapide à 3,5 m et à peine perceptible à 4 m, profondeur à laquelle aucun pic d'intensité n'est observé, ce qui pourrait signifier que les terrains autour du capteur ne sont pas affectés par les écoulements préférentiels ;

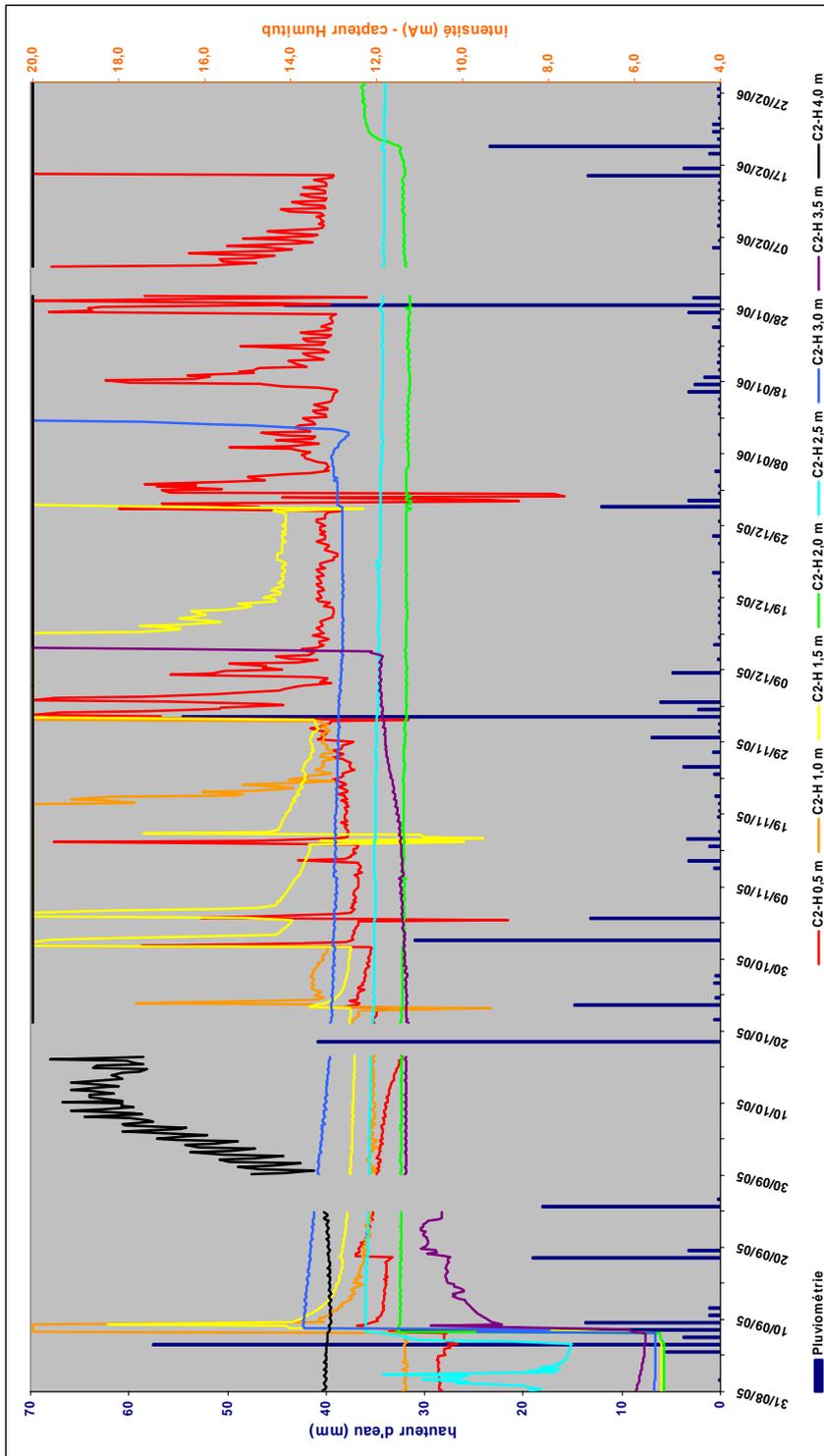


Illustration 107 - Intensités de sortie des capteurs Humitub de la canne 2 aux profondeurs de 0,5 m, 1 m, 1,5 m, 2 m, 2,5 m, 3 m, 3,5 m et 4 m et pluviométrie – site de Mormoiron (du 01/09/2004 au 28/02/2005) – périodes de saturations ramenées à 20 mA

- l'épisode pluviométrique modéré du 18/09/2005 (19 mm) n'a d'influence que sur les capteurs les plus superficiels, à 0,5 m et, dans une faible mesure, à 1 m. Cette augmentation significative de la teneur en eau ne se retrouve pas dans les capteurs situés plus bas, à l'exception du capteur à 3,5 m qui montre lui aussi une croissance de l'intensité de sortie très nettement corrélée avec cet épisode pluvieux, ce qui peut être considéré comme une nouvelle manifestation visible de ces phénomènes d'écoulements préférentiels ;
- plus généralement, après cette phase de réhumidification intense et rapide consécutive aux fortes précipitations survenues début septembre 2005, deux types de comportement des capteurs peuvent être mis en évidence lors des différents épisodes pluvieux qui se succèdent ensuite à l'automne et en hiver :
 - pour les capteurs proches de la surface (0,5 m, 1 m et 1,5 m), presque toutes périodes de précipitation vont se traduire par un pic d'intensité quasi-immédiat suivi parfois d'une courte période de saturation du signal de sortie. Cette saturation est durable à partir du 31/12/2005 pour le capteur situé à 1,5 m de profondeur, à partir du 01/11/2005 à 1 m de profondeur et à partir du 16/02/2006 à 0,5 m de profondeur ;
 - pour les capteurs intermédiaires, la corrélation entre le signal d'intensité enregistré en sortie des capteurs et les événements pluvieux n'est guère marquée. Ainsi, le capteur situé à 2 m de profondeur est stable ou en lente décroissante entre mi-septembre 2005 et fin janvier 2006, puis on observe une légère augmentation de l'intensité à partir de fin janvier, qui s'intensifie à partir du 18/02/2006 : tandis que les précipitations du quatrième trimestre 2005 ne semblent pas avoir d'incidence à cette profondeur, celles de fin janvier et de février vont contribuer à une lente réhumidification de cet horizon. A 2,5 m de profondeur, on observe également une décroissante très lente mais régulière de l'intensité mesurée à partir de mi-septembre 2005, qui se prolonge au moins jusqu'à fin février 2006 sans modification sensible du signal de sortie.
 - pour les capteurs plus profonds, on observe une saturation progressive qui touche successivement les capteurs depuis le fond vers la surface, avec un retard sensible par rapport aux dates des précipitations. Le capteur situé à 4 m de profondeur voit son intensité de sortie augmenter progressivement à partir de fin septembre pour se saturer vers le 20 octobre. A 3,5 m, le signal de sortie fourni par le capteur est relativement bien corrélé avec la répartition des pluies de septembre puis reste stable pendant tout le mois d'octobre, montre de nouveau une croissance régulière en novembre puis une brusque saturation le 12/12/2005, quelques jours après les fortes pluies enregistrées début décembre (notamment 55 mm le 02/12/2005). Quant au capteur situé encore plus haut, à 3 m de profondeur, il suit une décroissante régulière et indépendante des précipitations enregistrées entre mi-septembre et mi-décembre 2005 pour se stabiliser ensuite jusqu'à fin décembre. Les 12 mm de pluie tombés le 31/12/2005 vont être le signe d'une augmentation modérée quoique bien marquée de l'intensité, suivie d'une nouvelle décroissance avant d'aboutir à une brusque saturation le 12/01/2006 (sans nouvelle précipitation enregistrée).

Une des explications possibles à ce schéma serait que les capteurs les plus profonds sont influencé par le niveau plus silteux observé à une profondeur de 4,50 m, lequel pourrait être le siège d'un écoulement temporaire déclenché après les premières pluies de septembre mais sans corrélation temporelle étroite avec l'occurrence des pluies de surface. De fait, les capteurs situés à 4,50 et 5 m de profondeur (qui ne figurent pas sur le graphique de l'illustration 107, par souci de lisibilité) sont également saturés dès la mi septembre alors que le capteur placé en dessous (à 6 m) reste stable. Cette saturation liés aux apports latéraux s'étendrait ainsi progressivement vers le haut, saturant d'abord le capteur de 4 m, puis celui de 3,5 m 3 semaines plus tard et enfin le capteur de 3 m encore un mois plus tard.

Si cette hypothèse se confirme, il y aurait donc à la fois propagation des écoulements vers le bas depuis la surface et vers le haut depuis cet horizon plus perméable lorsqu'il devient le siège d'écoulements temporaires. Un tel schéma complique singulièrement l'interprétation des observations, d'autant que ces propagations du front de réhumidification se font manifestement de manière complexe, en procédant par à-coups, plus ou moins étroitement corrélés avec les épisodes pluvieux.

Mesures des températures dans le sol

Le graphique présenté sur l'illustration 108 présente les températures enregistrées sur la canne 2 à Mormoiron, à des profondeurs de 0,5 m, 2,5 m et 4 m, ainsi que la pluviométrie journalière, entre le 09/12/2004 et le 28/02/2006.

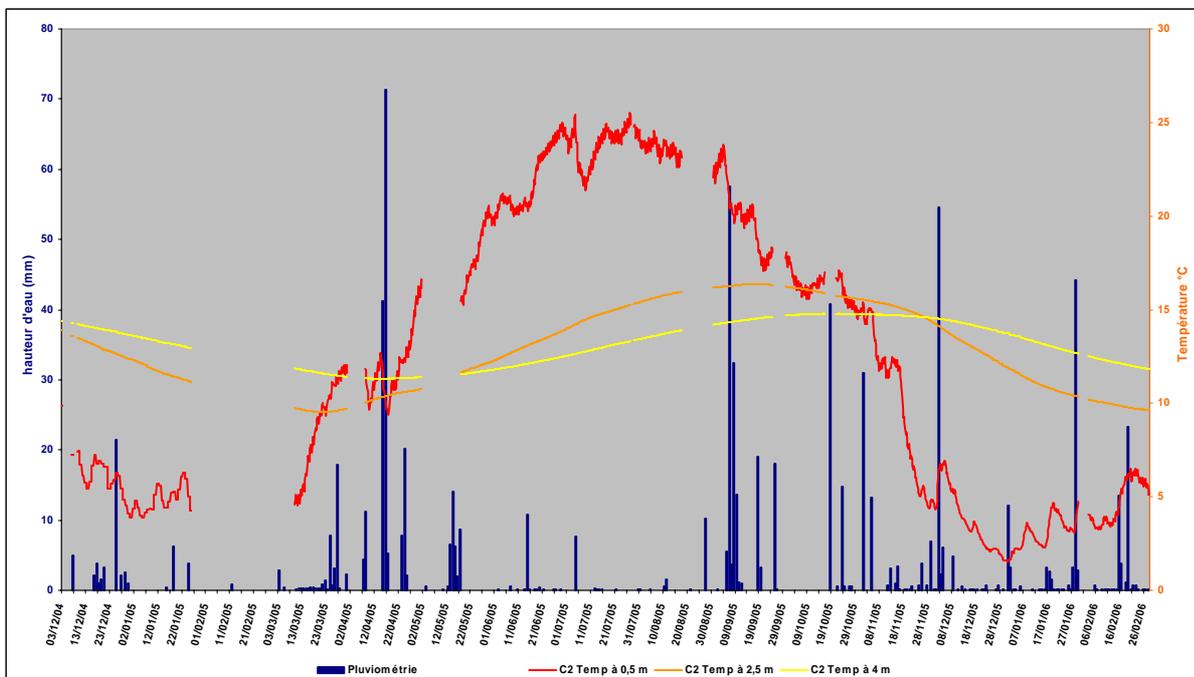


Illustration 108 - Températures enregistrées sur la canne 2 à 0,5 m, 2,5 m, 4 m de profondeur entre le 09/12/2004 et le 16/02/2006 et pluviométrie journalière – site de Mormoiron

Les courbes de températures enregistrées correspondent à la théorie, avec des formes de sinusoïdes, dont la période est sensiblement annuelle, et dont l'amplitude est décroissante avec la profondeur : sur l'intervalle de temps considéré, les températures varient de 1,5 à 25,5°C à 0,5 m de profondeur (soit une amplitude de 24°C), de 9,5 à 16,4°C à 2,5 m de profondeur (soit une amplitude de 6,9°C) et de 11,3 à 14,8°C à 4 m de profondeur (soit une amplitude de 3,5°C). On peut également noter un décalage dans le temps des courbes avec la profondeur : maxima enregistrés fin juillet à 0,5 m de profondeur, mi-septembre à 2,5 m et fin octobre à 4 m. Enfin, on note qu'à 2,5 et 4 m de profondeur, les courbes sont très lisses et ne montrent pas de variations de courte période. En revanche, à 0,5 m de profondeur, les variations journalières sont nettement visibles (de l'ordre de quelques dixièmes de degrés en général) et des fluctuations irrégulières, dont la période varie de quelques jours à quelques semaines, viennent altérer à la forme globalement sinusoïdale de la courbe.

Par ailleurs, on peut remarquer que lors des épisodes pluviométriques très intenses des 15 et 16 avril 2005 (112 mm), du 6 au 9 septembre 2005 (106,5 mm), du 18 octobre 2005 (40,8 mm à Carpentras), du 2 décembre 2005 (55 mm) et du 28 janvier 2006 (44 mm), les températures mesurées à 2,5 m et 4 m de profondeur ne présentent aucune variation particulière. Cela laisse donc penser qu'il n'y a pas de circulations rapides d'eau le long de la canne, mais que les augmentations de teneur en eau enregistrées sont bien la conséquence d'infiltrations à travers le sol, puisque l'eau prend la température du milieu traversé lors de sa propagation en profondeur. Les seules variations de températures enregistrées lors de certains épisodes pluvieux (baisse pour les précipitations du printemps et de l'automne, hausse pour les pluies hivernales) concernent le capteur le plus superficiel (à 0,5 m de profondeur). Pour ce dernier, ces variations peuvent aussi s'expliquer par une simple évolution de la température de l'air dû au changement de temps induit par l'épisode pluviométrique, sans qu'elles soient nécessairement la marque d'infiltrations éventuelles le long de la canne ou dans le sol d'une eau dont la température n'aurait pas eu le temps de s'équilibrer avec celle du milieu ambiant.

7.2. SITE DE POITIERS

7.2.1. Source des données

L'installation des capteurs Humitub sur le site de Poitiers a été effectuée entre le 28 novembre et le 6 décembre 2005. La centrale d'acquisition enregistre deux fois par jour les mesures d'intensité fournies par les capteurs, sur une plage comprise entre 4 et 20 mA. Ces données sont télétransmises chaque semaine au BRGM par liaison GSM et l'on dispose ainsi des données concernant les 22 capteurs d'humidité et les 6 capteurs de température depuis la date du 7 décembre 2005. En l'absence d'étalonnage définitif des capteurs Humitub (essais de laboratoire en cours), il a été jugé préférable de présenter dans un premier temps ces résultats bruts en intensité, laquelle est directement reliée à la teneur en eau du sol.

La pluviométrie est mesurée sur le site du Deffend par l'Université de Poitiers, et nous disposons des données jusqu'à la date du 14 mars 2006. C'est donc cette date qui a été retenue pour limiter la période de mesure prise en compte pour le présent rapport, soit une durée totale d'observation d'environ 3 mois pour cette première phase de l'étude. Il est important de souligner que cette période comprise entre le 7 décembre 2005 et le 14 mars 2006 a été particulièrement pluvieuse (288,7 mm d'eau cumulée) et succédait à une période plus sèche.

7.2.2. Présentation des résultats

Les graphiques présentés ci-après comportent en abscisse le temps (période du 7/12/2005 au 14/03/2006) et en ordonnée d'une part l'intensité mesurée par un ou plusieurs capteur Humitub en mA, et d'autre part la pluviométrie journalière cumulée (en mm) mesurée sur le site et communiquée par l'Université de Poitiers.

