



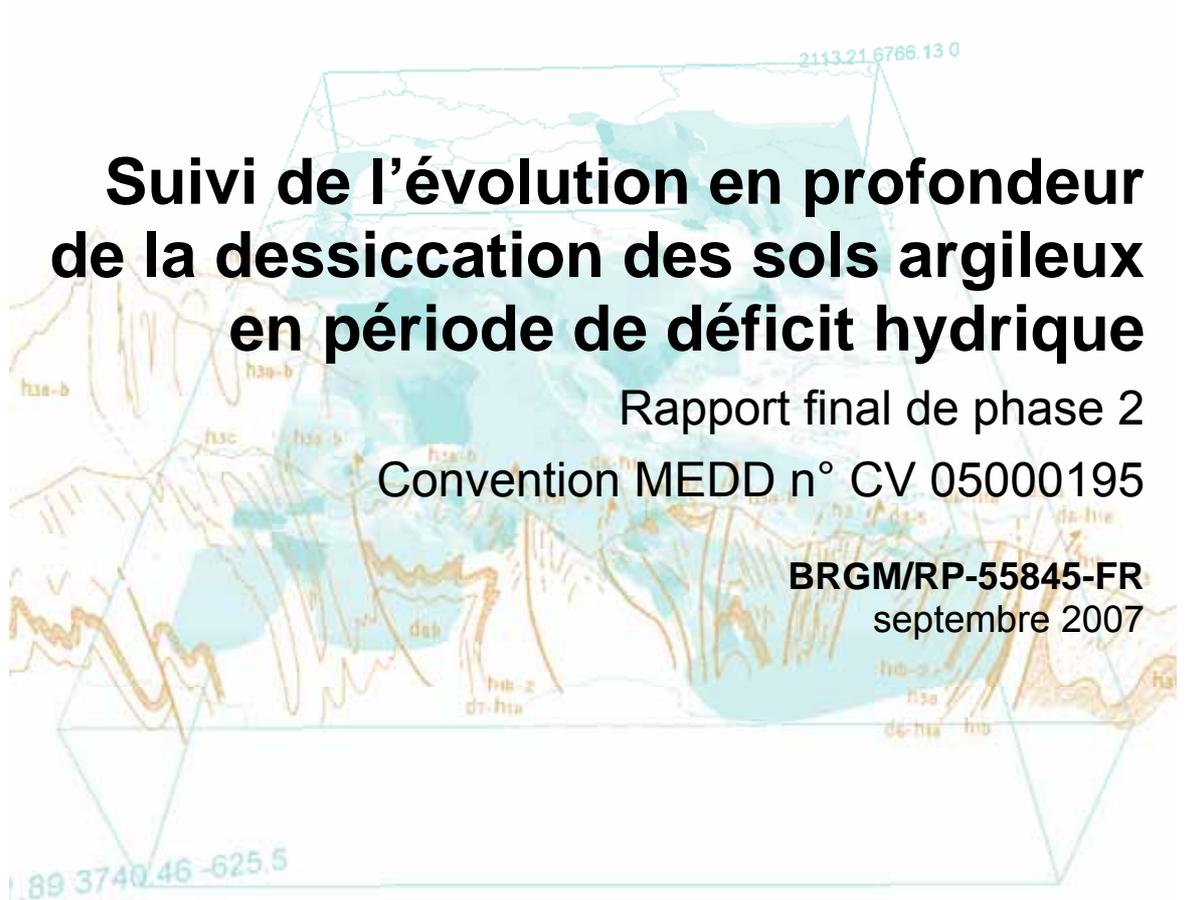
Suivi de l'évolution en profondeur de la dessiccation des sols argileux en période de déficit hydrique

Rapport final de phase 2

Convention MEDD n° CV 05000195

BRGM/RP-55845-FR

septembre 2007



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

Rapport final de phase 2
Convention MEDD n° CV 05000195

BRGM/RP-55845-FR
septembre 2007

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 06RISD09

M. Vincent, E. Plat, S. Le Roy, N. Surdyk, I. Dubus
avec la collaboration de **M. Martin**

Vérificateur :

Nom : Christian MATHON

Date : 11 octobre 2007

Signature :



Approbateur :

Nom : Hormoz MODARESSI

Date : 31 octobre 2007

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, extensomètre, mesure *in situ*, instrumentation, MACRO, modélisation, écoulement préférentiel, Mormoiron, Vaucluse, Mignaloux-Beauvoir, Vienne

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

VINCENT M., PLAT E., LE ROY S., SURDYK N., DUBUS I. avec la collaboration de MARTIN M. (2007) – Suivi de l'évolution en profondeur de la dessiccation des sols argileux en période de déficit hydrique. Rapport final de phase 2. Rapport BRGM/RP-55845-FR, 161 p., 112 ill., 2 ann.

© BRGM, 2007, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

En France, les sinistres liés au retrait-gonflement des sols argileux représentent, depuis 1989, une part importante et croissante des indemnités 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 sols argileux. 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, la SDPRM (Sous-Direction de la Prévention des Risques Majeurs) du Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement Durables (MEDAD) 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 vitesses d'évolution des teneurs en eau dans le sol, l'influence de l'appareil racinaire des arbres en profondeur et les mécanismes cumulatifs inter-annuels. L'objectif principal est de mieux caractériser le déclenchement du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux 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).

Une première phase de l'étude a été menée dans le cadre de la convention n° CV04000065 du 26 juillet 2004 et a consisté en une revue bibliographique, destinée à synthétiser l'état des connaissances en la matière, puis en 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. Cette première phase a notamment permis d'identifier et d'instrumenter les deux sites expérimentaux, l'un à Mormoiron (Vaucluse), l'autre à Mignaloux-Beauvoir au lieu-dit Le Deffend (Vienne) et de procéder aux premières acquisitions et interprétations. Cette première phase a fait l'objet d'un premier rapport de synthèse daté de mai 2006¹.

¹ Rapport BRGM/RP-54567-FR intitulé « Suivi de l'évolution en profondeur de la dessiccation des sols argileux en période de déficit hydrique – Rapport final de phase 1 », mai 2006

Afin de poursuivre ces investigations, il a été décidé de lancer une seconde phase de ce programme, pour une période de seize mois, dans le cadre de deux avenants à la convention n° CV 05000195 signée le 15 décembre 2005 entre le ministère en charge de l'environnement et le BRGM. Le cahier des charges de l'étude est défini dans l'annexe n° 2 de l'avenant n° 1/2006 en date du 4 août 2006. La deuxième phase de ce programme de recherche appliquée est financée à 60 % par la SDPRM, le solde étant apporté 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 deuxième phase avait pour objectif de poursuivre l'acquisition des données pendant un cycle hydrologique complet, d'assurer la maintenance des installations de mesure, d'acquérir les données de base (climatologiques, géologiques et géotechniques) nécessaires à l'interprétation des mesures, de procéder à des corrélations régulières entre teneurs en eau du sol (mesurées en laboratoire sur la base de prélèvements d'échantillons) et permittivité (mesurées par les capteurs *in situ*). De plus, elle devait conduire à établir une corrélation entre les données d'entrée climatologiques (pluie, évaporation) et les teneurs en eau dans le sol, à élaborer des outils de modélisation calés sur les observations des sites expérimentaux et permettant de rendre compte des mécanismes de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement en fonction des conditions climatiques, des caractéristiques du sol et de l'environnement immédiat (rôle des arbres en particulier), et enfin, de commencer à procéder à des études paramétriques, à partir de ces outils de modélisation pour déterminer l'influence réciproque des différents paramètres en cause.

L'acquisition des mesures s'est poursuivie quasi sans interruption tout au long de cette période de seize mois, ce qui permet d'accumuler des séries de mesures expérimentales, depuis décembre 2004 pour les plus anciennes, qui sont précieuses pour caler les travaux de modélisation menés en parallèle. Plusieurs défaillances techniques ont été enregistrées au cours de cette période d'acquisition, dont la perte d'un capteur d'humidité en forêt à 0,5 m de profondeur sur le site du Deffend, ainsi que le blocage temporaire de plusieurs capteurs extensométriques sur le même site, soit par grippage mécanique soit par atteinte de la limite maximale d'extension (dans les deux cas il a été remédié à ces blocages dans un délai raisonnable). En outre, l'installation a été complétée sur le site de Mormoiron par la pose de trois extensomètres, installés le 19 décembre 2006 dans le cadre du projet ARGIC² et opérationnels depuis le 9 janvier 2007.

Par ailleurs, les travaux de calibration des capteurs Humitub se poursuivent en laboratoire, avec la collaboration du CERMES (Centre d'Enseignement et de Recherche en Mécanique des Sols), pour tenter de préciser les limites d'utilisation de ce matériel, notamment au delà d'un certain niveau de teneur en eau dans les sols très

² « Analyse du Retrait-Gonflement et de ses incidences sur le Bâti », projet de recherche cofinancé par l'Agence Nationale de la Recherche pour une durée de 3 ans et regroupant 13 organismes de recherche, sous la coordination du BRGM

argileux, ainsi que lors des phases de retrait entraînant une perte de contact des électrodes de mesure. Une évaluation du rayon d'influence de l'Humitub a montré que celui-ci est d'au minimum 90 mm, significativement supérieur à celui d'une sonde TDR (d'environ 40 mm). Ces expérimentations confirment également que les mesures de teneur en eau via la sonde Humitub sont influencées par la température, à des niveaux variables selon le milieu testé. Enfin, au vu des légères fluctuations des mesures fournies par certains capteurs *in situ*, l'hypothèse de l'influence de la température sur le dispositif de mesure (et non plus sur le capteur lui-même) a été envisagée. Des essais supplémentaires en laboratoire devront être réalisés afin de confirmer ou infirmer cette hypothèse et afin de quantifier exactement l'influence de la température dans chaque type de sol et définir les corrections nécessaires.

Des tests d'étalonnage ont été réalisés dans deux types de sol (un sable et un limon) indiquant que la relation entre la teneur en eau réelle et la permittivité mesurée est linéaire et que la sensibilité de la sonde Humitub paraît équivalente voire meilleure que celle obtenue avec la sonde TDR même si l'offset demeure supérieur. Ces tests d'étalonnage devront être poursuivis et réalisés dans les matériaux argileux prélevés sur les deux sites instrumentés. Néanmoins, les différentes observations menées à ce stade confirment que les indications fournies par ces capteurs sont largement exploitables, au moins en dehors des périodes de forte humidité, et donnent des indications fiables sur l'évolution en continu des teneurs en eau dans les sols.

La poursuite du travail d'interprétation des mesures *in situ* a montré en particulier tout l'intérêt de raisonner à un pas de temps mensuel qui permet de s'affranchir des variations singulières de la teneur en eau en globalisant l'analyse. Avec un tel pas de temps, les corrélations entre les données météorologiques locales et l'évolution des teneurs en eau, au moins jusqu'à 1 m de profondeur, est relativement étroite même si le travail réalisé à ce jour n'a pas encore permis d'identifier des indicateurs simples permettant de relier ces deux grandeurs. Au-delà de cette profondeur, d'autres phénomènes, liés notamment à des circulations temporaires d'eau à la faveur de lentilles plus perméables, interfèrent manifestement et se traduisent par un décalage temporel entre les variations d'humidité du sol et les conditions climatiques de surface. Les observations effectuées à ce jour confirment en tout cas que les transferts hydriques dans un sol argileux, même relativement homogène, sont beaucoup plus complexes et influencés par des variations lithologiques localisées, que les transferts de chaleur (pour lesquels un simple modèle de diffusivité thermique rend bien compte des mesures expérimentales). Enfin, les mesures effectuées sur le site du Deffend en sous-bois mettent clairement en évidence le rôle d'un couvert végétal continu sur la dessiccation du sol en profondeur, la phase de ré-humidification après une période sèche (comme l'automne 2005) étant retardée par rapport à un couvert herbacé.

Les mesures disponibles à ce jour montrent par ailleurs une excellente corrélation entre les mouvements verticaux du sol, au moins en surface et jusqu'à plusieurs dizaines de centimètres de profondeur, et les conditions météorologiques ainsi que l'humidité induite dans la tranche de sol concernée. Les phénomènes de gonflement consécutifs aux épisodes pluvieux s'avèrent particulièrement rapides et ont atteint 13 mm en deux mois à une profondeur de 0,5 m au Deffend en janvier-février 2005, avec des vitesses instantanées de plusieurs mm par jour. La phase de retrait a pu être

suivie dans son intégralité sur le site du Deffend entre le 9 mars et le 15 septembre 2006 où l'on a enregistré un tassement cumulé de 21,9 mm à 0,1 m de profondeur, s'atténuant progressivement en profondeur mais atteignant encore 7,6 mm à 1,5 m. Ce retrait est plus progressif que le gonflement et est stoppé périodiquement lors de la survenance d'épisodes pluvieux (avec même des pics de gonflement en surface). Au pas de temps mensuel, une amorce de corrélation entre les déformations du sol et leur état hydrique (voire l'historique des précipitations observées au cours des mois précédents) paraît désormais envisageable. Sur le site de Mormoiron, les chroniques de déplacements sont encore trop courtes mais la même corrélation apparaît d'ores et déjà entre les déformations du sol et son état d'humidité.

L'utilisation du modèle de transfert MACRO a permis de simuler l'évolution des taux d'humidité sur deux sites présentant des caractéristiques contrastées. Les résultats des simulations semblent en accord avec les observations faites sur le terrain, même si des calages complémentaires restent à effectuer. Les années marquées par une forte sinistralité imputée au phénomène de retrait-gonflement des sols argileux (1989-91 et 1997-99) se distinguent sur les simulations des deux sites. Les variations typiques de teneurs en eau sont particulièrement visibles à 1 m de profondeur pour le site de Mormoiron tandis qu'une simulation à une profondeur de 3 m semble plus adéquate pour le site du Deffend. Cette variation est certainement due à l'organisation différente des horizons argileux dans ces deux sites. Le modèle produit déjà des simulations de bonne qualité qu'il paraît envisageable d'améliorer encore. Pour cela, il sera nécessaire de disposer de données d'entrée plus précises, en particulier pour caractériser le cycle végétatif et les profondeurs des racines actives à différentes périodes de l'année pour plusieurs types de couverts végétaux représentatifs, ainsi qu'en procédant à de nouvelles calibrations du modèle par comparaison avec les données expérimentales actuellement en cours d'acquisition sur les sites. Les résultats des modélisations déjà réalisées sont par ailleurs tout à fait encourageants vis-à-vis de la définition en cours d'un indice de dessiccation exceptionnelle du sol en profondeur et des premières comparaisons des résultats du modèle avec les valeurs mesurées *in situ* à un pas de temps mensuel.

Cette deuxième étape du projet de recherche a donc atteint la plupart de ses objectifs et est très encourageante, même si elle est encore limitée du fait des données disponibles. Elle sera poursuivie par une troisième phase qui devra permettre l'acquisition des mesures jusqu'à fin 2008 afin de couvrir, sur chacun des deux sites instrumentés, une durée minimale d'observation de trois ans, indispensable pour suivre des situations hydrologiques variées et pour engranger les données expérimentales qui permettront d'extrapoler, par modélisation, ces observations à d'autres types de configurations. Un second objectif sera de poursuivre les investigations pour pallier les défauts inhérents au type de capteurs capacitifs mis en place (difficultés de calibration en terrain très argileux, saturation rapide des capteurs au-delà d'une certaine teneur en eau, défaut de contact avec le sol lors des phases de retrait intense). Un troisième objectif consistera à mettre en place de nouveaux extensomètres en forage de manière à quantifier d'une part le rayon d'influence des arbres et d'autre part l'incidence d'une protection anti-évaporation de type géomembrane, souvent préconisée comme mesure constructive préventive.