Ces graphiques permettent d'illustrer le type de résultats que l'on peut obtenir à partir de l'instrumentation mise en place. Si une interprétation préliminaire à partir de certaines tendances observées peut déjà être faite, il est à ce stade prématuré de tirer des conclusions plus avancées, étant donné que la période de mesure présentée ici n'est que de trois mois.

Capteur à 0,5 m de profondeur, en prairie

Ce premier graphique (Illustration 109) correspond aux résultats enregistrés au niveau du capteur Humitub le plus proche de la surface (0,5 m de profondeur), dans la zone de prairie. Il montre que chaque pluie supérieure à 5 mm d'eau se traduit quasi-immédiatement par un pic d'intensité, donc d'humidité dans le sol. Celui-ci est en général de courte durée, mais l'humidité du sol après le passage de ce pic est supérieure à ce qu'elle était avant, particulièrement pour les précipitations qui s'échelonnent sur une plus longue durée avec un cumul important (période du 31/12/05 au 02/01/06 : 24,4 mm d'eau cumulés, période du 15 au 21/02/06 : 58,5 mm d'eau cumulés). Les périodes sans précipitations se traduisent par une légère décroissance de la teneur en eau, relativement régulière.

Schématiquement, ces résultats font bien penser au passage de fronts d'humidité consécutifs aux précipitations. Ces fronts se caractérisent par des écoulements relativement rapides, dont la progression vers le bas réhumidifie progressivement les couches traversées, une partie du volume d'eau disponible étant transféré aux couches plus profondes.

On peut enfin noter que l'accumulation de pluie entre le 15 février et le 11 mars 2006 a pour conséquence une augmentation notable de la teneur en eau dans le sol, à la profondeur observée.

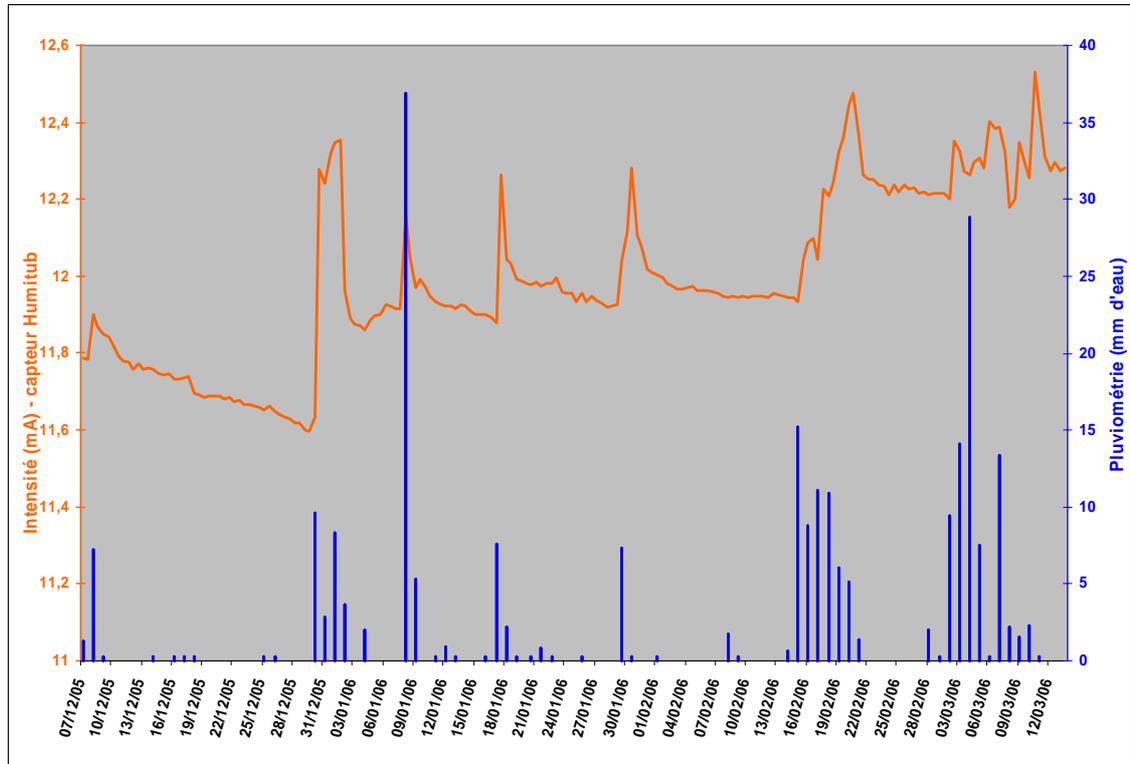


Illustration 109 - Pluviométrie et humidité à 0,5 m de profondeur en prairie - site du Deffend

Capteur à 1 m de profondeur, en prairie

Ce second graphique (Illustration 110) correspond aux résultats enregistrés au niveau du capteur Humitub situé à 1 m de profondeur, dans la zone de prairie. Il montre lui aussi que les précipitations se traduisent par des pics d'intensité au niveau du capteur Humitub. Cependant, ces pics sont de plus grande ampleur, et s'étalent sur une plus grande période, ce qui pourrait signifier que le front d'humidité est plus diffus et progresse plus lentement à cette profondeur. On peut également remarquer que la première période de fortes précipitations (du 31/12/05 au 02/01/06 : 24,4 mm d'eau cumulés) ne donne pas lieu à un pic, mais à une légère augmentation de la teneur en eau. Par contre, c'est la deuxième période de fortes précipitations (du 8 au 10/01/06 : 42,2 mm d'eau cumulés) qui donne lieu à un pic très marqué, alors que pour le capteur situé à 0,5 m de profondeur, ce pic était moins important.

On peut avancer une première hypothèse, qui demandera naturellement à être validée par la suite, après une interprétation approfondie des résultats (étalonnage des capteurs, comparaison de plusieurs périodes de réhumidification, prise en compte plus fine de la géologie, etc.). Cette interprétation est la suivante : la quantité d'eau infiltrée lors de la première période de précipitation conséquente (du 31/12/05 au 02/01/06) est arrivée dans un sol particulièrement sec et a essentiellement réhumidifié les horizons très superficiels. La forte précipitation qui a suivi (du 8 au 10/01/06) est arrivée dans un sol plus humide en surface et a, quant à elle, davantage marqué l'horizon situé à 1 m de profondeur.

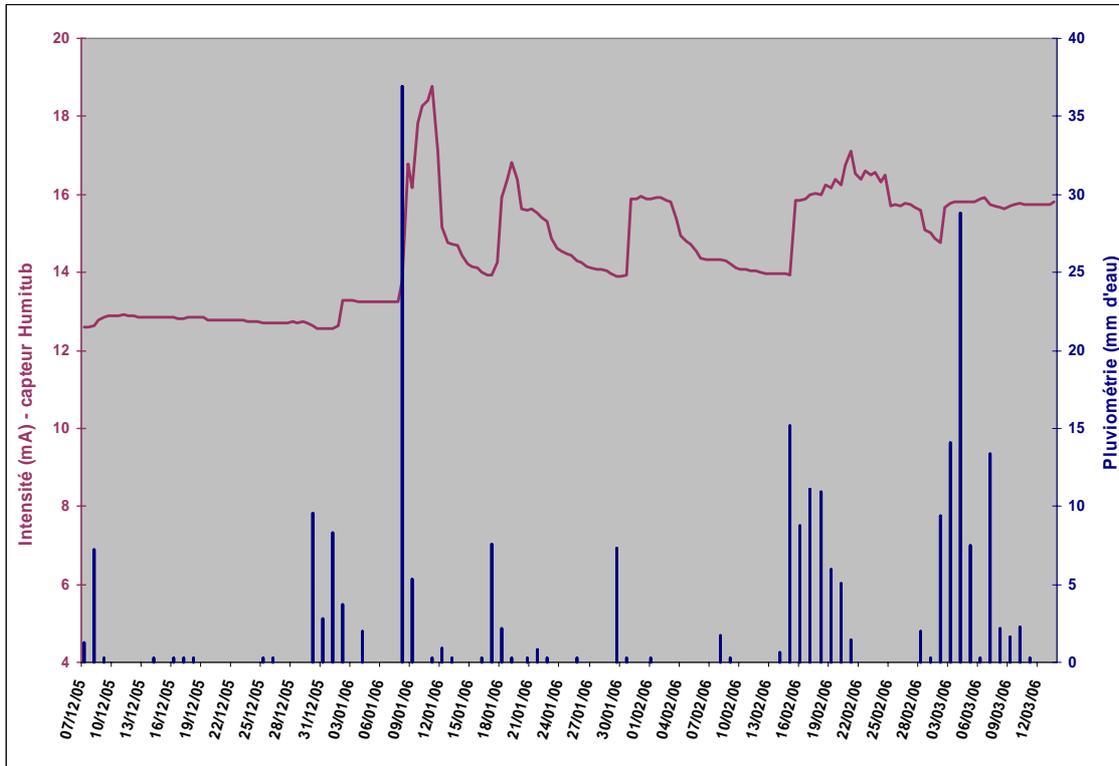


Illustration 110 - Pluviométrie et humidité à 1 m de profondeur en prairie - site du Deffend

Le fait que les pics soient moins étroits à 1 m de profondeur qu'à 0,5 m peut être dû, soit à une hétérogénéité dans la géologie des horizons correspondants, soit à un étalement du front d'humidité en profondeur, du fait de l'intégration de vitesses d'écoulements différentes. On peut également noter que les décroissances après le passage des fronts d'humidité sont plus lentes que celles observées à 0,5 m de profondeur. On peut enfin remarquer que l'accumulation de pluie entre le 15 février et le 11 mars 2006 a pour conséquence une nette augmentation de la teneur en eau dans le sol.

Capteurs à 0,5 et 1 m de profondeur, en prairie

La comparaison des deux courbes précédentes (Humitub à 0,5 et 1 m de profondeur) sur le même graphique (Illustration 111) montre que les plages de variations des intensités mesurées sont très différentes entre les deux capteurs : en l'absence de données d'étalonnage plus précises, il est difficile d'interpréter cet écart, sachant par ailleurs que les caractéristiques lithologiques varient entre les deux horizons concernés la granulométrie étant plus grossière en surface et donc la perméabilité a priori supérieure à 0,5 m. Ce graphique met en tout cas clairement en évidence que la teneur en eau dans l'horizon le plus superficiel (0,5 m) est en permanence inférieure à celle enregistrée plus bas (1 m), même après réhumidification hivernale, ce qui tend à confirmer le rôle de la lithologie dans cette différence de comportement.

La comparaison des deux courbes permet également de souligner ce qui a déjà été noté concernant la première période de fortes précipitations (du 31/12/05 au 02/01/06 : 24,4 mm d'eau cumulés) qui se traduit par un pic d'intensité à 0,5 m, mais pas à 1 m. Quant au fait que le pic de teneur en eau soit moins marqué à 0,5 m qu'à 1 m de profondeur lors des fortes pluies du 8 au 10 janvier, ceci pourrait s'expliquer en partie par la rapidité de l'infiltration dans l'horizon superficiel plus limoneux dans la mesure où les capteurs ne sont interrogés que deux fois par jour (à 0 h et 12 h pour ce qui concerne cette période).

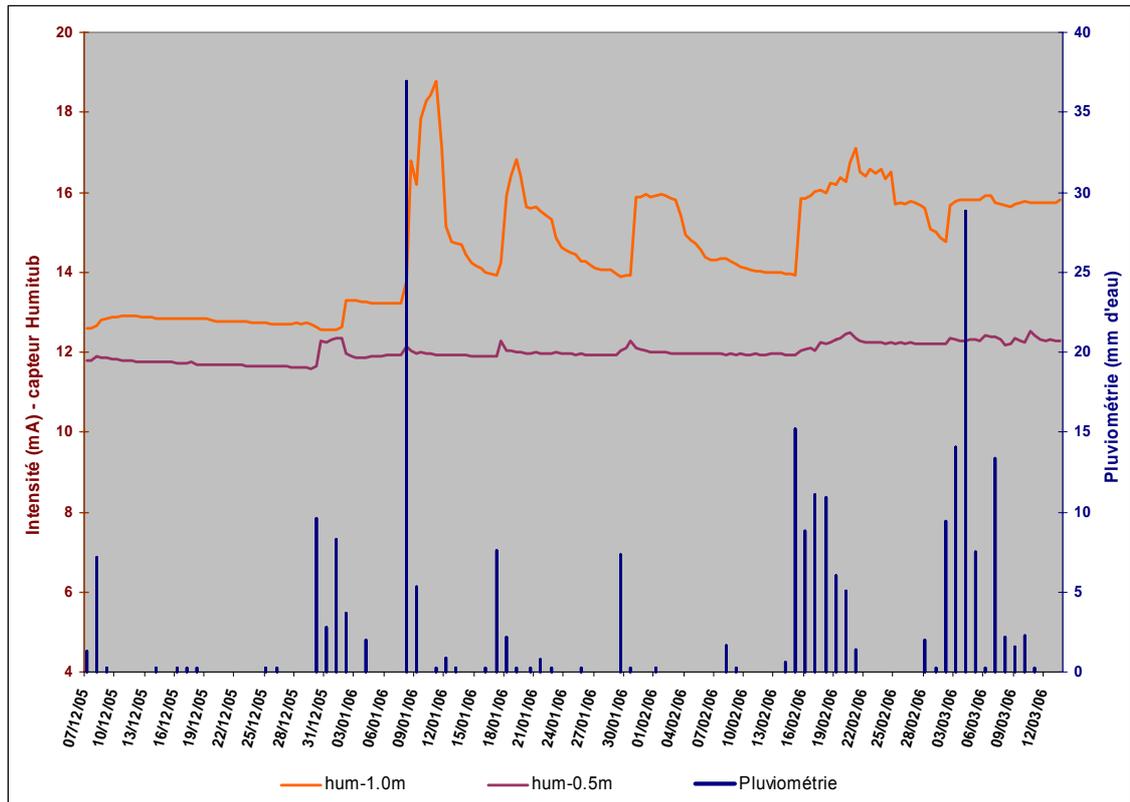


Illustration 111 - Pluviométrie et humidité à 0,5 et 1 m de profondeur en prairie - site du Deffend

Capteur à 1,5 m de profondeur, en prairie

Ce graphique (Illustration 112) présente les résultats du capteur Humitub situé à 1,5 m de profondeur dans la zone de prairie. Son comportement est nettement différent de celui des capteurs plus superficiels situés à 0,5 et 1 m de profondeur. On observe en particulier une saturation du capteur qui, à partir du 19 février 2006, donne des résultats erratiques, lesquels ne sont manifestement plus en correspondance avec les teneurs en eau réelles dans le sol. Des investigations complémentaires par rapport à ce phénomène de saturation sont actuellement entreprises en laboratoire dans le cadre d'un autre programme de recherche et devraient permettre de mieux comprendre ce comportement. Néanmoins, les différentes observations effectuées jusqu'à présent sur les capteurs installés à Mormoiron et à Poitiers, ainsi que les essais déjà effectués en laboratoire, permettent de conclure que ce phénomène de

saturation des capteurs est lié à une teneur en eau élevée (ou ayant brusquement augmenté) dans le sol, sans nécessairement que la limite de la plage de mesure des capteurs ait été atteinte.

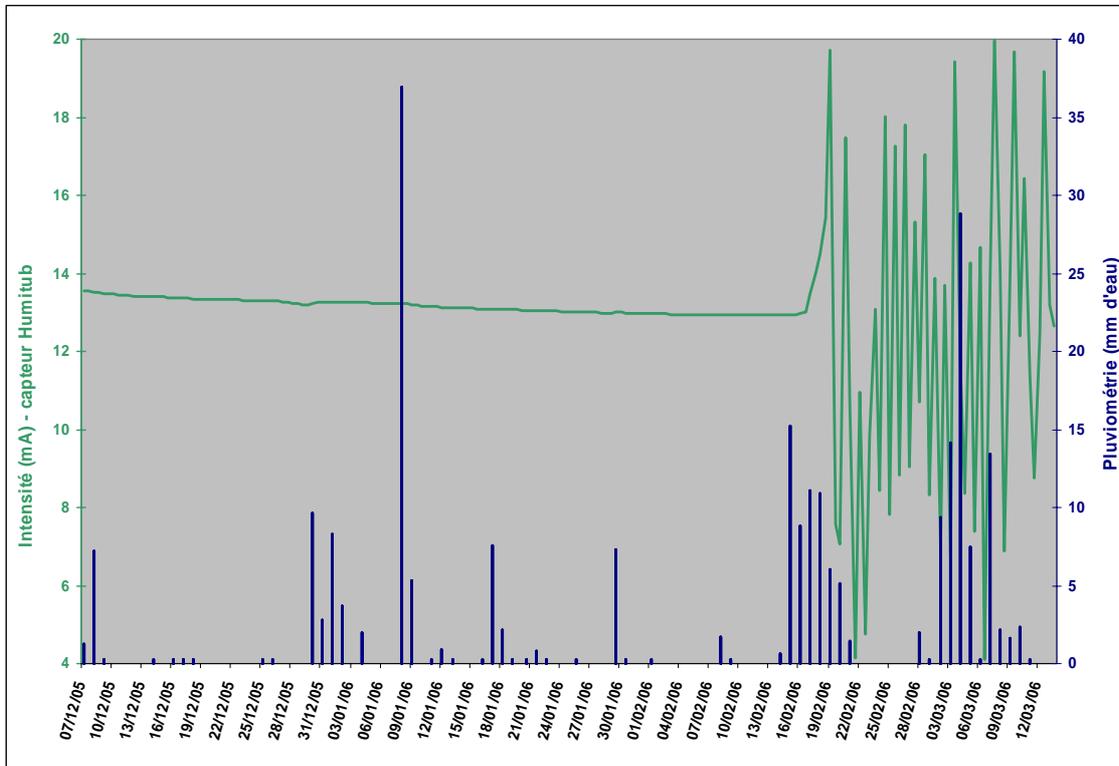


Illustration 112 - Pluviométrie et humidité à 1,5 de profondeur en prairie - site du Deffend

Dans le cas présent, pour le capteur Humitub situé à 1,5 m de profondeur en prairie, cette saturation apparaît 4 jours après le début d'un épisode pluvieux intense qui a débuté le 15 février (46 mm d'eau cumulés entre le 15 et le 18/02/06). On a par ailleurs pu noter dans les paragraphes précédents que cette période de fortes précipitations correspondait, pour les capteurs situés à 0,5 et 1 m de profondeur, à des augmentations marquées et prolongées des intensités de sortie mesurées.

Pour la période comprise entre le 7/12/2005 et le 18/02/2006, il est nécessaire de se reporter au graphique présenté sur l'illustration 113, où l'échelle des intensités est adaptée aux variations observées durant cette période.

On remarque que pendant la période du 07/12/2005 au 15/02/2006, la teneur en eau dans le sol à 1,5 m de profondeur suit une décroissance régulière, à peine interrompue suite à l'épisode pluvieux du 31/12/05 au 02/01/06 (24,4 mm d'eau cumulés). On observe que les fortes pluies enregistrées du 8 au 10/01/06 (42,2 mm d'eau cumulés) n'ont, quant à elles, pas d'incidence sur cette baisse graduelle des teneurs en eau.

On pourrait avancer comme hypothèse d'interprétation que les différents épisodes pluvieux qui se sont succédés entre le 07/12/05 et le 10/02/06 ont principalement

réhumidifié les horizons superficiels (0,5 et 1 m de profondeur) et que les fronts d'humidification correspondant ne se sont pas propagés beaucoup plus en profondeur. Ce n'est qu'à partir des précipitations postérieures au 15/02/06 que la teneur en eau a commencé à augmenter à 1,5 m de profondeur, et ce de façon rapide jusqu'à provoquer la saturation du capteur, tandis qu'en surface, ce même épisode pluvieux, relativement intense et prolongé, s'est traduit par une augmentation significative des teneurs en eau.

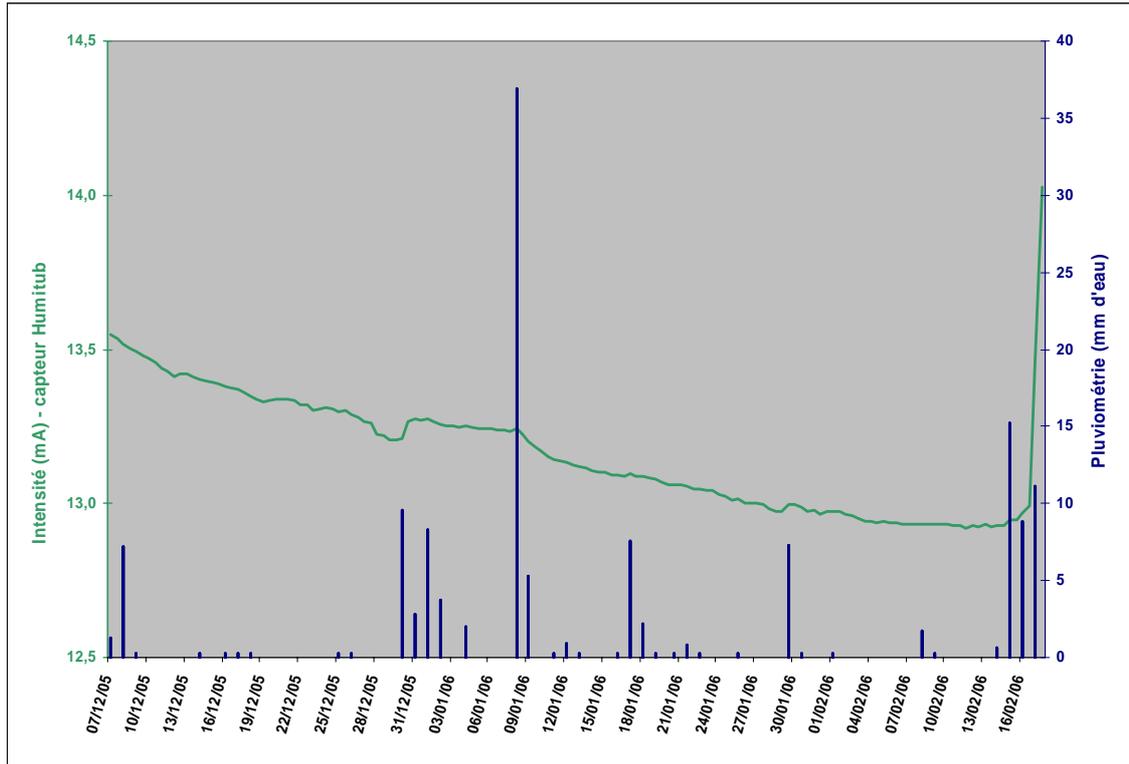


Illustration 113 - Pluviométrie et humidité à 1,5 de profondeur en prairie - site du Deffend

Capteurs à 2,5 m, 3,5 m 4 m et 5 m de profondeur, en forêt

Ce graphique (Illustration 114) présente les résultats enregistrés au niveau des capteurs Humitub situés à 2,5 m, 3,5 m, 4 m et 6 m de profondeur, dans la zone de forêt, toujours pour la période du 07/12/05 au 14/03/06.

Il faut noter que des problèmes de transmission ont conduit à la perte des données sur ces différents capteurs pour la période allant du 20/01/06 au 01/02/06.

On observe qu'à de telles profondeurs, les pluies successives ne se traduisent plus par des pics d'augmentation de teneur en eau simultanés. Par contre, l'accumulation des précipitations provoque une augmentation régulière et continue des intensités mesurées, cette augmentation étant la plus sensible et la plus précoce pour le capteur situé à 2,5 m de profondeur, c'est-à-dire le moins profond des 4 représentés sur le graphique.

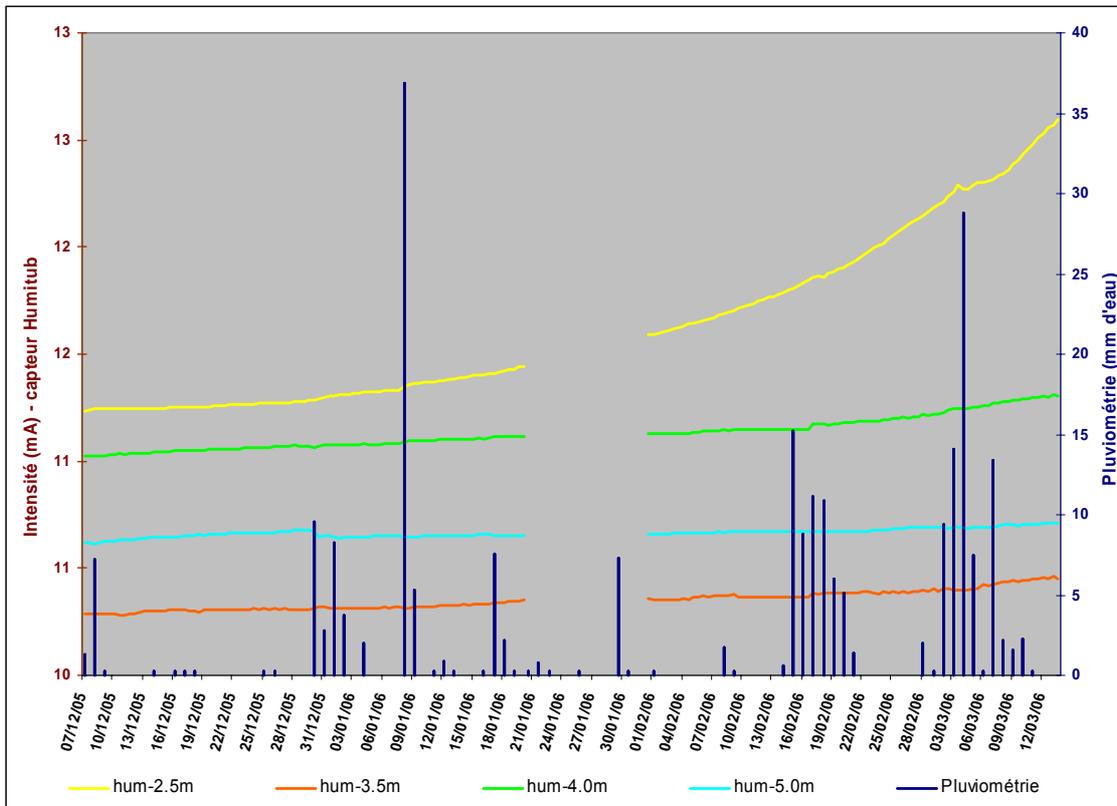


Illustration 114 - Pluviométrie et humidité à 2,5, 3,5, 4 et 5 m de profondeur en forêt - site du Deffend

Le fait que les intensités mesurées sur le capteur Humitub situé à 3,5 m de profondeur soient inférieures à celles mesurées sur les capteurs à 4 et 5 m de profondeur peut s'expliquer par le fait que les horizons géologiques correspondants présentent des caractéristiques lithologiques différentes, attribuées soit à des variations latérales de faciès (puisque tous les capteurs ne sont pas installés sur la même canne) soit à une évolution des faciès le long du profil vertical, ce qui a été effectivement observé en sondage.

8. Éléments de modélisation

8.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Au cours de cette première phase de l'étude, l'objectif principal était de sélectionner les deux sites expérimentaux prévus, d'y d'installer le système d'instrumentation et de procéder à l'acquisition et à une amorce d'interprétation des premières données recueillies. Ce travail d'interprétation, qui sera prolongé lors des phases ultérieures de l'étude sur la base de séries plus longues de données factuelles, suppose le calage de modèles numériques capables de rendre compte de l'évolution des teneurs en eau mesurées dans le sol en fonction des caractéristiques du site et de l'évolution des données climatiques locales. Une fois un tel modèle calé à partir des observations de terrain, il pourra servir à des extrapolations sur la base d'une étude paramétrique, afin de mettre en évidence le poids respectif des différents facteurs intervenant dans le retrait-gonflement des sols argileux. Dans un premier temps, ce travail de modélisation a été uniquement appliqué au site de Mormoiron qui a été le premier équipé.

Il n'est pas envisageable, dans le cadre de la présente étude, de développer un logiciel spécifique pour la modélisation des transferts hydriques dans le sol des sites instrumentés. L'objectif recherché est donc plutôt de passer en revue les outils existants et d'adapter des modèles déjà utilisés pour des problématiques similaires.

8.2. MODELISATION ET PARAMETRISATIONS

8.2.1. Généralités

Les théories classiques concernant les écoulements en milieu poreux saturé reposent sur la loi de Darcy. Cette relation, établie expérimentalement, exprime la proportionnalité entre le flux d'eau, la vitesse de l'infiltration traversant une colonne et l'opposé du gradient de charge hydraulique. Bien que conçue à l'origine pour les écoulements en milieux saturés, elle fut étendue aux écoulements en zone non saturée (Richards, 1931). Cette extension de la loi de Darcy, généralement appelée équation de Richards, est une équation différentielle partielle non linéaire qui permet de décrire en fonction du temps la variation de la teneur en eau volumique d'un sol à partir de paramètres tels que la conductivité hydraulique et la profondeur.

L'équation de Richards est très utilisée mais la théorie présente des faiblesses dans les cas où l'eau suit des écoulements préférentiels et ne passe pas par le milieu poreux et homogène (ou du moins, considéré comme tel) qu'est la matrice du sol. Dans les sols structurés de type argileux, on assiste en effet à la coexistence d'une part d'écoulements lents dans la matrice du sol (également appelée « microporosité »), qu'il est possible de décrire de manière satisfaisante à l'aide de la théorie classique, et d'autre part d'écoulements rapides par l'intermédiaire de pores de diamètre important, de fissures et de constructions d'origine biologique (on parle alors d'écoulements préférentiels à travers la « macroporosité » du sol). Les écoulements préférentiels

interviennent lorsqu'une partie de l'eau transite dans le sol de manière privilégiée dans les pores de grand diamètre en évitant une certaine partie de la matrice (Jarvis, 2002). Ces « macropores » peuvent en particulier correspondre à des fissures résultant du retrait des sols argileux. Les écoulements préférentiels sont notamment connus pour jouer un rôle déterminant dans les processus de transfert de pesticides à travers les sols agricoles. Les premiers travaux dans ce domaine datent du début des années 1990 et se sont poursuivis de manière soutenue durant les quinze dernières années, aboutissant à l'élaboration de nombreux modèles stochastiques, empiriques ou déterministes, plus ou moins calés sur des observations menées in situ.

8.2.2. Choix du modèle

Le modèle MACRO a été choisi pour les simulations des variations d'humidité dans le sol des sites instrumentés parce qu'il s'agit un des meilleurs modèles actuels de description des écoulements préférentiels (Armstrong, 2000). C'est un modèle déterministe, c'est-à-dire qu'il utilise des équations physiques ou des schémas de fonctionnement conceptuels pour modéliser les transferts d'eau. Comme tous les modèles déterministes, MACRO a besoin d'un nombre important de données d'entrée pour réaliser des simulations. Ces données sont de nature climatique et pédologique.

Le modèle MACRO est un modèle 1D décrivant le transport de l'eau et des solutés en régime transitoire dans des milieux stratifiés. Ce modèle a d'abord été mis au point par Jarvis (1994) et il a connu certaines améliorations (Larsbo et Jarvis, 2003). L'écoulement préférentiel dans MACRO (Jarvis et al., 1991 ; Larsbo et Jarvis, 2003) est basé sur deux domaines : les micropores et les macropores. Dans les micropores, la rétention de l'eau est décrite par l'utilisation de l'équation de Van Genuchten (Van Genuchten, 1980) et la conductivité est simulée par le modèle de Mualem (Mualem, 1976). Dans les macropores, l'écoulement est décrit en utilisant une fonction de dynamique des fluides dépendant de la gravité (Kohler et al., 2001). La conductivité hydraulique dans les macropores est fonction du taux d'humidité pour cette catégorie de pores. Les transferts d'eau entre les macropores et les micropores sont décrits par une approximation de l'équation de diffusion de l'eau. Quand les micropores sont saturés, une équation est prévue pour le passage de l'eau excédentaire vers les macropores.