Sommaire

1. Introduction	15
2. Etat des interventions sur les sites expérimentaux	17
2.1. SITE DE MORMOIRON.....	17
2.1.1. Contexte du site et instrumentation en place	17
2.1.2. Historique des principales interventions sur site.....	18
2.2. SITE DU DEFFEND.....	19
2.2.1. Contexte du site et instrumentation en place	19
2.2.2. Historique des principales interventions sur site.....	20
3. Test d'influence de différents paramètres sur les sondes Humitub	21
3.1. INFLUENCE DE LA GEOMETRIE DE LA SONDE ET DE LA NATURE DES MATERIAUX QUI LA CONSTITUE	21
3.1.1. Rappels sur la géométrie des capteurs Humitub et son évolution	21
3.1.2. Comparaison Humilog / Humitub.....	23
3.1.3. Influence de la valeur de l'épaisseur des électrodes et de leur espacement	24
3.1.4. Influence du matériau des vis.....	26
3.2. TEST DU RAYON D'INFLUENCE ET COMPARAISON AVEC LA SONDE TDR29	
3.3. LA TEMPERATURE	32
3.3.1. Courbe d'étalonnage de la mesure de température par la sonde Humitub	33
3.3.2. Influence de la température sur les valeurs d'humidité mesurées à l'Humitub.....	33
3.4. COMPREHENSION DE LA « SATURATION » DES CAPTEURS	40
4. Courbe d'étalonnage entre permittivité et teneur en eau dans différents matériaux	43
4.1. RESULTATS DANS LE SABLE.....	43
4.2. RESULTATS DANS UN LIMON	45
4.2.1. Résultats dans un sol argileux.....	46
4.2.2. Conclusions partielles.....	46
5. Suivi et interprétation des mesures enregistrées sur le site de Mormoiron	47

5.1. RESULTATS DES MESURES	47
5.1.1. Mesure de la pluviométrie	47
5.1.2. Mesures de température	50
5.1.3. Mesures de l'humidité	51
5.1.4. Mesures extensométriques	66
5.2. PROPAGATION DU FRONT DE DESSICCATION.....	68
5.3. CORRELATIONS ENTRE LES MESURES DE TENEUR EN EAU ET DE DEFORMATIONS	70
6. Suivi et interprétation des mesures enregistrées sur le site du Deffend	73
6.1. RESULTATS DES MESURES	73
6.1.1. Données météorologiques	73
6.1.2. Mesures de température	77
6.1.3. Mesures d'humidité	79
6.1.4. Interprétation des mesures	84
6.1.5. Profils hydriques types	92
6.1.6. Mesures extensométriques	93
6.2. PROPAGATION DU FRONT DE DESSICCATION.....	96
6.2.1. Première approche : variations mensuelles de l'humidité	96
6.2.2. Deuxième approche : état hydrique du sol comparé à son état moyen ...	98
6.3. CORRELATIONS ENTRE LES MESURES DE TENEUR EN EAU ET DE DEFORMATIONS	99
6.3.1. Mensualisation des mesures extensométriques	99
6.3.2. Corrélations entre les déformations mesurées et l'humidité	100
6.3.3. Corrélations entre les déformations mesurées et la pluviométrie	102
7. Simulation des variations de teneur en eau sur les sites expérimentaux de Poitiers et Mormoiron et étude paramétrique.....	105
7.1. EVOLUTION DANS LA SIMULATION	105
7.1.1. Données pour le site du Deffend.....	105
7.1.2. Données complémentaires pour le site de Mormoiron.....	107
7.2. INFLUENCE DES PARAMETRES VEGETATIFS SUR LA MODELISATION	108
7.2.1. Influence de l'indice foliaire et de la profondeur des racines	109
7.2.2. Influence du cycle végétatif des arbres	116
7.2.3. Influence des types de couvert végétal	117
7.2.4. Influence des climats et des sols	123

7.3. COMPARAISON AVEC LES RESULTATS OBTENUS <i>IN SITU</i>	125
7.3.1.Site de Mormoiron	125
7.3.2.Site du Deffend.....	128
7.4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	134
Conclusions.....	137
Bibliographie	141

Liste des illustrations

Illustration 1 - Schéma d'implantation des extensomètres placés sur le site de Mormoiron	18
Illustration 2 – Disposition de l'instrumentation sur le site du Deffend	20
Illustration 3 – Schéma de la géométrie des capteurs Humilog et Humitub	22
Illustration 4 - Paramètres géométriques des capteurs Humitub.....	22
Illustration 5 – Caractéristiques géométriques des sondes installées sur les sites de Poitiers et de Mormoiron	22
Illustration 6 - Courbe de réponse moyenne des capteurs Humilog.....	23
Illustration 7 - Courbe de réponse moyenne des sondes Humitub sur les sites de Mormoiron (a) et du Deffend (b)	23
Illustration 8 – Influence de l'épaisseur des électrodes pour l'éthanol et l'azote (ou air) avec les sondes de diamètre 50 mm	25
Illustration 9 - Influence de l'espacement des électrodes pour les trois milieux étalons : éthanol, air et azote.....	25
Illustration 10 – Résultats de la permittivité obtenue pour différents matériaux de vis.....	27
Illustration 11 – Mesure de la permittivité en fonction du volume d'eau ajouté dans le sable (Hemmati, 2006).....	28
Illustration 12 - Mesures Humitub de la permittivité en fonction de l'éloignement par rapport au bord du récipient.....	29
Illustration 13 - Mesures Humitub de la permittivité en fonction de l'éloignement par rapport à l'interface éthanol-air	30
Illustration 14 - Dispositif expérimental pour la mesure du rayon d'influence de la sonde TDR.....	31
Illustration 15 - Mesures TDR dans l'éthanol de la permittivité par rapport à l'éloignement du bord de la cuve dans le plan perpendiculaire aux électrodes (les électrodes sont situées à 40 mm du bord de la gaine de la sonde)	31

Illustration 16 - Mesures TDR de la permittivité par rapport à l'éloignement du bord de la cuve dans le plan parallèle aux électrodes (les électrodes sont situées à 50 mm du bord de la gaine de la sonde)	32
Illustration 17 - Relation entre la température réelle et la valeur brute indiquée par le capteur de température de la sonde Humitub	33
Illustration 18 – Courbe granulométrique du limon de Jossigny (Mantho, 2005).....	34
Illustration 19 – Compactage du sol autour de la sonde Humitub.....	35
Illustration 20 – Cuve placée dans un bain-marie pour mesurer la permittivité à des températures supérieures à la température ambiante	35
Illustration 21 – Influence de la température sur la permittivité mesurée dans un limon sec	36
Illustration 22 - Influence de la température sur la mesure de la permittivité de l'Humitub dans les sables	37
Illustration 23 – Fluctuations journalières des mesures d'humidité réalisées avec l'Humitub à différentes profondeurs sur le site de Mormoiron (26/01/07 – 12/02/07)	38
Illustration 24 - Fluctuations journalières des mesures d'humidité réalisées avec l'Humitub à différentes profondeurs sur la canne 1 avec un pas de temps de 1 h puis de 30 minutes – site de Mormoiron	39
Illustration 25 – Évolution de l'intensité en sortie des capteurs en présence d'une variation d'humidité – mesure en laboratoire (Vincent et al., 2006)	40
Illustration 26 – Valeur de la permittivité mesurée en fonction de la teneur en eau du sable pour la sonde Humitub (Martin, 2007)	44
Illustration 27 – Permittivité en fonction de la teneur en eau pour les sondes Humitub et TDR dans un sable (Martin, 2007)	44
Illustration 28 - Permittivité en fonction de la teneur en eau pour les sondes Humitub et TDR dans un limon (Martin, 2007)	45
Illustration 29 - Pluviométrie journalière enregistrée par le pluviomètre sur le site de Mormoiron.....	48
Illustration 30 - Pluviométrie mensuelle enregistrée par le pluviomètre sur le site de Mormoiron.....	48
Illustration 31 –Pluviométries mensuelles entre décembre 2004 et juin 2007 à Mormoiron (données BRGM) et comparaison avec la moyenne trentennale mesurée à Carpentras (données Météo-France 1971 - 2000).....	49
Illustration 32 - Caractéristiques annuelles moyennes pour 2005 et 2006 sur le site de Mormoiron et à Carpentras.....	50
Illustration 33 – Températures enregistrées en surface à Carpentras (données Météo-France) et mesurées dans le sol par les deux cannes à Mormoiron	50
Illustration 34 – Températures moyennes mensuelles à Carpentras (données Météo-France) et mesurées dans le sol par les deux cannes à Mormoiron	51
Illustration 35 – Suivi des intensités à 0,5 et 1 m de profondeur sur la canne 2 et pluviométrie – site de Mormoiron (période du 09/12/04 au 22/06/07).....	53
Illustration 36 - Suivi des intensités à 1,5 et 2 m de profondeur sur la canne 2 et pluviométrie – site de Mormoiron (période du 09/12/04 au 22/06/07).....	53