Le modèle MACRO à double perméabilité est le modèle d'écoulement préférentiel le plus abouti et qui a bénéficié du plus grand programme d'évaluation en laboratoire et au champ (notamment Jarvis et al., 1995 ; Jarvis et al., 2000). Le modèle est par ailleurs utilisé par de nombreux pays de l'Union Européenne pour l'évaluation des risques de contamination des ressources en eau liés aux produits phytosanitaires.

En règle générale, le modèle prédit de façon correcte le temps et le volume des percolations/drainage. Le modèle est toutefois connu pour être difficile à paramétrer car il nécessite la calibration préalable d'un certain nombre de paramètres. Les analyses de sensibilités et d'incertitudes réalisées sur ce modèle ont cependant montré que les volumes des écoulements étaient de manière générale peu affectés par les changements des valeurs des paramètres d'entrée (Dubus et Brown, 2002).

8.2.3. Données climatiques

Les données climatiques utilisées pour le site de Mormoiron sont celles enregistrées à la station de Carpentras par Météo-France, en continu depuis 1964 (Illustration 115).

An	Janv.	Fevr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Cumul	% moy.
1964	7	29	142	26	91	63	16	115	88	91	43	56	767	119%
1965	37	9	74	5	14	46	69	132	116	29	34	46	609	94%
1966	26	72	1	66	50	8	48	27	29	174	61	23	586	91%
1967	24	34	25	11	27	53	3	17	16	17	68	22	318	49%
1968	5	87	15	47	91	53	2	100	146	85	122	52	806	125%
1969	52	31	80	20	63	88	35	42	95	35	49	28	618	96%
1970	26	29	62	34	49	82	16	38	28	94	50	79	587	91%
1971	72	6	59	108	110	72	18	28	22	50	81	47	672	104%
1972	60	170	47	49	53	83	33	41	66	153	31	86	872	135%
1973	49	18	32	43	13	66	70	38	51	106	17	31	534	83%
1974	48	105	79	85	47	42	6	16	166	14	45	12	667	103%
1975	31	45	72	34	111	30	16	80	128	13	82	94	737	114%
1976	13	22	50	40	47	2	22	22	75	186	77	21	580	90%
1977	61	51	64	52	133	77	95	68	3	162	37	60	863	134%
1978	71	87	42	107	89	29	24	14	38	4	2	39	546	84%
1979	83	50	85	22	20	17	26	15	21	269	18	73	697	108%
1980	26	2	53	65	66	39	25	34	51	71	61	10	503	78%
1981	25	9	57	40	66	36	24	3	103	36	2	110	511	79%
1982	13	21	32	30	20	28	78	35	66	60	184	46	616	95%
1983	0	83	54	46	69	39	0	100	38	86	15	35	566	88%
1984	63	59	40	9	108	59	8	48	35	84	55	76	645	100%
1985	28	27	135	14	100	35	5	110	0	35	28	63	582	90%
1986	89	52	14	174	33	30	0	132	57	61	30	44	715	111%
1987	43	61	41	58	40	61	95	110	32	193	48	51	833	129%
1988	39	24	45	96	108	43	16	56	43	134	20	12	637	99%
1989	11	39	20	98	6	22	5	7	34	27	41	20	329	51%
1990	14	20	14	58	63	18	5	75	41	140	15	62	523	81%
1991	22	35	77	24	20	23	49	54	122	145	38	7	616	95%
1992	25	27	58	14	49	143	41	69	238	102	41	25	832	129%
1993	0	16	17	179	77	38	16	51	250	89	62	18	812	126%
1994	98	102	19	63	56	17	13	51	209	127	95	7	857	133%
1995	31	41	21	119	61	1	25	46	92	68	89	92	686	106%
1996	107	40	55	38	40	58	68	53	70	57	152	53	792	123%
1997	98	2	1	17	33	80	44	65	24	71	63	38	535	83%
1998	47	12	3	103	46	25	14	24	107	36	18	22	457	71%
1999	67	3	74	42	41	59	12	48	98	143	72	28	687	106%
2000	8	12	48	110	49	68	37	18	121	169	113	50	803	124%
2001	45	57	93	32	107	8	39	4	57	95	6	5	546	85%
2002	23	62	40	14	116	39	34	59	276	64	222	48	997	154%
2003	58	24	22	59	19	4	14	5	120	49	105	155	633	98%
2004	25	25	10	46	40	2	2	130	13	114	20	24	452	70%
2005	6	1	23	129	39	30	7	12	99	84	38	40	508	79%
Moy. Mois	40	41	48	58	59	43	28	52	83	91	58	45	646	

Illustration 115 - Précipitations mensuelles et annuelles sur Carpentras entre 1964 et 2005

Le modèle nécessite les températures moyennes ainsi que les chroniques de pluie et d'évapotranspiration du site. Le pas de temps journalier a été retenu pour l'ensemble de la simulation MACRO parce qu'il est le plus facilement accessible pour ces trois types de données. La station de Carpentras a été supposée représentative du site de Mormoiron, au moins en première approximation. En plus de sa proximité géographique avec le site étudié (9 km), elle présente l'avantage d'être en activité depuis une assez longue période. Les simulations des taux d'humidité ont donc été réalisées au pas de temps journalier entre le 01/01/1964 (date d'acquisition des premières données validées) et le 31/12/2005 (date des dernières données transmises à ce jour par Météo-France), soit une durée de 42 ans.

8.2.4. Caractéristiques du sol

Le 16 novembre 2005, une fosse pédologique a été ouverte sur le site expérimental de Mormoiron (Fos 3) dans le but de préciser certains paramètres nécessaires pour la modélisation MACRO. L'ouverture de cette fosse a permis de déterminer les épaisseurs et la composition des horizons supérieurs. La série de reconnaissances géologiques déjà réalisée sur le site avant et au cours de la mise en place des instruments (décembre 2004) n'avait pas permis de rendre compte des particularités des horizons les plus superficiels (de 0 à 1 m). L'amplitude et les cinétiques des phénomènes de séchage/humidification étant très importantes à la surface, une bonne connaissance de cette partie de la zone non-saturée était nécessaire.

Lors de l'ouverture de la fosse, trois horizons différents ont été décrits, comme détaillé plus haut. Un échantillon de sol a été prélevé à peu près au centre de chacun de ces trois horizons. Des analyses granulométriques et des mesures d'humidité ont été réalisées sur ces échantillons (Illustration 116). Les mesures des taux d'humidité pourront servir pour valider le modèle.

	Profondeur (cm)	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)	Humidité (%)*
Horizon 1	0-10	43,7	33,4	13,8	49,9
Horizon 2	10-45	47,3	35,8	16,0	30,0
Horizon 3	45-90	52,7	31,4	14,9	31,1

*g eau/ g sol sec (échantillons prélevés le 16 novembre 2005)

Illustration 116 – Résultats des analyses granulométriques et des mesures de teneur en eau sur des échantillons prélevés dans la fosse pédologique.

Les résultats de ces analyses granulométriques ont été saisis comme valeurs d'entrée dans le modèle Rosetta (Schaap et Lej, 1998 ; Schaap et al., 2001) pour obtenir les paramètres θ_s , θ_r , a et n de l'équation de Van Genuchten (Van Genuchten, 1980). Ces

paramètres ont permis de tracer des courbes de rétention pour chaque horizon (Illustration 117).

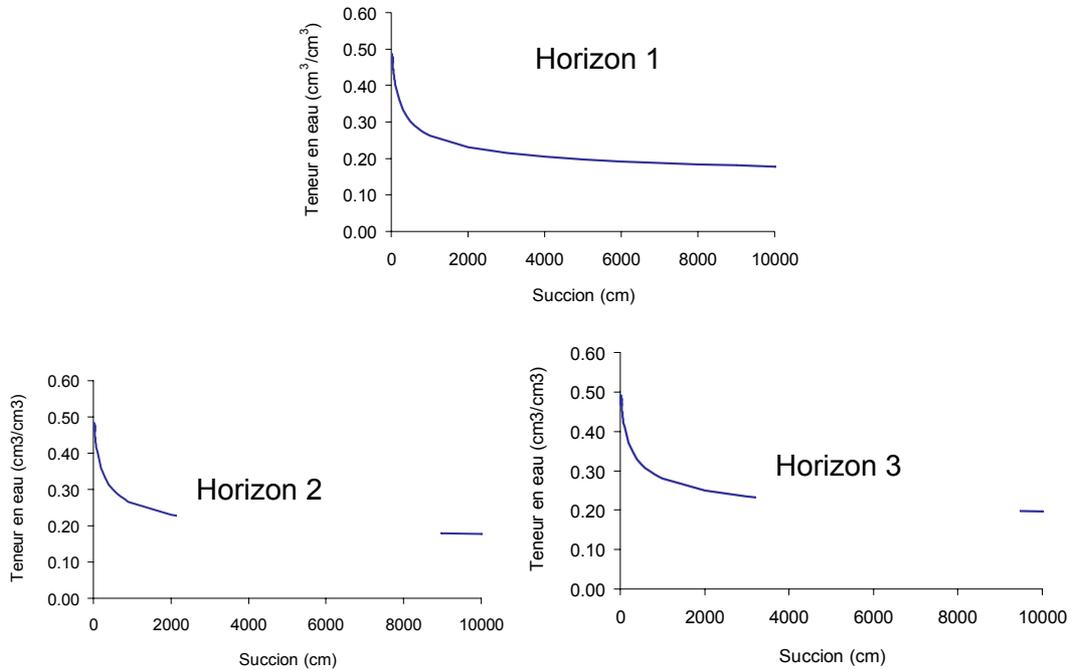


Illustration 117 - Courbes de rétention des trois horizons réalisées avec les paramètres de la courbe de Van Genuchten obtenus grâce au programme Rosetta.

La paramétrisation du modèle MACRO nécessite l'attribution de valeurs à de nombreux paramètres qui sont corrélés. La description des transferts d'eau se base sur la définition de deux domaines d'écoulement, les micropores et les macropores. La limite entre ces deux domaines est définie par trois paramètres hydrologiques (CTEN, KSM, XMPOR). La plupart de ces paramètres d'entrée sont reliés entre eux par la courbe de rétention et la courbe de conductivité hydraulique (Illustration 118).

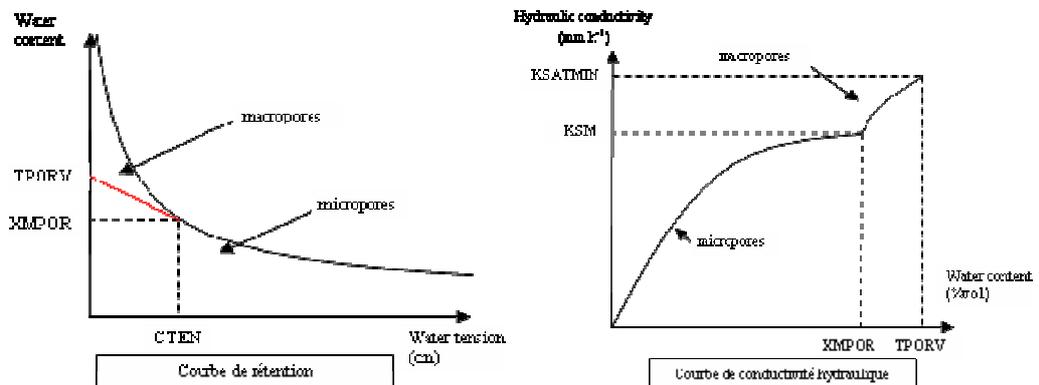


Illustration 118 - La courbe de rétention et la courbe de conductivité hydraulique montrent les interactions entre les différentes variables du modèle

CTEN étant un paramètre difficilement calculable par des fonctions de pédotransfert, la valeur utilisée comme paramètre d'entrée dans le modèle a été choisie par jugement d'expert. Les valeurs de la plupart des autres paramètres ont pu être déterminées à partir de la valeur de CTEN et de la courbe de rétention. L'opération a été répétée pour chaque horizon. Pour les paramètres qui ne sont pas reliés à la courbe de rétention, comme TPORV (la porosité totale) par exemple, des relations de pédotransfert ont été utilisées.

Chaque horizon identifié lors de la description du profil pédologique a été séparé en plusieurs couches, partageant les mêmes caractéristiques, pour les besoins de la modélisation. Les profondeurs des premiers horizons ont été déterminées grâce à l'observation sur la base du profil pédologique réalisé (Illustration 119). La profondeur du troisième horizon n'étant pas observable dans la fosse, une profondeur maximale de 4,15 m a été choisie car cette profondeur représente la limite entre les argiles vertes plastiques et les argiles vertes compactes telle que définie lors du sondage carotté. La simulation n'a pas été réalisée pour les profondeurs au-delà de 4,15 m, car les différences d'humidité à ces profondeurs sont généralement limitées.

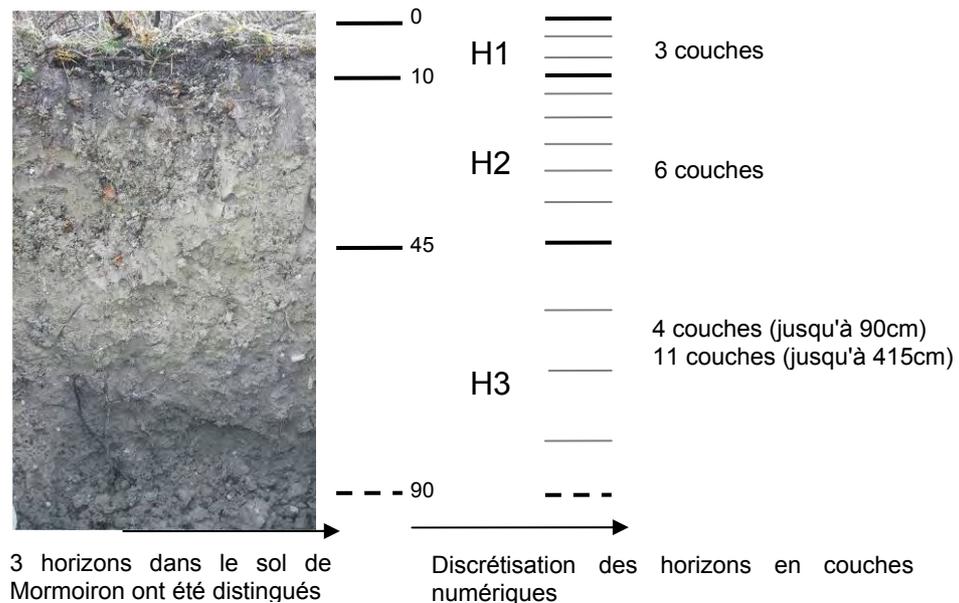


Illustration 119 - Découpage du profil pédologique en couches numériques

8.2.5. Paramètres du couvert végétal

Le couvert végétal utilisé pour les simulations est un couvert végétal herbeux d'une dizaine de centimètres de hauteur. Cette hypothèse a été choisie par défaut sur la base de valeurs fournies par le groupe de travail européen FOCUS (FOCUS, 2000). Elle ne correspondant pas à la réalité puisque la couverture végétale observée sur le site lors de l'installation fin 2004 est plutôt constituée de buissons et arbustes de taille moyenne 1 m à 1,50 m.

8.2.6. Automatisation des tâches de modélisation

Compte tenu de la complexité des extractions, une automatisation des tâches de modélisation a été réalisée. La première étape a consisté à automatiser l'extraction des données du fichier de résultats. MACRO fournit les résultats sous la forme d'un fichier binaire (.bin = Binary File). L'extraction se fait à l'aide du programme PG.exe fourni avec MACRO. Ce programme transforme pour chaque variable sélectionnée les résultats sous la forme d'un fichier de donnée (.dat = Data file). Ce programme étant de conception relativement ancienne, il est assez long à manipuler pour chaque variable. Un programme exécutable (.bat = Batch Processing) a été écrit pour transformer les résultats de MACRO en un fichier de données lisible par la plupart des programmes de traitement de données. Cette commande d'extraction a été programmée pour se réaliser automatiquement juste après la fin d'une simulation sans intervention de l'utilisateur.

Une seconde commande d'extraction a été programmée en VISUAL BASIC sous Excel pour charger la totalité des fichiers de données dans un fichier Excel unique. Cette commande effectue directement la transformation depuis les couches numériques du modèle vers les horizons physiques en prenant en compte la pondération due aux différentes profondeurs de couches. Le fichier a aussi été formaté pour présenter directement sous forme de graphique l'ensemble des résultats obtenus.