Illustration 37 – Comparaison entre les résultats de permittivité obtenus sur la canne 1 à 0,5 m de profondeur et les déplacements obtenus sur la canne 2 à 0,2 m et 0,5 m de profondeur –site de Mormoiron	54
Illustration 38 - Suivi des intensités à 2,5 m, 3 m, 3,5 m et 4 m de profondeur sur la canne 2 et pluviométrie – site de Mormoiron (période du 09/12/04 au 22/06/07)	55
Illustration 39 - Suivi des intensités à 7 m de profondeur sur la canne 2 et pluviométrie – site de Mormoiron (période du 09/12/04 au 22/06/07).....	56
Illustration 40 - Mesures de teneur en eau mensualisées enregistrées sur la canne 2 et pluviométrie mensuelle - site de Mormoiron	57
Illustration 41 – Tableau récapitulatif des teneurs en eau massiques mensuelles minimales, maximales et moyennes et de leur amplitude de variation pour chaque profondeur	58
Illustration 42 - Profil hydrique moyen mensuel enregistré sur la canne 2 entre 0,5 et 3,5 m de profondeur sur toute la période instrumentée –site de Mormoiron	59
Illustration 43 - Comparaison des profils hydriques obtenus par mesure directe (en laboratoire sur échantillon prélevé in situ) et indirecte (Humitub) de Mormoiron	60
Illustration 44 – Profils de teneurs en eau entre la fin de l’été 2005 et le milieu de l’hiver 2005 – 2006 – Canne 2 – Site de Mormoiron (Vincent et al., 2006)	62
Illustration 45 - Profils hydriques moyens mensuels enregistrés sur la canne 2 entre 0,5 et 3,5 m de profondeur entre novembre 2005 et décembre 2006 – site de Mormoiron	63
Illustration 46 - Profils hydriques moyens mensuels enregistrés sur la canne 2 entre 0,5 et 3,5 m de profondeur entre avril 2006 et juin 2007 – site de Mormoiron	64
Illustration 47 - Comparaison des profils mensuels de septembre à décembre pour les années 2004, 2005, 2006 et 2007 – site de Mormoiron	65
Illustration 48 –Comparaison entre les déplacements mesurés à 0,2 m, 0,5 m et 1 m de profondeur, la pluviométrie enregistrée et l’humidité mesurée à 0,5 m de profondeur sur le site de Mormoiron entre le 11/01/07 et le 22/06/07	67
Illustration 49 – Influence des précipitations du 15/06/07 sur les variations d’humidité à des profondeurs comprises entre 0,5 et 2,5 m de profondeur (valeurs enregistrées sur la canne 1 ou la canne 2) – site de Mormoiron.....	68
Illustration 50 – Profils hydriques moyens retenus pour la canne 2 sur le site de Mormoiron	69
Illustration 51 – Etat hydrique mesuré par chaque capteur comparé au profil hydrique moyen obtenu sur le site de Mormoiron.....	70
Illustration 52 – Déformations calculées pour les différentes couches de sol – site de Mormoiron	71
Illustration 53 – Évolution de la déformation de la couche 0,2 à 1 m en fonction de la teneur en eau massique à 0,5 m – site de Mormoiron	72
Illustration 54 – Pluviométrie mensuelle enregistrée sur le site du Deffend par l’Université de Poitiers et sur la station de Poitiers-Biard par Météo-France	73
Illustration 55 – Carte départementale des précipitations mensuelles de la Vienne au mois de juin 2006 (issue du bulletin Météo France de la Vienne pour juin 2006)	74

Illustration 56 – Température moyenne mensuelle et cumul mensuel de précipitation enregistrés sur le site du Deffend par l'Université de Poitiers de décembre 2002 à juin 2007	75
Illustration 57 – Précipitations et températures moyennes mensuelles sur la période 2002-2007 d'après les données disponibles sur le site du Deffend	76
Illustration 58 – Caractéristiques moyennes des années 2003 à 2006 sur le site du Deffend et à Poitiers-Biard	76
Illustration 59 – Températures dans le sol du Deffend mesurées en prairie et en forêt, et issues d'une simulation numérique simple	78
Illustration 60 - Mesures brutes des capteurs Humitub de la grappe 1 (forêt) sur le site du Deffend à 0,5 et 1 m de profondeur.....	79
Illustration 61 - Mesures brutes des capteurs Humitub de la grappe 1 (forêt) sur le site du Deffend à 1,5 m, 2 m, 2,5 m et 3 m de profondeur	80
Illustration 62 – Mesures brutes des capteurs Humitub de la grappe 1 (forêt) sur le site du Deffend à 3,5 m, 4 m, 5 m et 6 m de profondeur	81
Illustration 63 - Mesures brutes des capteurs Humitub de la grappe 2 (prairie) sur le site du Deffend entre 0,5 m et 4 m de profondeur	83
Illustration 64 - Mesures d'humidité mensualisées à 1 m en forêt et pluviométrie mensuelle sur le site du Deffend	85
Illustration 65 - Mesures d'humidité mensualisées à 1,5 m en forêt et pluviométrie mensuelle sur le site du Deffend	86
Illustration 66 - Mesures d'humidité mensualisées à 2 m en forêt et pluviométrie mensuelle sur le site du Deffend	87
Illustration 67 - Mesures d'humidité mensualisées à 2,5 m en forêt et pluviométrie mensuelle sur le site du Deffend	87
Illustration 68 - Mesures d'humidité mensualisées à 3,5 m, 4 m et 5 m en forêt et pluviométrie mensuelle sur le site du Deffend.....	89
Illustration 69 - Mesures d'humidité mensualisées à 0,5 m en prairie et pluviométrie mensuelle sur le site du Deffend	90
Illustration 70 - Mesures d'humidité mensualisées à 1 m en prairie et pluviométrie mensuelle sur le site du Deffend	91
Illustration 71 – Profils hydriques mensuels sur les deux grappes de capteurs du site du Deffend	93
Illustration 72 – Mesures extensométriques obtenues sur le site du Deffend.....	94
Illustration 73 – Épaisseur de la couche 0,1 à 1,5 m et pluviométrie journalière sur le site du Deffend.....	96
Illustration 74 – Évolution temporelle de la profondeur estimée du front de dessiccation sur le site du Deffend.....	97
Illustration 75 – Profils hydriques moyens retenus pour chaque grappe de capteurs du Deffend	98
Illustration 76 – Etat hydrique mesuré par chaque capteur comparé aux profils hydriques moyens obtenus sur le site du Deffend	99

Illustration 77 – Mesures extensométriques mensualisées sur le site du Deffend	100
Illustration 78 – Déformation de la couche comprise entre 0,1 et 1,5 m et humidité volumique moyenne entre 0,5 et 1 m sur le site du Deffend (données mensualisées).....	101
Illustration 79 – Taux de déformation et variations relatives d'humidité volumique de la couche 0,1 à 1,5 m sur le site du Deffend au pas de temps mensuel.....	101
Illustration 80 – Taux de déformation de la couche 0,1-1,5 m en fonction du cumul des précipitations pondérées sur trois mois sur le site du Deffend	102
Illustration 81 – Résultats des analyses granulométriques des échantillons prélevés dans la fosse pédologique du Deffend.....	106
Illustration 82 - Courbes de rétention obtenues à partir de fonction de pédotransfert et de valeurs mesurées in situ sur le site du Deffend	106
Illustration 83 - Courbes de rétention obtenues à partir de valeurs mesurées in situ et de fonctions de pédotransfert.....	108
Illustration 84 - Répartition des prélèvements d'eau le long d'un profil de sol sous frênaie au cours d'un dessèchement estival (d'après Bréda et al., 2002).....	109
Illustration 85 - Évolution de l'activité de pousse d'un olivier dans le sud de la France (d'après AFIDOL, 2007)	110
Illustration 86 - Evolution de l'indice foliaire (max 2,5) et de la profondeur des racines actives (max. 2 m). Les points cerclés de rouge (o) sont imposés par l'utilisateur, le reste des courbes est interpolé par MACRO	111
Illustration 87 - Variations du degré de saturation à 50 cm de profondeur (sol de Mormoiron).....	113
Illustration 88 - Variations du degré de saturation à 1 m de profondeur (sol de Mormoiron).....	114
Illustration 89 - Variations du degré de saturation à 3 m de profondeur (sol de Mormoiron).....	115
Illustration 90 - Différence d'évolution du LAI entre un arbre à "cycle long" et un arbre à "cycle court".....	116
Illustration 91 - Variations du degré de saturation à 100 cm de profondeur pour un arbre à "cycle court" (à gauche) et un arbre à "cycle long" (à droite)	117
Illustration 92 - Evolution de l'indice foliaire (maximum 5) et de la profondeur des racines actives (maximum 1 m) pour un framboisier.....	118
Illustration 93 - Evolution de l'indice foliaire (maximum 3) et de la profondeur des racines actives (maximum 2 m) pour un olivier.....	118
Illustration 94 - Evolution de l'indice foliaire (maximum 5) et de la profondeur des racines actives (maximum 2 m) pour un chêne.....	119
Illustration 95 - Evolution de l'indice foliaire (maximum 5) et de la profondeur des racines actives (maximum 2 m) pour un pommier.....	119
Illustration 96 - Principaux paramètres du développement des cinq couverts végétaux étudiés.....	120
Illustration 97 - Variations du degré de saturation à 100 cm de profondeur pour cinq couverts végétaux sur le site de Mormoiron	122

Illustration 98 - Comparaison entre les taux d'humidité mesurés à Mormoiron et les taux d'humidité calculés par le modèle MACRO (16 novembre 2005)	123
Illustration 99 - Variations du degré de saturation à 50 cm, 1 m et 3 m de profondeur pour le chêne sur les sites de Mormoiron et de Poitiers et comparaison avec le nombre d'arrêtés CatNat sur les départements.....	124
Illustration 100 - Résultats obtenus par Macro sur le site de Mormoiron pour un olivier et mesures in situ.....	125
Illustration 101 - Résultats obtenus par Macro sur le site de Mormoiron pour un framboisier et mesures in situ.....	127
Illustration 102 - Résultats obtenus par Macro sur le site de Mormoiron pour un couvert herbeux et mesures in situ	128
Illustration 103 – Résultats obtenus à 0,54 m par Macro sur le site du Deffend pour un chêne et mesures in situ à 0,5 m.....	129
Illustration 104 – Résultats obtenus à 1 m par Macro sur le site du Deffend pour un chêne et mesures in situ à 1 m.....	129
Illustration 105 – Résultats obtenus à 1,4 m par Macro sur le site du Deffend pour un chêne et mesures in situ à 1,4 m.....	130
Illustration 106 – Résultats obtenus à 1,9 m par Macro sur le site du Deffend pour un chêne et mesures in situ à 2 m.....	131
Illustration 107 – Résultats obtenus à 2,5 m par Macro sur le site du Deffend pour un chêne et mesures in situ à 2,5 m.....	131
Illustration 108 – Résultats obtenus à 2,8 m par Macro sur le site du Deffend pour un chêne et mesures in situ à 3 m.....	132
Illustration 109 – Résultats obtenus à 3,2 m par Macro sur le site du Deffend pour un chêne et mesures in situ à 3,5 m.....	132
Illustration 110 – Résultats obtenus à 0,54 m par Macro sur le site du Deffend pour un couvert herbeux et mesures in situ à 0,5 m.....	133
Illustration 111 – Résultats obtenus à 1 m par Macro sur le site du Deffend pour un couvert herbeux et mesures in situ à 1 m.....	134
Illustration 112 – Résultats obtenus à 1,4 m par Macro sur le site du Deffend pour un couvert herbeux et mesures in situ à 1,5 m.....	134

Liste des annexes

Annexe 1 Liste chronologique des interventions de maintenance réalisées sur le site de Mormoiron depuis l'installation	143
Annexe 2 Liste chronologique des interventions de maintenance réalisées sur le site du Deffend depuis l'installation.....	157

1. Introduction

Les sinistres imputés au retrait-gonflement des sols argileux constituent depuis plusieurs années en France la seconde cause d'indemnisation au titre du régime des catastrophes naturelles et coûtent très cher à la collectivité. La prévention de ce phénomène naturel se renforce progressivement et le BRGM y contribue fortement en élaborant, à la demande du Ministère de l'Écologie, de l'Aménagement et du Développement Durables (MEDAD), des cartes d'aléa sur l'ensemble du territoire métropolitain, largement diffusées sur internet et servant de support à l'élaboration de plans de prévention des risques (PPR) qui permettent d'imposer le respect de règles constructives préventives dans les zones concernées.

Parallèlement à cet effort en faveur de la prévention du phénomène, le MEDAD a chargé le BRGM de contribuer à un programme de recherche en vue de mieux comprendre les mécanismes de déclenchement du retrait-gonflement et préciser les critères qui permettraient d'identifier les conditions climatiques nécessaires à l'apparition de sinistres dans un contexte donné. Cette demande est en particulier justifiée par l'expérience vécue par les Pouvoirs publics suite à l'été 2003, période pour laquelle plus de 8 000 communes françaises ont déclaré des sinistres alors que le critère élaboré par Météo-France et basé sur l'analyse du déficit hydrique calculé à partir du réseau de stations météorologiques, ne permettait pas de reconnaître l'état de catastrophe naturelle. Il apparaît ainsi que ce critère prend en compte une tranche de sol probablement trop superficielle, n'intègre pas suffisamment le rôle du système racinaire et rend mal compte des possibilités de sécheresses cumulatives, notamment en climat méditerranéen. Par ailleurs, le critère appliqué depuis fin 2000 accorde peut-être un poids excessif à l'existence d'un déficit hydrique en période hivernale de recharge des nappes, ce qui n'a pas été observé au cours de l'hiver 2002-03.

Dans ce contexte, la Sous-Direction de la Prévention des Risques Majeurs du MEDAD 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 vitesses d'évolution des teneurs en eau dans le sol, 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 sols argileux 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 in-situ en fonction de la profondeur et à caractériser cette évolution par rapport aux données météorologiques locales (pluviosité et évapotranspiration). Une première phase de l'étude avait été menée dans le cadre de la convention n° CV04000065 du 26 juillet

2004 et avait consisté en une revue bibliographique, destinée à synthétiser l'état des connaissances en la matière, puis en 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. Cette première phase avait permis, outre ce travail de synthèse bibliographique, d'identifier les deux sites expérimentaux, l'un à Mormoiron (Vaucluse), l'autre à Mignaloux-Beauvoir au lieu-dit Le Deffend (Vienne), de mettre en place le matériel d'instrumentation et de procéder aux premières acquisitions et interprétations. Cette première phase a fait l'objet de la remise d'un premier rapport de synthèse daté de mai 2006³.

Afin de poursuivre l'acquisition des mesures expérimentales et de prolonger l'interprétation des données par un travail de modélisation de l'évolution de la teneur en eau des sols argileux en fonction de la pluviosité, il a été décidé de lancer une seconde phase de ce programme, pour une période de seize mois, dans le cadre de deux avenants à la convention n° CV 05000195 signée le 15 décembre 2005 entre le ministère en charge de l'environnement et le BRGM. Le cahier des charges de l'étude est défini dans l'annexe n° 2 de l'avenant n° 1/2006 en date du 4 août 2006.

La seconde phase de ce programme est financée à hauteur de 60 % par la Sous-Direction de la Prévention des Risques Majeurs du MEDAD, le solde étant apporté 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.

³ Rapport BRGM/RP-54567-FR intitulé « Suivi de l'évolution en profondeur de la dessiccation des sols argileux en période de déficit hydrique – Rapport final de phase 1 », mai 2006

2. Etat des interventions sur les sites expérimentaux

2.1. SITE DE MORMOIRON

Cette partie rappelle brièvement le contexte du site et son instrumentation, ainsi que les principales interventions ayant eu lieu sur le site depuis décembre 2004.