8.3. RESULTATS

8.3.1. Etude du bilan hydrique

L'illustration 120 présente, sur le même graphique et avec une échelle unique, les précipitations et l'évapotranspiration potentielle (ETP) fournies par Météo-France, ainsi que l'évapotranspiration réelle (ETR) simulée par le modèle (avec les caractéristiques du sol et du couvert végétal indiquées plus haut). Ces données sont représentées au pas de temps mensuel pour l'ensemble de la période s'étendant du 1^{er} janvier 1988 au 31 décembre 2005 (choisie car c'est la période au cours de laquelle existent des données quant à la sinistralité liée au phénomène de retrait-gonflement des argiles). Conformément à la théorie, l'évaporation réelle est très sensiblement inférieure à l'évapotranspiration potentielle. Pendant les mois d'hiver (novembre à février en fait), l'ETR correspond en moyenne à 94 % de l'ETP, mais ce pourcentage diminue très nettement le reste de l'année pour atteindre un minimum en été (avec 17 % en juillet et 27 % en août). L'ETR est en moyenne supérieure aux précipitations de mars à août (période de croissance végétale et de pluviosité réduite) et inférieure le reste de l'année.

Le graphique suivant (Illustration 121), présente ces mêmes valeurs sous forme de moyennes mensuelles calculées sur cette même période 1988-2005. On constate ainsi que le bilan hydrique annuel (P-ETR) est globalement positif, avec un excédent moyen (sur cette période de 18 années) de 65 mm par an (le cumul annuel de l'ETR calculée s'élevant à 585 mm pour un cumul annuel de précipitation de 650 mm sur cette période). De surcroît, sur ce graphique ont été distinguées la part de l'évapotranspiration due à la seule évaporation (au niveau du sol et des feuilles) et celle attribuée à la transpiration des végétaux, issues de la simulation numérique.

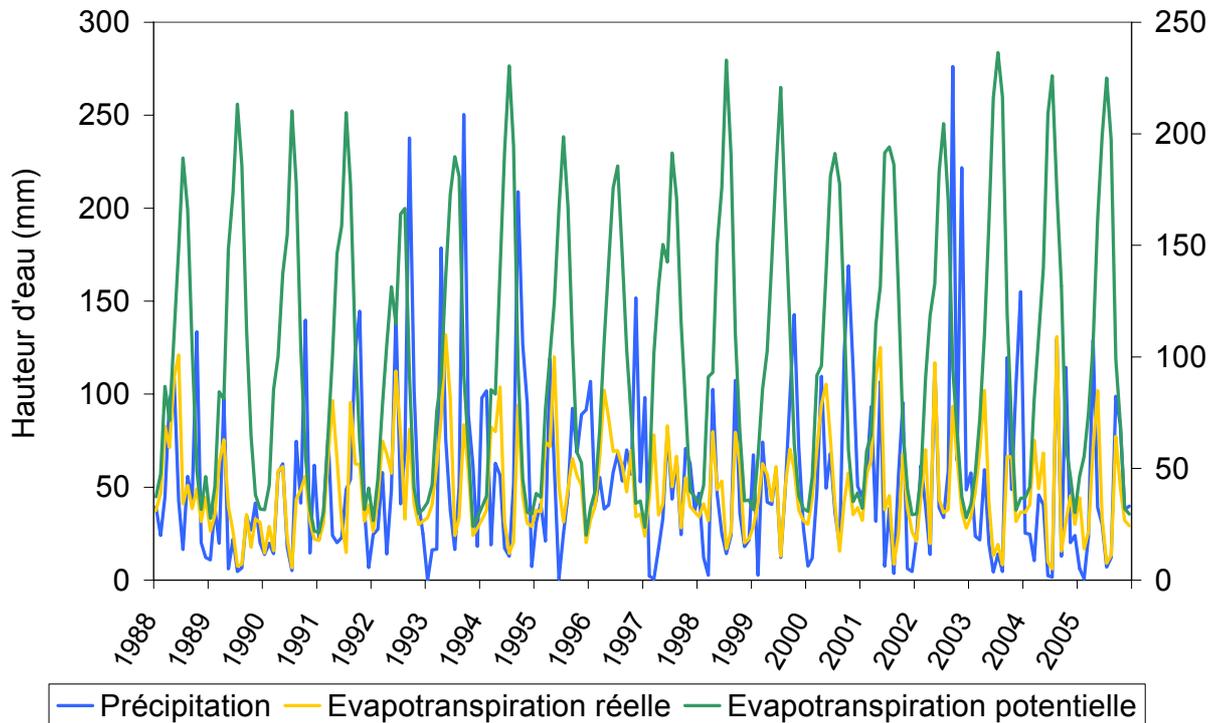


Illustration 120 - Précipitations, évapotranspiration potentielle et évapotranspiration réelle (simulée pour une pelouse) à Mormoiron entre 1988 et 2005 (au pas de temps mensuel)

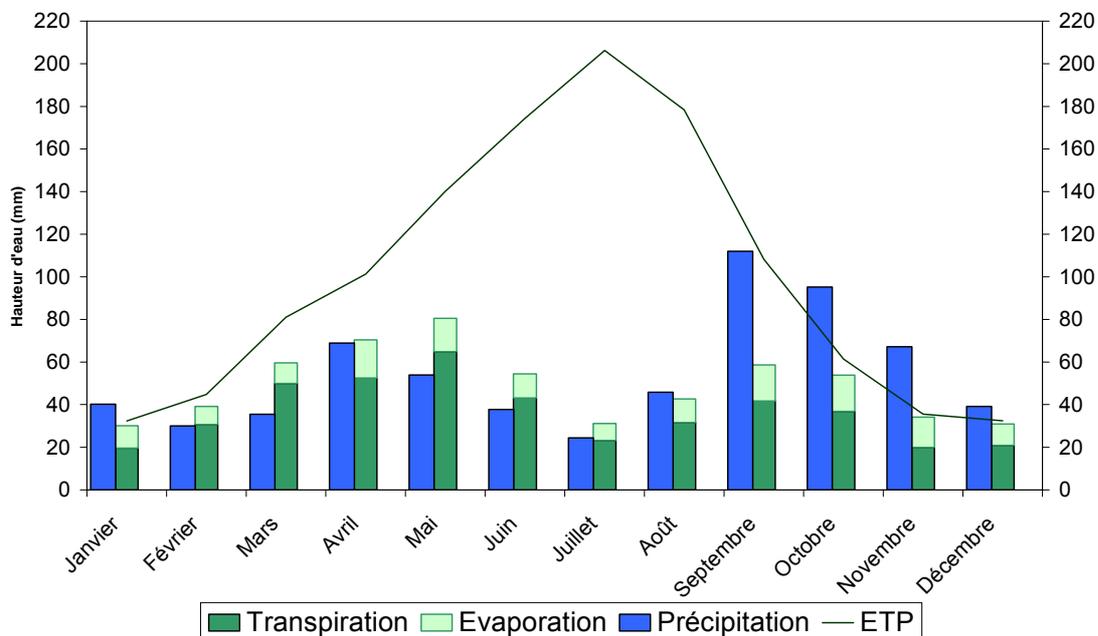


Illustration 121 - Part de l'évaporation et de la transpiration dans l'évaporation réelle face aux précipitations sur le site de Mormoiron de 1988 à 2005 (données moyennées)

Moyennant les hypothèses retenues à ce stade concernant la nature du couvert végétal (couverture herbacée rase), l'évaporation au niveau du sol est la principale constituante (74 % de l'ETR en moyenne) de l'évapotranspiration tout au long de l'année. Il est à noter que toute végétation ayant un pouvoir d'extraction d'eau supérieur à une simple pelouse rase entraînera un bilan hydrique moyen négatif. Le ruissellement n'est pas pris en compte à ce stade de l'étude.

Si l'on représente l'évolution du bilan hydrique annuel (P-ETR) sur l'ensemble de la période étudiée (1988-2005), on vérifie que les précipitations sont en effet légèrement supérieures en moyenne à l'évapotranspiration réelle ainsi simulée, mais qu'il existe des disparités importantes d'une année à l'autre (Illustration 122). Sur cette période de 18 ans, 11 années présentent un bilan positif avec des excédents records de 256 mm en 1994 et surtout 382 mm en 2002. L'année 2003 fait partie de ces années excédentaires (avec un bilan positif de 97 mm). Inversement, 7 années présentent un bilan négatif, dont les années 1988-89 et 1997-98 reconnues pour avoir été à l'origine de nombreux sinistres attribués au retrait-gonflement des argiles. Plus récemment, des déficits significatifs (de l'ordre de 90 mm) ont été observés en 2001 et 2004.

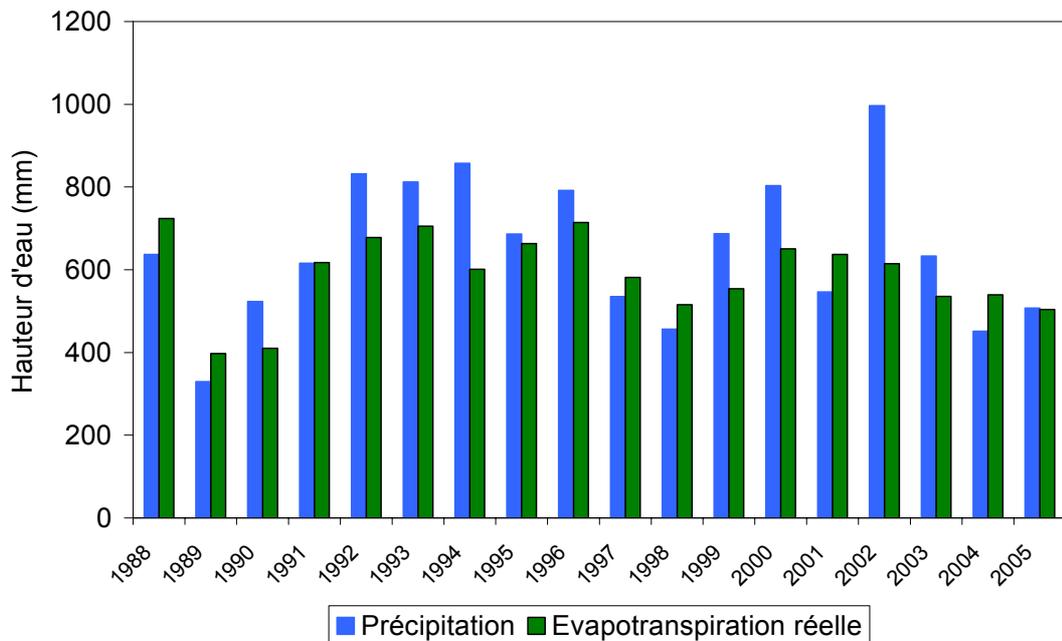


Illustration 122 - Comparaison des précipitations et des évapotranspirations réelles annuelles sur le site de Mormoiron entre 1988 et 2005.

La recharge mensuelle à une profondeur de 4,15 m (limite inférieure de la zone modélisée) varie entre 0 et 40 mm sur la période d'étude et présente une évolution très irrégulière selon les années (Illustration 123). Les cumuls annuels de percolation varient de 9 mm (valeurs minimales observées au cours des années 1991 et 1992 à l'issue d'une longue période de sécheresse cumulative) jusqu'à 253 mm en 1994 (ce qui représente près de 30 % du cumul de précipitation pour cette année-là). On observe notamment que la recharge ainsi modélisée a été quasiment inexistante pendant cinq années successives (entre 1988 et 1993), puis très importante en 1994 et

1995 avant de redescendre à des niveaux très bas à partir de 1996 et surtout 1998. Le début de l'année 2001 a été caractérisé par une nouvelle recharge des couches profondes qui s'est amoindrie progressivement jusqu'en fin 2002, marqué par un nouvel épisode de forte recharge. L'été 2003 se place entre deux épisodes de forte percolation, si bien que la recharge simulée à 4,15 m de profondeur reste de l'ordre de 8 mm par mois en fin d'été 2003. Pour l'ensemble de l'année 2003, les niveaux élevés de percolation atteints en début et en fin d'année (20 à 30 mm par mois jusqu'en avril et à nouveau 20 mm en décembre) expliquent le cumul annuel très élevé de percolation enregistré au cours de cette année (192 mm, soit également 30 % du cumul annuel de précipitation, comme en 1994 caractérisée par une forte pluviosité). Ceci montre clairement le caractère très particulier de cette année 2003, marquée par une forte humidification des sols en profondeur au cours de l'hiver précédent, puis par une intense sécheresse estivale et à nouveau par une rapide réhumectation profonde des sols en fin d'automne. En comparaison, la recharge hivernale survenue début 2004 est plus modeste et très brève, suivi d'une décroissance régulière qui se prolonge au moins jusqu'à fin 2005, avec des niveaux de recharge mensuelle inférieurs à 2 mm depuis octobre 2005.

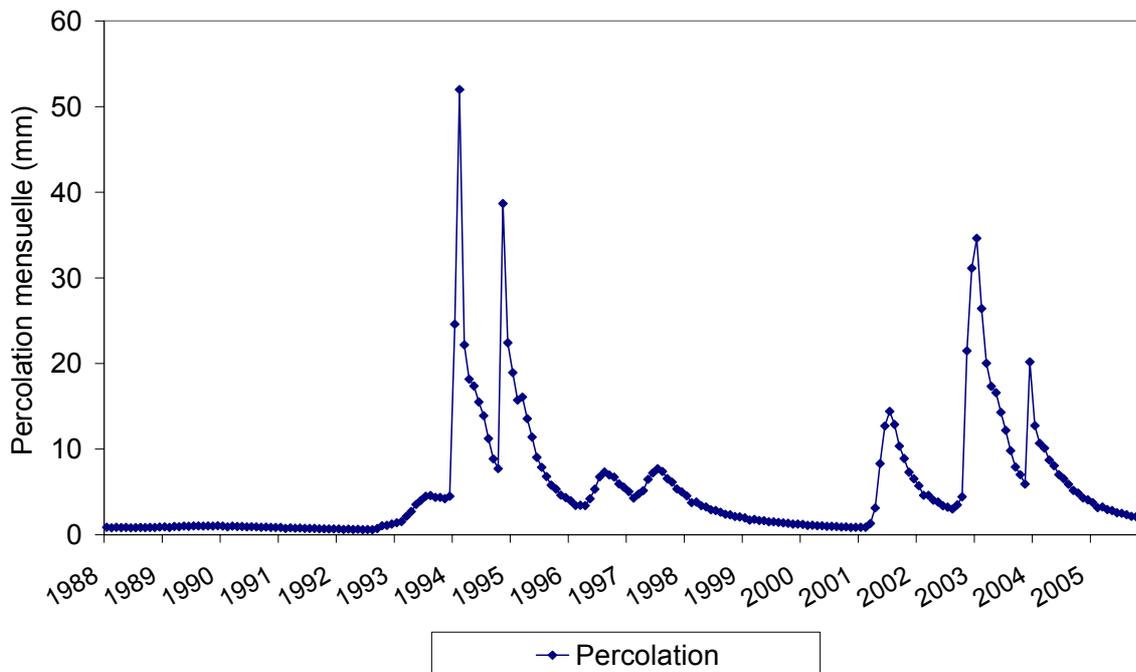


Illustration 123 - Recharge à 4,15m simulée par MACRO

8.3.2. Variations des teneurs en eau

Le modèle MACRO a permis de calculer les variations d'humidité pour chacun des quatre horizons étudiés (Illustration 124). Les horizons superficiels (0-10 cm) sont très sensibles aux variations d'humidité et de température en surface tandis que les variations des horizons plus profonds (120-415 cm) sont plus faibles.