2.1.1. Contexte du site et instrumentation en place

Une description détaillée du site instrumenté a déjà été réalisée dans les rapports précédents (Vincent *et al.*, 2006 – BRGM/RP-54567-FR ; Vincent *et al.*, 2006 – BRGM/RP-54862-FR). Cette partie présente une description succincte du site de Mormoiron et de ses installations.

Le site se situe sur un terrain communal de Mormoiron, dans le Vaucluse. La parcelle instrumentée est concernée par la formation géologique des *Sables et Argiles vertes à smectites de Mormoiron*.

Une partie de l'instrumentation est opérationnelle sur le site depuis début décembre 2004. Elle est constituée de :

- un pluviomètre à augets relié à une centrale d'acquisition OSIRIS ;
- 12 capteurs Humitub régulièrement espacés et disposés entre 0,5 et 7 m de profondeur le long d'une canne (canne Humitub 1) implantée en forage au pied d'un orme de petite taille (hauteur 4 à 5 m), en amont de la parcelle et en contrebas du chemin.
- 12 capteurs Humitub en terrain plat et dégagé, occupé par une herbe rase, dans une zone initialement située à plusieurs mètres de buissons environnants mais qui a été débroussaillée en mai 2006 (canne Humitub 2). Les 12 capteurs sont espacés régulièrement le long d'une canne verticale unique implantée en forage et sont positionnés entre 0,5 et 7 m de profondeur ;

Ces capteurs ont été installés dans le cadre de la première phase du présent projet.

Le reste de l'instrumentation est constitué de 3 capteurs extensométriques, installés le 19 décembre 2006 dans le cadre du projet ARGIC et opérationnels depuis le 9 janvier 2007. Les trois extensomètres ont été placés en partie basse de la parcelle à 2 m environ de la canne Humitub n° 2, dans un espace herbeux dégagé, à proximité immédiate de la centrale d'acquisition. L'espacement entre deux extensomètres adjacents est respectivement de 1,20 et 1,50 m. Le plan de l'installation est présenté sur l'illustration 1.

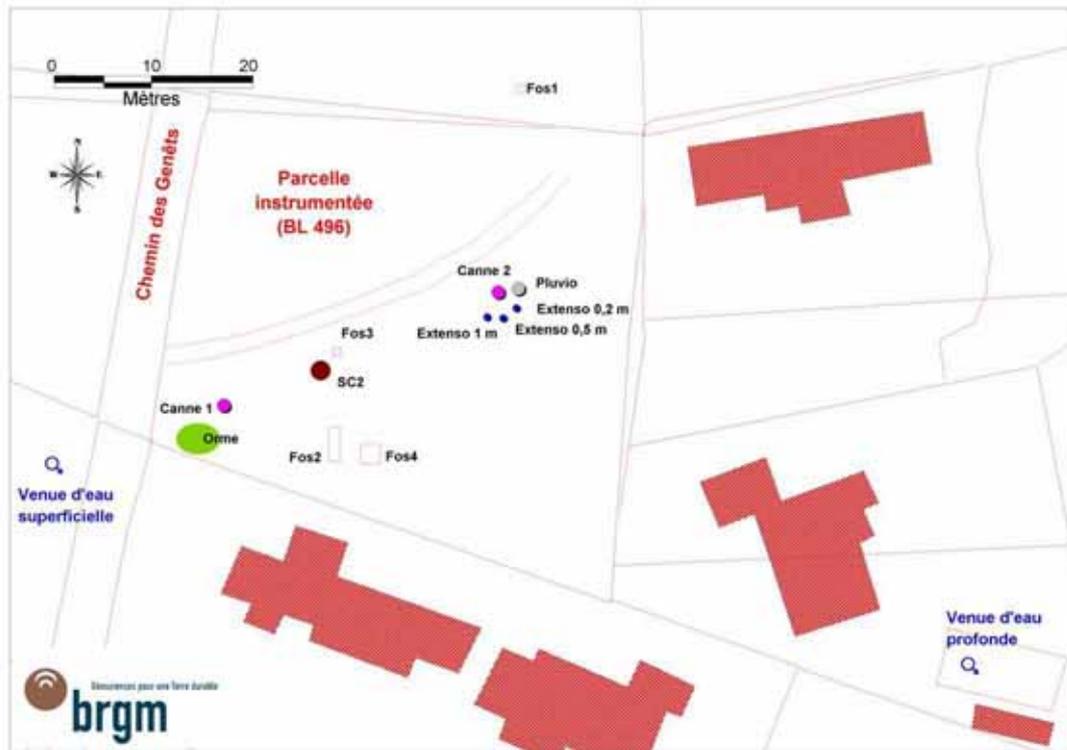


Illustration 1 - Schéma d'implantation des extensomètres placés sur le site de Mormoiron

Les capteurs de déplacement sont ancrés au terrain à une profondeur comprise selon les cas entre 20 cm et 1 m et s'appuient sur un mécanisme télescopique scellé à 6 m de profondeur. Il est implicitement supposé que les mouvements du sol à 6 m de profondeur sont négligeables, ce qui permet donc au dispositif de mesurer les déplacements verticaux du sol au niveau du point d'ancrage supérieur (20 cm, 50 cm ou 1 m selon les capteurs) par rapport à ce point supposé fixe.

Les capteurs de déplacement utilisés présentent une course maximale de 100 mm. Les extensomètres ont été placés en position intermédiaire (à mi-course) pour permettre de suivre aussi bien les elongations (gonflement du sol) que les raccourcissements (tassement du terrain).

Les résultats des sondages et des fouilles réalisés sur le site sont consultables dans les rapports déjà cités (Vincent *et al.*, 2006).

2.1.2. Historique des principales interventions sur site

Depuis l'installation des premiers Humitub début décembre 2004, la maintenance des installations de mesures a été assurée soit à titre préventif (scellement des têtes de canne Humitub, installation d'un panneau solaire), soit en réponse à certains dysfonctionnements du système de mesure (remplacement de multiplexeurs,

rétablissement de l'alimentation), soit lors de l'installation de nouveaux appareils de mesures (extensomètre).

L'ensemble des interventions relatives au dispositif d'instrumentation en place sur le site de Mormoiron est décrit en Annexe 1 du présent document.

2.2. SITE DU DEFFEND

Comme pour le site de Mormoiron, une description détaillée du site instrumenté a déjà été réalisée dans les rapports précédents (Vincent *et al.*, 2006 – BRGM/RP-54567-FR ; Vincent *et al.*, 2006 – BRGM/RP-54862-FR). Cette partie présente une description succincte du site du Deffend, de ses installations et des opérations de maintenance.

2.2.1. Contexte du site et instrumentation en place

Le site se trouve au lieu dit le Deffend, sur la commune de Mignaloux-Beauvoir, dans la Vienne. Le terrain appartient à l'Université de Poitiers et est exploité dans le cadre de multiples programmes de recherche dans d'autres domaines (études hydrogéologiques de la nappe du Dogger en particulier). La parcelle instrumentée correspond à la formation géologique du *Complexe des Bornais*, constituée d'argiles silteuses, grises à jaunâtres, parfois ocres à rouges.

L'instrumentation est opérationnelle sur le site depuis début décembre 2005. Elle est constituée de :

- 11 capteurs Humitub placés dans une zone de prairie, à raison d'un capteur par forage, implantés à des profondeurs comprises entre 0,5 et 7 m ;
- 11 capteurs Humitub en lisière de zone boisée, également à raison d'un capteur par forage, implantés à des profondeurs comprises entre 0,5 et 7 m ;
- 4 capteurs extensométriques, ancrés à 7 m de profondeur dans le calcaire et mesurant les déplacements entre ce point supposé fixe et les profondeurs respectives de 0,1 m, 0,5 m, 1 m et 1,5 m.

L'instrumentation du site a été réalisée dans le cadre de la phase 1 du présent projet, à l'exception des capteurs extensométriques qui ont été implantés dans le cadre d'un projet financé par le réseau RGC&U visant à étudier les mécanismes de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux et de ses interactions avec le bâti (Vincent *et al.*, 2006 – BRGM/RP-54862-FR).

L'illustration 2 présente la disposition du site et de son instrumentation.

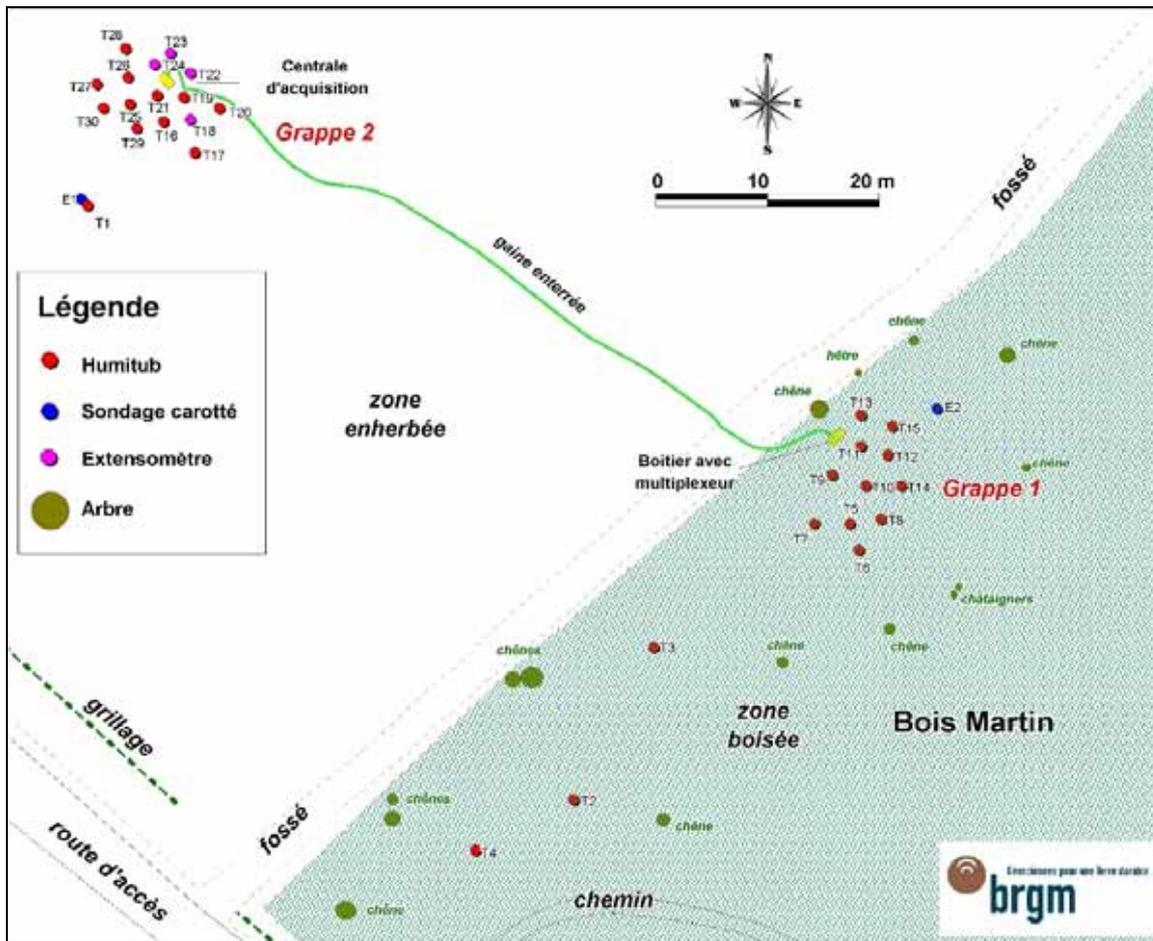


Illustration 2 – Disposition de l'instrumentation sur le site du Deffend

Les résultats des sondages réalisés sur le site sont présentés dans les rapports déjà cités (Vincent *et al.*, 2006).

2.2.2. Historique des principales interventions sur site

Depuis l'installation des premiers Humitub début décembre 2005, l'essentiel des interventions réalisées sur le site du Deffend a consisté en l'installation d'un panneau solaire et au nettoyage des extensomètres (qui étaient grippés).

L'ensemble des interventions relatives aux appareils de mesure du site du Deffend est décrit en Annexe 2 du présent document.

3. Test d'influence de différents paramètres sur les sondes Humitub

Dans l'optique d'approfondir la connaissance des sondes mises en place et d'améliorer les corrections à apporter aux résultats mesurés *in situ*, un certain nombre de tests de calibration ont été réalisés depuis mai 2006 en laboratoire ou résultent d'observations *in situ*. Les tests réalisés ont pour but de connaître :

- l'influence de la géométrie du capteur sur la sensibilité de l'appareil et la valeur de l'offset (ou décalage) ;
- le rayon d'influence effectif de la sonde Humitub et celui d'une sonde TDR classique ;
- l'influence de la température sur la permittivité mesurée.

Les résultats présentés dans cette partie sont le fruit de différentes campagnes de mesures : des mesures de calibration à la mise en place des sondes sur les sites de Poitiers et Mormoiron, ainsi que des mesures effectuées en laboratoire pour la détermination de l'influence de la géométrie de la sonde et des matériaux qui la constituent. Ces tests ne sont pas achevés et devront se poursuivre lors de la troisième phase de l'étude.

3.1. INFLUENCE DE LA GEOMETRIE DE LA SONDE ET DE LA NATURE DES MATERIAUX QUI LA CONSTITUE

Les premiers résultats présentés concernent l'influence de la géométrie de la sonde et de la nature des électrodes. En effet, les périodes de saturation (qui se traduisent par des fluctuations rapides des mesures entre 4 et 20 mA et un dépassement de la valeur seuil de 20 mA de la carte d'acquisition) ont conduit à étudier ces deux paramètres dans le but de tenter de réduire la valeur de l'offset (décalage pour la valeur mesurée dans l'air) et éventuellement la sensibilité de l'appareil.

3.1.1. Rappels sur la géométrie des capteurs Humitub et son évolution

Les premiers capteurs développés par le BRGM, nommés Humilog, présentaient une terminaison tronconique, qui imposait d'utiliser une sonde unique par capteur. Afin de pouvoir implanter plusieurs capteurs sur une même canne implantée en sondage, ces capteurs ont été modifiés pour devenir cylindriques (Illustration 3), ce qui a donné naissance aux capteurs Humitub, utilisés dans le cadre de la présente étude. Sur ces derniers, les paramètres modulables sont le diamètre de la sonde, l'espacement entre les électrodes et leur épaisseur (Illustration 4).

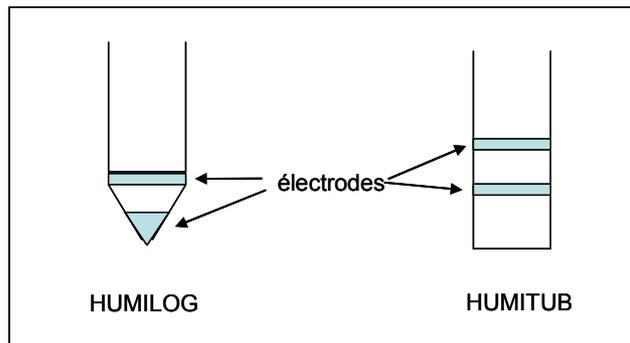


Illustration 3 – Schéma de la géométrie des capteurs Humilog et Humitub

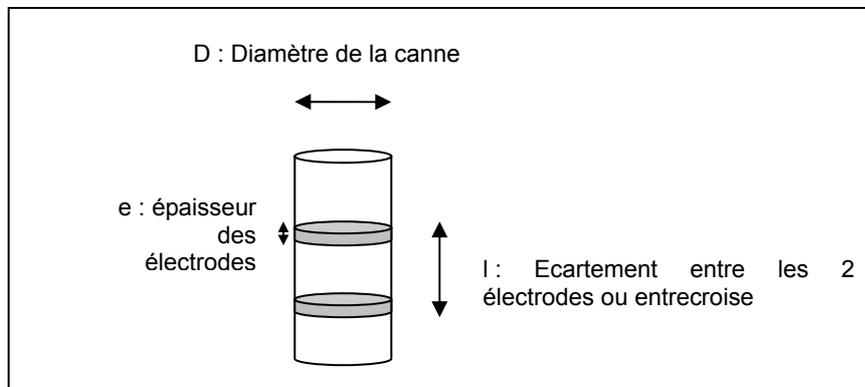


Illustration 4 - Paramètres géométriques des capteurs Humitub

Les capteurs Humitub, qui présentaient initialement un diamètre de 43 mm (équivalent à celui des capteurs Humilog), ont vu par la suite leur diamètre augmenter à 50 mm afin de faciliter leur implantation *in situ*. L'illustration 5 présente les caractéristiques géométriques des capteurs mis en place sur les sites du Deffend et de Mormoiron.