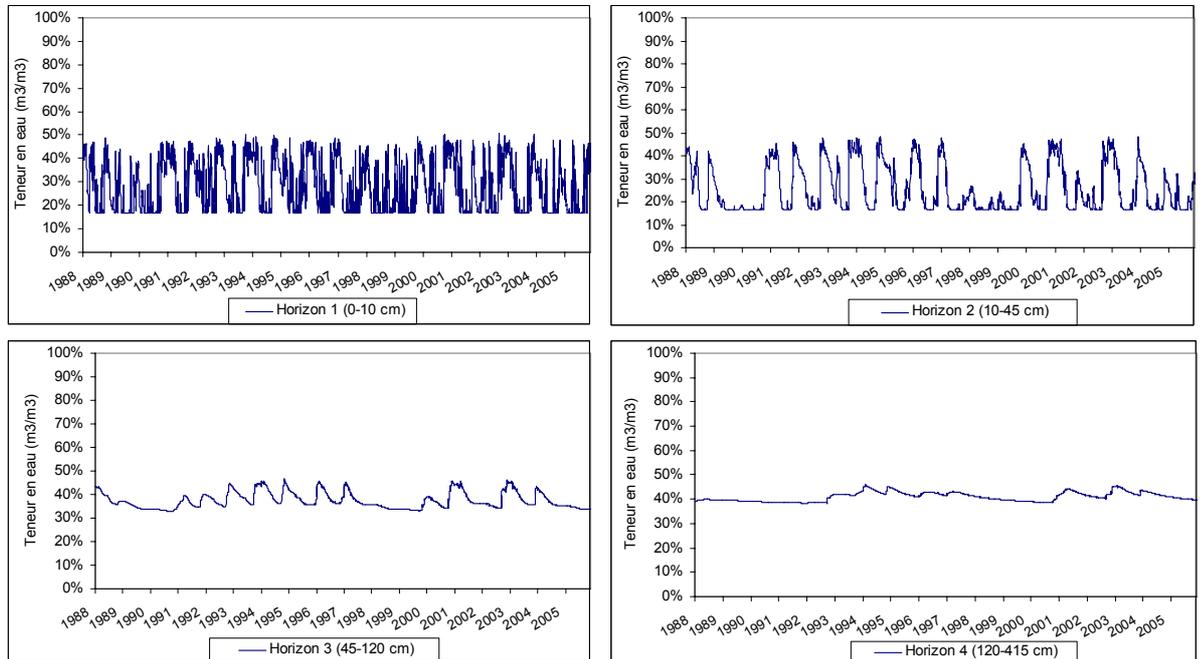


Illustration 124 - Évolution du taux d'humidité dans les quatre horizons simulés à l'aide de MACRO entre 1988 et 2005

Grâce au logiciel SURFER 8 (Golden Software, Inc, 2002), l'évolution continue de l'humidité dans les différents horizons a pu être transcrite sous forme graphique sur la totalité de la période 1964-2005 pour laquelle les données météorologiques étaient disponibles. L'ensemble des dates, profondeurs et taux d'humidité calculés par MACRO a servi de maille au programme. SURFER a ensuite extrapolé les valeurs manquantes entre les mailles grâce à la méthode des voisins immédiats (« nearest neighbour »). Les chroniques de pluies ont été ajoutées au-dessus des graphiques de sortie de SURFER pour mieux visualiser l'influence des pluies sur l'humidité des différents horizons (Illustration 125).

Un zoom sur la période d'étude 1988-2005, plus directement utile pour examiner l'impact du phénomène de retrait-gonflement des argiles, a ensuite été réalisé afin de mieux visualiser l'évolution des teneurs en eau simulées du sol de Mormoiron au cours de cette période (Illustration 126). Cette dernière simulation met clairement en évidence la période sèche des années 1988-92 et celle des années 1997-99. La première de ces deux périodes est marquée par un assèchement significatif du sol jusqu'à une profondeur de 2,50 à 3 m avec absence totale de recharge hivernale au moins jusqu'à fin 1991 et effet cumulatif manifeste jusqu'à cette date. La seconde période se caractérise également par l'absence de recharge entre l'été 1997 et l'automne 1999 avec un effet cumulatif qui se prolonge en profondeur jusqu'à l'été 2000, même si le sol de surface a été réhumidifié dès l'automne 1999. Entre ces deux périodes, les phénomènes de recharge hivernale forte parvenant à resaturer l'ensemble du profil de sol se sont produits de manière régulière.

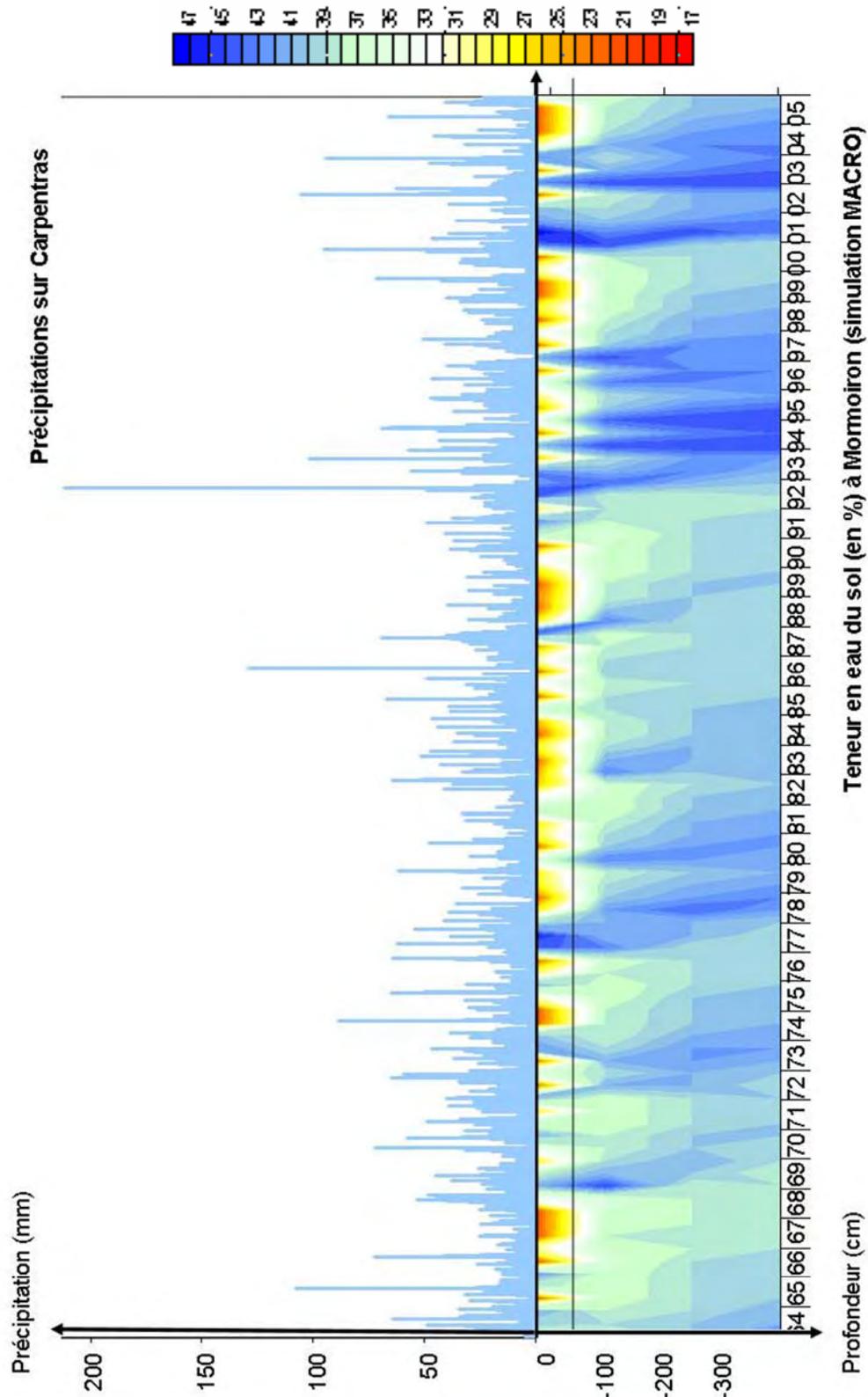


Illustration 125 - Visualisation graphique des teneurs en eau du sol de Mormoiron simulées par MACRO entre le 01/01/64 et le 31/12/2005, en regard de la pluviosité mesurée à Carpentras

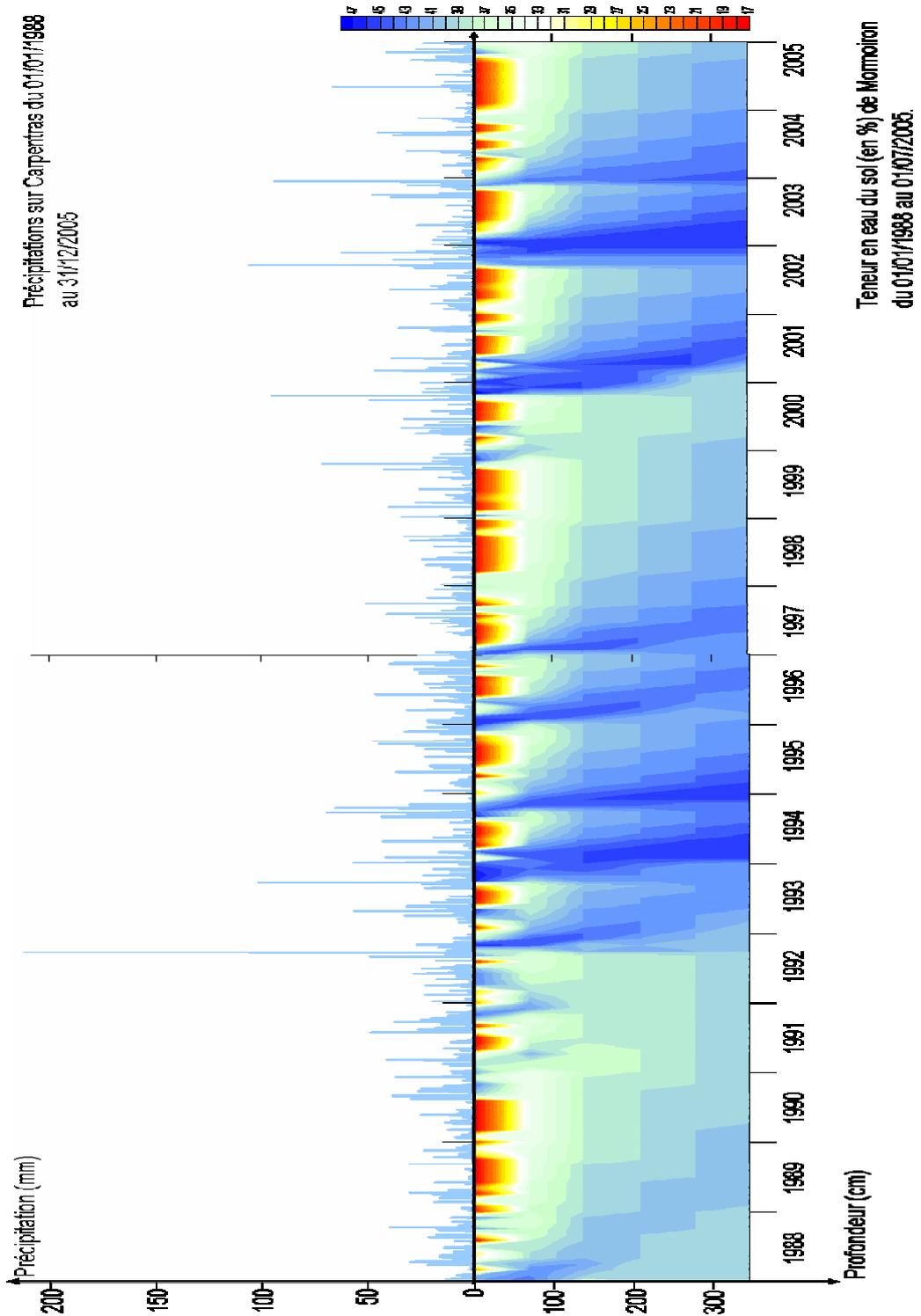


Illustration 126 - Visualisation graphique des précipitations et des teneurs en eau (simulées) du sol de Mormoiron entre le 01/01/88 et le 31/12/2005

Un zoom encore plus détaillé a été réalisé sur l'année 2003 puisque celle-ci a été à l'origine de nombreux sinistres par retrait-gonflement sur l'ensemble du territoire national (mais pas de manière particulièrement marquée dans la région de Mormoiron). Ces résultats sont présentés sur le graphe ci-dessous (Illustration 127) pour la période allant du 1^{er} juillet 2002 au 31 décembre 2004 (qui correspond sensiblement à la date de mise en place du matériel d'instrumentation).

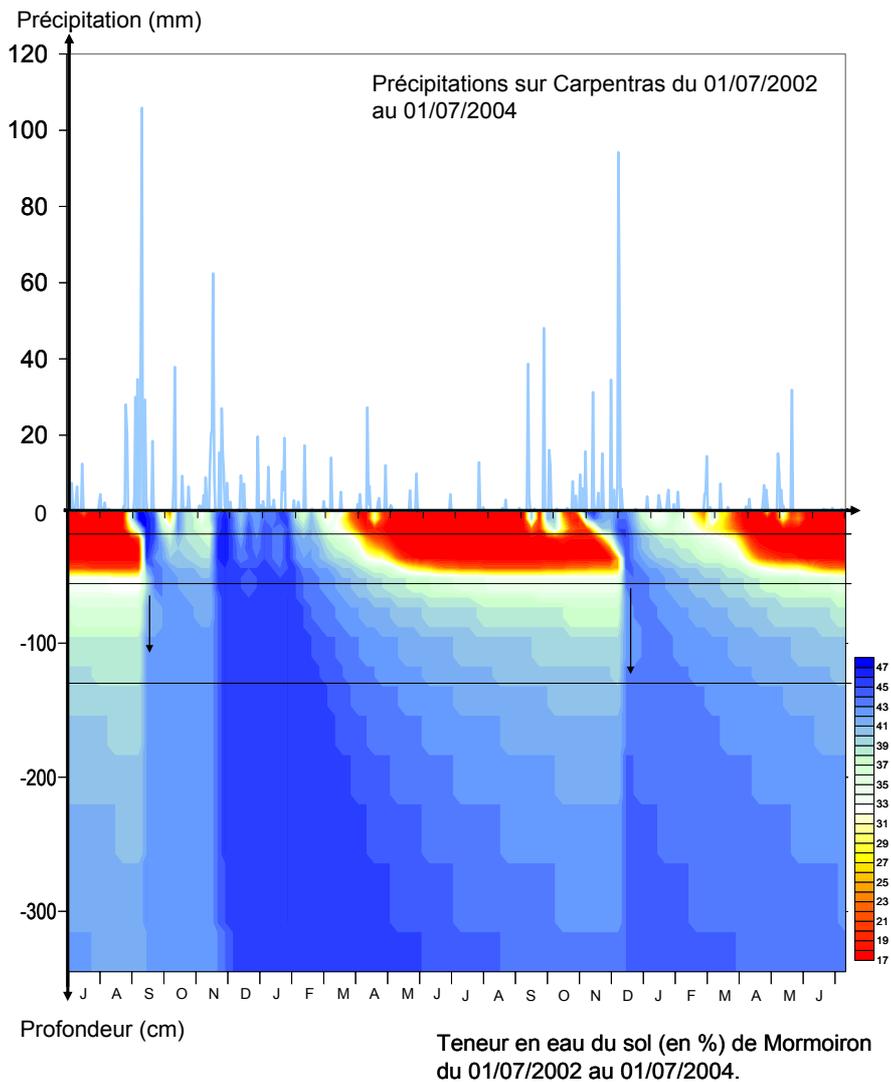


Illustration 127 - Visualisation graphique des précipitations et des teneurs en eau (simulées) du sol de Mormoiron entre le 01/07/2002 et le 01/07/2004. Les flèches noires indiquent une forte influence des phénomènes d'écoulements préférentiels sur les transferts d'eau dans le sol.

Après une année 2002 relativement sèche (avec absence de recharge durant l'hiver 2001-02), les sols se sont resaturés sur l'ensemble du profil dès la fin du mois de novembre 2002 et la dessiccation n'a débuté en surface qu'à partir du mois de février 2003 pour se propager progressivement jusqu'en novembre 2003, date à laquelle le

sol s'est de nouveau humidifié de manière rapide et sur toute sa hauteur. La durée relativement courte de la période sèche n'a pas permis (du moins avec les hypothèses retenues, notamment pour la nature du couvert végétal) d'assister à une propagation très profonde de la dessiccation.

Au delà de ces particularités annuelles, ces premières simulations numériques permettent de mettre en évidence quelques caractéristiques de la propagation de la sécheresse dans un sol argileux sous climat méditerranéen. Les horizons superficiels se dessèchent très vite en période estivale pour atteindre le point de flétrissement (zone rouge). Cet effet est particulièrement visible entre mars et novembre 2003. Les résultats montrent que l'humidité baisse très rapidement dans ces horizons, le dessèchement se poursuivant jusqu'à une profondeur maximale d'une cinquantaine de centimètres. L'humidité du premier horizon est généralement inférieure à 20 %. Ceci est peut-être dû à l'action du couvert végétal herbacé retenu pour les simulations, dont l'action des racines ne peut atteindre que cinquante centimètres. L'effet d'un couvert végétal arbustif ou arboré avec un enracinement plus profond sera testé lors du second semestre 2006 et permettra d'affiner ces calculs.

Les zones plus profondes s'assèchent moins vite et la variation d'humidité des horizons inférieurs est nettement moins importante, même en cas d'effet cumulatif avec approfondissement du front de dessiccation sur plusieurs années successives. Au-delà de un mètre de profondeur, l'humidité ne descend pas en dessous de 31%.

L'action des orages d'été, même de forte intensité, n'a qu'une influence très limitée et qui ne concerne que les premiers horizons mais ceux-ci s'assèchent très vite dès la fin des précipitations. Ces orages n'ont quasiment aucune incidence sur l'humidité des horizons inférieurs. Il faut généralement attendre la mi-septembre et souvent même octobre ou novembre pour assister à une véritable réhumidification du sol en profondeur, sachant que cette réhumidification ne se fait pas de manière systématique. Ainsi, sans même remonter aux périodes de sécheresse avérée des années 1988-91 et 1997-99, les simulations effectuées jusqu'à présent laissent présager une absence totale de réhumidification au cours de l'hiver 2004-2005, ce qui pourra sans doute être affiné en fonction des mesures expérimentales réalisées à cette époque, lorsque ces données seront mieux calées sur la base d'une durée d'observation plus longue.

On note au passage que l'utilisation du modèle MACRO se révèle judicieuse car des écoulements préférentiels ont bien été mis en évidence à plusieurs reprises lors de l'analyse des résultats (flèches noires sur l'illustration 127, indiquant clairement une propagation rapide de l'eau interstitielle vers les horizons profonds alors qu'il subsiste des parties plus sèches dans les horizons intermédiaires). Ces écoulements préférentiels se manifestent principalement lors des périodes de fortes précipitations.

8.4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'utilisation de MACRO a permis de simuler l'évolution des taux d'humidité jusqu'à une profondeur de 4,15 m. Cette utilisation se justifie par la capacité de MACRO à prendre en compte les écoulements préférentiels, phénomènes connus pour être importants dans les sols argileux. Les résultats obtenus paraissent cohérents à ce stade. Les

années marquées par une forte sinistralité imputée au phénomène de retrait-gonflement des argiles (1989-91 et 1997-99) apparaissent effectivement comme caractérisées par des phénomènes cumulatifs de sécheresse inter-annuelle marquées par une dessiccation du sol en profondeur.

Ces simulations ne permettent cependant pas à elles seules à expliquer l'effet d'une année comme 2003 caractérisée par une période de sécheresse intense (avec forte évapotranspiration liée aux très fortes chaleurs estivales) mais précédée d'un hiver particulièrement pluvieux. D'autres voies sont encore à explorer pour tenter d'expliquer ce type de situation. La première concerne la prise en compte de l'action des arbres qui contribuent fortement à la dessiccation des sols dans ce type de situation climatique extrême comme le montrent les observations de l'INRA détaillées plus haut (Bréda et al., 2004) et dont l'impact dans les simulations numériques est en cours d'exploitation. La seconde a trait à l'évaluation des mouvements du sol induits par ces variations de leur état hydrique. Les premiers éléments d'observation effectués sur le site du Deffend, dans le cadre d'un autre projet de recherche mené en parallèle, font en effet état d'un gonflement de 10 mm pendant les mois de janvier à mars 2006, suivis d'un tassement dont l'amplitude globale n'est pas encore connue puisque les mesures sont en cours d'acquisition. Ces premières observations laissent penser qu'une année comme 2003 caractérisée par une période sèche intervenant après un hiver particulièrement humide, est nécessairement marquée par une amplitude des mouvements verticaux du sol d'autant plus forte que le tassement dû au retrait s'ajoute à un gonflement préalable hivernal non négligeable.

Les résultats présentés ici ne sont qu'une étape dans la création d'un modèle de simulation du retrait-gonflement des argiles. En effet, le modèle MACRO n'est pas conçu à la base pour simuler les changements dynamiques de volume. Une autre étape de couplage doit être faite pour relier l'humidité des horizons aux déplacements physiques de l'argile.

Les résultats présentés peuvent être améliorés pour se rapprocher de la problématique initiale. Le couvert végétal utilisé dans toutes les simulations jusqu'à présent était une herbe de 10 cm. L'influence d'arbres ou d'arbustes sera simulée à l'aide du modèle MACRO dans les phases ultérieures de l'étude.

La méthodologie présentée dans ce rapport sera également appliquée au site de Deffend, près de Poitiers, second site instrumenté dans le cadre de cette étude. La simulation commencera par un recueil des données disponibles avec éventuellement visite de terrain pour précision de la structure des horizons et prise d'échantillons. Les résultats des analyses serviront à paramétrer le modèle et à le déployer sur ce second site.

9. Conclusion

La première phase de ce programme est financée à parts égales par la Sous-Direction de la Prévention des Risques Majeurs du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable et par la dotation de service public du BRGM allouée par le Ministère de la Recherche. Elle a été réalisée par le service Aménagement et Risques Naturels du BRGM avec la collaboration de son service Eau et dans le cadre de ses activités de service public.

La première phase de ce programme de recherche appliquée, initié à la demande du MEDD, avait pour objectif principal, outre un travail préalable de synthèse bibliographique sur la mesure des transferts hydriques dans le sol, d'identifier et caractériser deux sites expérimentaux permettant le suivi, sur plusieurs cycles annuels, de l'évolution des teneurs en eau en profondeur dans des sols argileux gonflants en fonction des paramètres météorologiques, puis de mettre en place le matériel d'instrumentation nécessaire et enfin de procéder à l'enregistrement et aux premières interprétations des données recueillies.

La synthèse bibliographique réalisée dans le cadre de la présente étude a d'abord permis de vérifier que le choix des capteurs capacitifs, du type des Humitubs développés par le BRGM, constituait a priori une solution technique adaptée aux conditions expérimentales envisagées, prévoyant notamment un suivi en continu, à un pas de temps réglable et pour une durée de plusieurs années, des teneurs en eau dans le sol jusqu'à plusieurs mètres de profondeur, avec enregistrement automatisé et télétransmission des mesures.

Elle a aussi permis de passer en revue un grand nombre d'approches expérimentales menées in situ, dans différents pays et dans des contextes variés, pour suivre l'évolution des teneurs en eau et/ou des déplacements du sol sous l'effet des conditions climatiques et de la végétation arborée. Ces différentes observations mettent clairement en évidence le rôle prépondérant des arbres dans la dessiccation des sols, jusqu'à des profondeurs généralement comprises entre 2,5 et 4 m (mais parfois jusqu'à 8 m) alors que la propagation de ce front de dessiccation ne dépasse pas 1 à 1,5 m sous couvert herbacé. Le rayon d'influence des arbres varie beaucoup selon les espèces mais reste généralement inférieur à leur hauteur, bien qu'il puisse atteindre une fois et demi cette hauteur. L'ordre de grandeur des mouvements verticaux de tassement et de gonflement d'un sol argileux, induits par ces variations hydriques saisonnières, est de quelques centimètres en climat tempéré, avec des gonflements pouvant atteindre 10 cm après suppression de grands arbres. Par ailleurs, l'observation montre que la présence d'arbre induit des déficits permanents d'humidité à quelques mètres de profondeur et confirme la réalité de phénomènes cumulatifs de déficits hydriques dans le sol d'une année sur l'autre.

La sélection de deux sites expérimentaux répondant aux critères fixés dans le cahier des charges de l'étude s'est avérée particulièrement ardue. La recherche d'un site en

climat méditerranéen a nécessité une phase d'investigations géologiques complémentaires qui a finalement conduit à retenir une parcelle communale à Mormoiron (Vaucluse), laquelle a pu être instrumentée à partir de décembre 2004. Le choix d'un second site en climat océanique à semi-continental s'est révélé encore plus complexe et a nécessité d'explorer de nombreuses pistes avant de retenir un terrain géré par l'Université de Poitiers, au lieu-dit Le Deffend, sur la commune de Mignaloux-Beauvoir (Vienne), lequel a pu être instrumenté début décembre 2005. Le présent rapport de première phase de l'étude s'appuie donc sur 15 mois d'observations pour le site de Mormoiron et 3 mois pour celui du Deffend.

Chacun de ces sites a fait l'objet d'une caractérisation géologique aussi complète que possible, portant sur la nature lithologique et minéralogique des horizons concernés par l'instrumentation ainsi que sur l'évolution avec la profondeur de l'état hydrique du sol au moment de la mise en place de l'instrumentation. Ce travail a été mené en partie dans le cadre de la présente étude mais devrait aussi bénéficier d'autres projets de recherche appliquée lancés en parallèle sur la même thématique et qui permettront d'affiner la caractérisation des propriétés hydro-mécaniques du matériau.

A Mormoiron, le schéma de l'installation mise en place est conforme à celui initialement prévu avec 2 cannes Humitub contenant chacune 12 capteurs de permittivité espacés de 0,5 à 1 m jusqu'à une profondeur maximale de 7 m, l'une des cannes étant placée à proximité immédiate d'un orme, l'autre étant située une trentaine de mètres en contrebas, en terrain dégagé. Les premières mesures ayant laissé plané un doute sur la qualité du contact entre les capteurs et le sol, en particulier durant les périodes de sécheresse (du fait du retrait qui affecte l'argile), la configuration mise en place sur le site du Deffend est différente. Chaque canne de mesure y est équipée d'un capteur unique placé à 20 cm de l'extrémité et la mise en œuvre a été particulièrement soignée pour assurer d'une part un bon contact entre le sol et le capteur et, d'autre part, éviter toute infiltration d'eau le long du tube. Au total, 22 capteurs ont été mis en place sur ce second site, toujours jusqu'à une profondeur de 7 m, répartis en 2 grappes, l'une en terrain herbeux dégagé, l'autre en lisière d'une zone boisée.

Les premières mesures enregistrées mettent en évidence deux limites principales à la qualité des données recueillies. La première, notée jusqu'à présent uniquement sur le site de Mormoiron et sur certains capteurs seulement, se traduit par des plages de valeurs très basses interprétées comme étant la signature d'une perte temporaire de contact entre le sol et le capteur lorsque le sol se rétracte à proximité de la canne. La seconde, visible sur les deux sites, correspond à une saturation du signal de sortie qui devient erratique lorsque la teneur en eau du sol dépasse un certain seuil (dont la valeur reste à déterminer par des expériences en laboratoire qui sont en cours).

Malgré ces limites et quelques lacunes dans l'enregistrement du fait de dysfonctionnements temporaires de l'installation, les premières mesures montrent, pour les horizons les plus superficiels, une étroite corrélation des pics d'intensité (donc de teneur en eau) avec la répartition temporelle des précipitations enregistrées sur le site (pluviomètre installé dans le cadre du projet à Mormoiron, géré par l'Université de Poitiers au Deffend), ce qui est un gage de qualité des observations. Il reste à ce stade à confirmer et préciser les courbes de corrélation établies pour chacun des sites entre

les intensités de sortie fournies par les capteurs et les teneurs en eau massiques du sol (dans cette attente, les résultats ont été présentés ici sous forme de données brutes). Néanmoins, ces premières observations permettent de mettre en évidence la propagation d'un front de réhumidification sur les deux sites, ainsi que les phases de progression de la dessiccation observées au cours de l'été 2005 à Mormoiron.

L'objectif principal de ces instrumentations in situ est de contribuer à caler un modèle numérique qui permette d'évaluer l'évolution des teneurs en eau et des déformations d'un sol argileux sujet au retrait-gonflement, en fonction des conditions météorologiques et de l'influence de la végétation arborée. Un premier pas dans cette direction a été fait avec l'application du modèle MACRO au site de Mormoiron, qui permet, en fonction des caractéristiques du sol et sur la base des chroniques de précipitations et d'évapotranspiration potentielle communiquées par Météo-France à partir de sa station de Carpentras toute proche, d'estimer l'évolution dans le temps des teneurs en eau le long d'un profil vertical.

Les premières simulations effectuées mettent clairement en évidence une dessiccation en profondeur du sol avec effet cumulatif se prolongeant sur plusieurs années lors des périodes récentes de sécheresse (1989-91 et 1997-99 notamment, à l'origine de nombreux sinistres localement). En revanche, l'année 2003, caractérisée par un été chaud et sec précédé et suivi de périodes relativement humides, ne se distingue pas particulièrement par la profondeur du front de dessiccation simulé. Il reste cependant à affiner cette approche en intégrant dans les modélisations le rôle de la végétation arborée et en prenant également en compte le gonflement du sol consécutif aux périodes de réhydratation. Par ailleurs, un calage du modèle sur le site du Deffend permettra d'étendre ces observations à une configuration climatique différente.

Cette première étape du projet de recherche a donc atteint ses objectifs même si elle ne permet pas de répondre à toutes les questions qui se posent quant aux mécanismes de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux en période de déficit hydrique. Elle devra maintenant être suivie de phases ultérieures permettant de poursuivre l'acquisition des mesures expérimentales, pendant une durée d'au moins trois ans et surtout de développer un système de modélisation de l'évolution de la teneur en eau des sols argileux en fonction de la pluviosité. Cette modélisation, enrichie des observations effectuées par ailleurs par Météo-France et l'INRA, ainsi que celles acquises au travers d'autres programmes de recherche appliquée, initiés par le BRGM en collaboration avec d'autres partenaires, devra permettre à terme de préciser les paramètres de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement des argiles et d'aider à caractériser une période de sécheresse exceptionnelle susceptible de provoquer des désordres sur le bâti.

10. Bibliographie

- AFNOR** (1995) – Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux. Norme NF P 94-050, 7 p.
- Angulo R., Gaudet J.P., Thony J.L. et Vauclin M.** (1993) – Détermination expérimentale des caractéristiques hydrodynamiques d'un sol gonflant non saturé pour la modélisation des écoulements. *Revue Française de Géotechnique*, n° 62, pp. 49-57.
- Armstrong A., Aden K., Amraoui N., Diekkruger B., Jarvis N., Mouvet C., Nicholl P. et Wittwer C.** (2000). Comparison of the performance of pesticide-leaching models on a cracking clay soil : results using the Brimstone Farm dataset. *Agricultural Water Management*, n° 44, pp. 85-104.
- Bernardie S., Martin R, Foerster E., Mathon C.** (2002) – Expérimentation d'une méthode d'instrumentation et de surveillance des glissements superficiels sur le site du centre de rééducation cardio-respiratoire de Gorbio à Menton (06) – rapport d'avancement. *Rapport BRGM/IRP-52056-FR*, 33 p., 6 fig., 6 ann.
- Biddle P.G.** (1983) – Patterns of soil drying and moisture deficit in the vicinity of trees on clay soils. *Geotechnique*. Vol. XXXIII, pp. 107-126.
- Blanc J.-J., Masse J.-P., Triat J.-M., Truc G., Anglada R., Colomb E., Clauzon G. et Rouire J.** (1975) – Notice explicative et carte géologique de la France (1/50 000), feuille Carpentras (941), Orléans : éd. BRGM, 24 p.
- Bouchut J., Fleureau J.M., Masroufi F., Ruaux N., Oppenheim E.** (2005) - Etudes des mécanismes de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux et de ses interactions avec le bâti – rapport d'avancement. *Rapport BRGM/IRP-54175-FR*, 62 p.
- Bréda N., Cochard H., Dreyer E., Granier A.** (1992) – Water transfer in a mature oak stand (*Quercus petraea*) : seasonal evolution and effects of a severe drought. *Can. J. For. Res.*, n° 23, pp. 1136-1143
- Bréda N., Granier A., Barataud F., Moyne C.** (1995) – Soil water dynamics in an oak stand, I/ Soil moisture, water potentials and water uptake by roots. *Plant and soil*, n° 172, pp. 17-27
- Bréda N., Granier A., Aussenac G.** (2004) – 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, pp. 109-131

- Brunet P., Bouvier C., Perrin, J.-P. et Robain H.** (2003) – Suivi annuel de l'humidité du sol à l'aide de sondages Schlumberger. Actes du 4^{ème} colloque *Géophysiques des Sols et des Formations Superficielles*, Paris, Univ. P. et M. Curie, pp. 130-136.
- Calvet J.-C., Noilhan J., Bessemoulin P.** (1997) – Estimation de la réserve en eau du sol à partir du contenu en eau superficiel ou de la température de surface. *Milieux poreux et transferts hydriques. Bull. du GFHN*, n°39-40, pp. 21-26.
- Calvet J.-C., Bessemoulin P., Noilhan J., Berne C., Braud I., Courault D., Fritz N., Gonzalez-Sosa E., Goutorbe J.-P., Haverkamp R., Jaubert G., Kergoat L., Lachaud G., Laurent J.-P., Mordelet P., Oliosio A., Péris P., Roujean J.-L., Thony J.-L., Tosca C., Vauclin M., Vignes D.** (1999) – MUREX : a land-surface field experiment to study the annual cycle of the energy and water budgets. *Ann. Geophysicae*, n° 17, pp. 838-858
- Chanzy A., Gaudu J.-C., Chadoeuf J.** (1997) – Estimation de la teneur en eau du sol par la méthode capacitive à l'échelle parcellaire. *Milieux poreux et transferts hydriques. Bull. du GFHN*, n°39-40, pp. 27-31.
- Chassagneux D., Meisina C., Vincent M., Ménillet F., Baudu R.** (1998) – Guide synthétique pour la prise en compte de l'aléa retrait-gonflement à l'échelle nationale. *Rapport BRGM* n° R40355, 33 p., 6 fig., 1 tabl., 1 ann., 1 pl. hors-texte
- Compère F.** (2005) – Site Expérimental Hydrogéologique (SEH) du Deffend (Vienne). Document d'incidences pour activités soumises à autorisation au titre de la Loi sur l'Eau. Forages au Supra-Toarcien. *Rapport ERM* 05 228 FC 301, 91 p., 21 fig., 4 tabl., 4 ann.
- Coquet Y.** (1995) – Étude in situ des phénomènes de retrait-gonflement des sols. Application à deux sols tropicaux peu gonflants. *Thèse Université d'Orléans*
- Cuisinier O.** (2002) – Comportement hydromécanique des sols gonflants compactés. *Thèse Institut National Polytechnique de Lorraine, LAEGO*, 177 p.
- Cuisinier O., Masrouri F.** (2004) – Microstructure et comportement hydromécanique d'un sol gonflant non saturé. *Revue Française de Géotechnique*, n° 108, pp. 47-56
- Delage P.** (1988) – Aspects du comportement des sols non saturés. *Revue Française de Géotechnique*, n° 40, pp. 33-43
- Delage P. et Cui Y.J.** (2000) – L'eau dans les sols non saturés. C301. *Techniques de l'ingénieur. Traité de construction*, vol C2, 20 p.
- Driscoll R.** (1983) – The influence of vegetation on the swelling and shrinking of clay soils in Britain. *Geotechnique*. Vol. XXXIII, pp. 93-105

- Dubus I.G. et Brown C.D.** (2002) - Sensitivity and first-step uncertainty analyses for the preferential flow model MACRO. *Journal of Environmental Quality*, n°31, pp. 227-240.
- Ferber V. et 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, pp. 87-98.
- FOCUS** (2000) - 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*, 202 p.
- Gaidi L. et Alimi-Ichola B.** (2000) – Étude des caractéristiques hydrodynamique des sols par la méthode TDR (time domain reflectometry). *Bull. Eng. Geol. Env.*, n°59, pp. 247-255.
- Gonzalez G.** (1992) – Les argiles industrielles du Vaucluse (rapport non public). Rapport BRGM R35521 PAC 4S 92, 25 p., 12 fig., 1 ann.
- Goulet E., Rioux D., Cesbron S., Bottois N. et Barbeau G.** (2003) – Spatialisation de l'activité racinaire de la vigne par résistivité électrique. Premières observations. Actes du 4^{ème} colloque *Géophysiques des Sols et des Formations Superficielles*, Paris, Univ. P. et M. Curie, pp. 22-26
- Granier A., Bréda N., Biron P. et Vilette S.** (1999) – A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling* 116, pp. 269-283
- Habib P.** (1992) – Les sécheresses de 1989 et 1990. *Revue Française de Géotechnique*, n° 58, pp. 7-30.
- Holtz W.G.** (1983) – The influence of vegetation on the swelling and shrinking of clays in the United States of América. *Geotechnique*. Vol. XXXIII, pp. 159-163
- Hydrosol Ingénierie** (1992) – Les dommages liés à la sécheresse des années 1989, 1990 et 1991. Rapport d'étude pour un groupement de propriétaire sur la commune de Mormoiron, département de Vaucluse, 12 p.
- Hydrosol Ingénierie** (2000) – Les dommages liés à la sécheresse et réhydratation des sols de 1992 à 1999, commune de Mormoiron, département de Vaucluse, 9 p.
- Intrasol Géotechnique** (2001) – Étude géotechnique des sols de fondation pour la reprise en sous-œuvre de la villa de M. et Mme Denaives à Mormoiron (84), 12 p.
- Jarvis N.J., Jansson P.-E., Dik P.E. et Messing I.** (1991) - Modelling water and solute transport in macroporous soil. Part I. Model description and sensitivity analysis. *Journal of Soil Science*, n°42, pp. 59-70

- Jarvis N.J., Larsson M., Fogg P. et Carter A.D.** (1995) - Validation of the dual-porosity model MACRO for assessing pesticide fate and mobility in soils. In A. Walker et al. (ed.) Pesticide movement to water, pp. 161-170. BCPC monograph 62. *The British Crop Protection Council*, Farnham, Surrey, UK.
- Jarvis N.J., Brown C.D. et Granitza E.** (2000) - Sources of error in model predictions of pesticide leaching : a case study using the MACRO model. *Agricultural Water Management*, n°44, pp. 247-262.
- Jarvis N.J.** (2002) - Macropore flow models. *The Encyclopedia of Agrochemicals*, Ed. J. Plimmer, vol. 3, pp.1013-1018. Wiley et Sons, UK.
- Kohler A., Abbaspour K.C., Fritsch M., Van Genuchten M.Th. et Schulin R.** (2001) - Simulating unsaturated flow and transport in a macroporous soil to tile drains subject to an entrance head : model development and preliminary evaluation. *Journal of Hydrology*, n°254, pp. 67-81.
- Larsbo M. et Jarvis N.** (2003) - MACRO 5.0. A model of water flow and solute transport in macroporous soil. Technical description. Emergo 2003:6. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Soil Sciences, Uppsala, Sweden.
- Le Berre P. et Damiani L.** avec la collaboration de **Zanfoni A.** (1984) – Recherche de gisements d’argiles industrielles dans le Sud-Est de la France. Rapport BRGM n°84 SGN 028 PAC, 63 p., 30 fig., 8 pl. h.-t.
- Legchenko A., Baltassat J.-M.** (2003) – Expérience d’application conjointe des méthodes électriques, électromagnétiques et de la méthode de sondage par la Résonance Magnétique Protonique (RMP). Actes du 4^{ème} colloque *Géophysiques des Sols et des Formations Superficielles*, Paris, Univ. P. et M. Curie, pp. 66-69.
- Leroi E.** (1995) – HYCOSI. Impact of Hydrometeorology Changes on Slope Instability. Rapport d’avancement 1^{ère} année. Rapport BRGM R 38389, 38 p., 11 fig., 7 ann.
- Leroi E., Martin R., Mirgon C.** (2000) – Gérer les instabilités de pentes en zones urbaines. COGNITO : outil de structuration de la connaissance et d’aide à la décision. Rapport BRGM RP/50491-FR, 61 p., 11 ann.
- Mantho A.T.** (2005) – Échanges sol – atmosphère : application à la sécheresse. *Thèse de doctorat de l’École Nationale des Ponts et Chaussées*, 250 p.
- Marçot N., Gonzalez G.** avec la collaboration de **Fournel S. et Simplet L.** (2004) - Cartographie de l’aléa retrait-gonflement des argiles dans le département de Vaucluse. *Rapport BRGM/RP-53187-FR*, 220 p., 47 ill., 7 ann., 3 carte h.-t.
- Martin R. et Meillier D.** (2002) – 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 BRGM/RP-MODEM2-FR* (non publié), 35 p., 8 fig., 3 tabl., 2 ann.

- Marzak R.** (2004) – Étude de la dessiccation des sols argileux en vue de préciser les critères de déclenchement des sinistres sécheresse (liés au retrait-gonflement des argiles). Rapport de stage pour l'obtention du Diplôme d'Études Approfondies en Géomatériaux, option Génie Civil Environnemental. Université de Marne-la-Vallée, 64 p.
- Melounou J.** (1998) - Instrumentation de terrain en géographie physique. Mémoire de Maîtrise à l'Université Louis Pasteur, Strasbourg, UFR de Géographie, 66 p.
- Michot D., Dorigny A., Benderitter Y. et King D.** (2002) – Le panneau électrique 2D : un outil de suivi spatial et temporel de l'humidité d'une section de sol. Un exemple sous culture de maïs irrigué. *Septièmes Journées Nationales de l'Etude des Sols*, Orléans, INRA, pp. 99-100.
- MINAUS S.A.** (2004) – Instrumentation du site de Mormoiron. Rapport d'installation. Rapport R 04-117, 18 p.
- MINAUS S.A.** (2005) – Instrumentation du site du Deffend à Poitiers. Rapport d'installation. Rapport R 05-059, 15 p.
- Monge O. et Leroi E.** (1997) – HYCOSI. Impact of Hydrometeorology Changes on Slope Instability. Instrumentation du site de Salins-les-Bains : rapport d'avancement 3^{ème} année. Rapport BRGM R 39172, 35 p., 10 fig., 4 tabl., 6 ann.
- Mouroux P., Margron P. et Pinte J.C.** (1988) – La construction économique sur sols gonflants. Edit. BRGM, Manuels et Méthodes n° 14
- Mualem Y.** (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, n°12, pp. 513-522
- Pereira dos Santos L.A.** (1997) – Développement d'une nouvelle méthode de détermination des profils de teneur en eau dans les sols par inversion d'un signal TDR. *Thèse Université Joseph Fourier-Grenoble1*, LTHE, 354 p.
- Ravina I.** (1983) – The influence of vegetation on moisture and volume changes. *Geotechnique*. Vol. XXXIII, pp. 151-157
- Renault O., Norie A., Karnay G., Vincent M.** (2002) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département de la Vienne. Rapport BRGM/RP-51264-FR, 95 p., 14 fig., 8 tabl., 5 ann., 2 cartes h.-t.
- Richards L.A.** (1931) - Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, n°1, pp. 318-333
- Richards B.G., Peter P., Emerson W.W.** (1983) – The effects of vegetation on the swelling and shrinking of soils in Australia. *Geotechnique*. Vol. XXXIII, pp. 127-139

- Rolland S., Tabani P., Stemmelen D., Masrouri F., Moyne C.** (2000) – Étude expérimentale des transferts hydriques dans les argiles gonflantes à l'aide de la gammamétrie double-source. *Milieux poreux et transferts hydriques. Bull. du GFHN*, n°43, pp. 46-51
- Rolland S.** (2002) – Transferts hydriques dans des sols argileux gonflants : influence du confinement. *Thèse Institut National Polytechnique de Lorraine, LAEGO*
- Schaap et Leij** (1998) - Database related accuracy and uncertainty of pedotransfer functions. *Soil Sciences*, n°163, pp. 765–779
- Schaap, Leij et Van Genuchten** (2001) – Rosetta : A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, n°251, pp.163-176
- Skempton A.W.** (1954) – A foundation failure due to clay shrinkage caused by poplar trees. *Proc. Instn. Civ. Engrs. Part I*, 3, Jan., pp. 66-83
- Tessier D., Blaise F., Coquet Y., Courbet C., Priem J., Lemaire Y., Trillaud, S.** (2006) – Analyse comparative de politiques de prévention du risque de « sécheresse géotechnique » - Modélisation et visualisation du phénomène. Rapport final. *INRA, Unité de Sciences du Sol, Versailles*, 288 p.
- Topp G.C., Davis J.L., Amman A.P.** (1980) – Electromagnetic determination of soil water content. Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.*, n°16, pp. 574-582
- Triat J.-M.** (1969) – Contribution sédimentologique à l'étude du bassin de Mormoiron. *Thèse Université de Marseille*
- Triat J.M., Truc G. et Hugueney M.** (1971) - Lithostratigraphie des couches d'âge oligocène inférieur et moyen constituant le toit du gypse dans la carrière de Malemort (Vaucluse) ; données sédimentologiques et paléontologiques. *Annales Faculté des Sciences Marseille*, n° 46, p. 235-246
- Triat J.-M. et Trauth N.** (1972) – Évolution des minéraux argileux dans les sédiments paléogènes du bassin de Mormoiron (Vaucluse). *Bulletin de la Société Française de Minéralogie et de Cristallographie*, n° 95, pp. 235-246
- Van Genuchten** (1980) - A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science of American Journal*, n°44, pp. 892-898
- Vincent M.** (2003) – Retrait-gonflement des sols argileux : méthode cartographique d'évaluation de l'aléa en vue de l'établissement de PPR – 3^{ème} Conférence SIRNAT – Forum des Journées pour la Prévention des Risques Naturels, Orléans, janv. 2003. Actes du Colloque, 7 p., 5 fig.

- Vincent M.** (2003) – Le risque de retrait-gonflement des argiles – Cahiers de l'IAURIF, n° 138, octobre 2003, pp. 95 à 101
- 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, pp. 50 à 55
- Vincent M.** (2006) – Établissement de cartes départementales de l'aléa retrait-gonflement des argiles – Journées Nationales de Géotechniques et de Géologie de l'Ingénieur – Risques Géotechniques et Environnementaux liés à l'Aménagement, INSA Lyon, 27-29 juin 2006, Ed. R. Kastner, F. Emeriault et C. Pothier, IV-41, 8 p.
- Voltz M. et Cabidoche Y.M.** (1987) – Sur le retrait macroscopique d'un sol argileux gonflant. Modèle de relation entre le retrait vertical et les variations de teneur en eau. Vérification expérimentale du modèle. *C.R. Acad. Fr. Paris*, t. 305, série II, pp. 511-516
- Weiller K.W., Steenhuis T.S., Bolle J., Kung K.J.S.** (1998) – Comparison of ground penetrating radar and time domain reflectometry as soil water sensors. *Soil Science of American Journal*, n°62, pp. 1237-1239
- Williams A.A.B., Pidgeon J.T.** (1983) – Evapo-transpiration and heaving clays in South Africa. *Geotechnique*. Vol. XXXIII, pp. 141-150
- Wyles R.** (1983) – The legal aspects of the influence of vegetation on the swelling and shrinking of clays. *Geotechnique*. Vol. XXXIII, pp. 87-91
- Zakri T.** (1997) – Contribution à l'étude des propriétés diélectriques de matériaux poreux en vue de l'estimation de leur teneur en eau : modèles de mélange et résultats expérimentaux. *Thèse Institut Polytechnique de Grenoble, LTHE*, 252 p.



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 6009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service Aménagement et Risques Naturels
Risques Mouvements de Terrain
117, avenue de Luminy – BP 167
13276 Marseille cedex 09
Tél. : 04 91 17 74 74