	e : épaisseur des électrodes (mm)	d : diamètre de la sonde (mm)	l : écartement entre 2 électrodes ou entretoise (mm)
Site de Mormoiron	10	50	10
Site de Poitiers	10	50	11,8

Illustration 5 – Caractéristiques géométriques des sondes installées sur les sites de Poitiers et de Mormoiron

3.1.2. Comparaison Humilog / Humitub

Cette partie compare les résultats d'étalonnage des sondes Humilog et Humitub. L'illustration 6 et l'illustration 7 présentent les courbes d'étalonnage réalisées dans les fluides étalons, respectivement avec l'Humilog (43 mm de diamètre) et avec l'Humitub de 50 mm de diamètre (pour Mormoiron et Le Deffend, avec un écartement respectif de 10 mm et de 11,8 mm). Pour l'Humitub, les mesures d'étalonnage correspondent à celles fournies dans le rapport de la phase 1 de ce projet de recherche pour lesquelles les mesures réalisées dans l'eau se révèlent inexploitable (phénomène de saturation du capteur).

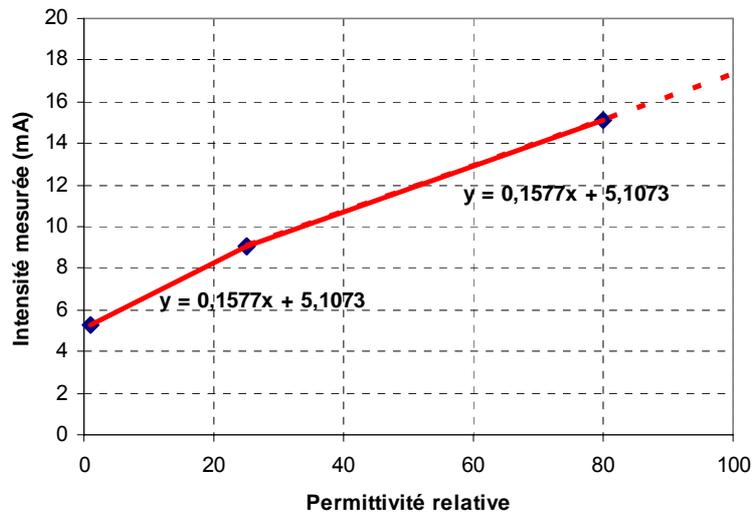


Illustration 6 - Courbe de réponse moyenne des capteurs Humilog

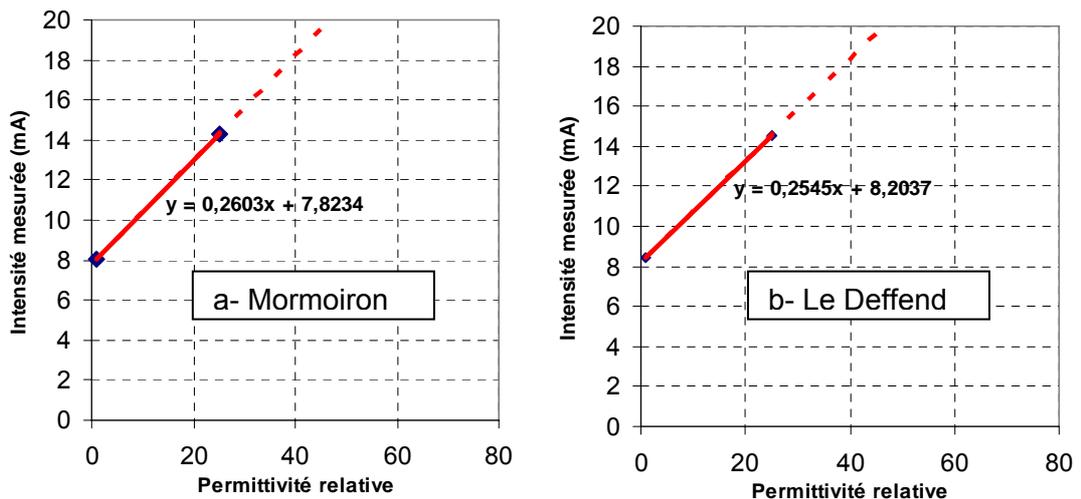


Illustration 7 - Courbe de réponse moyenne des sondes Humitub sur les sites de Mormoiron (a) et du Deffend (b)

Ces illustrations montrent que le passage de l'Humilog à l'Humitub (de 50 mm de diamètre) s'est accompagné d'une augmentation de la sensibilité de l'appareil (la valeur de la pente passe de 0,15 à 0,25) et de l'offset (de 5,3 à 8,2 mA), vraisemblablement responsables du dépassement du seuil de 20 mA du signal de sortie dans l'eau (Illustration 7). Ce dépassement pourrait être lié à une augmentation de la surface en contact avec le sol et à une masse métallique plus importante des électrodes, du fait de l'augmentation de diamètre. Malheureusement, aucune courbe d'étalonnage n'a été retrouvée pour la sonde Humitub de diamètre 43 mm afin de vérifier sa cohérence avec celle de l'Humilog ce qui aurait permis de confirmer cette hypothèse. En effet, la principale modification entre l'Humilog et l'Humitub de 43 mm de diamètre est la géométrie du capteur (Illustration 3).

3.1.3. Influence de la valeur de l'épaisseur des électrodes et de leur espacement

Afin de réduire l'offset et la sensibilité de l'Humitub, l'espacement entre les électrodes a été augmenté (de 10 mm à 11,8 mm) pour l'installation sur le site du Deffend (02/12/05). Cette augmentation d'espacement a eu pour effet une très légère diminution de sensibilité pour cette seconde configuration (Illustration 7) mais n'a pas résolu le problème de dépassement de la limite supérieure de la carte d'acquisition de 20 mA. Afin de tenter de résoudre cette difficulté, de nouvelles mesures d'étalonnage ont été réalisées en modifiant chacun de ces deux paramètres (Illustration 8) et notamment en diminuant l'épaisseur des électrodes (e) de telle manière que la surface de contact des parties métalliques avec le milieu soit identique à celle de la configuration initiale Humitub ($d = 43$ mm, $e = 10$ mm et $l = 10$ mm).

Les valeurs présentées sur l'illustration 8 et l'illustration 9 correspondent aux valeurs moyennes obtenues lors de différentes sessions d'étalonnage (avec les cannes dans les configurations des sites du Deffend et de Mormoiron et de nouvelles configurations). Les valeurs correspondant aux mesures dans l'eau connaissent la plupart du temps d'importantes fluctuations dues au dépassement de la valeur de 20 mA et ne sont pas présentées ici.

Étalon	Épaisseur des électrodes (mm)	Espacement entre les électrodes (mm)	Nombre de mesures d'étalonnage prises en compte (mA)	Permittivité moyenne dans l'éthanol (mA)	Valeur minimale (mA)	Valeur maximale (mA)	Ecart type
azote	8,4	8,4	10	9,08	9,00	9,10	0,04
		10	5	8,98	8,98	8,98	0,00
	10	10	5	8,08	8,08	8,09	0,00
		11,8	9	8,46	8,45	8,46	0,00
éthanol	8,4	8,4	27	16,37	7,16	19,19	2,01
		10	5	15,09	15,09	15,10	0,00
	10	10	7	14,33	14,31	14,37	0,02
		11,8	26	14,57	14,42	14,61	0,05

Illustration 8 – Influence de l'épaisseur des électrodes pour l'éthanol et l'azote (ou air) avec les sondes de diamètre 50 mm

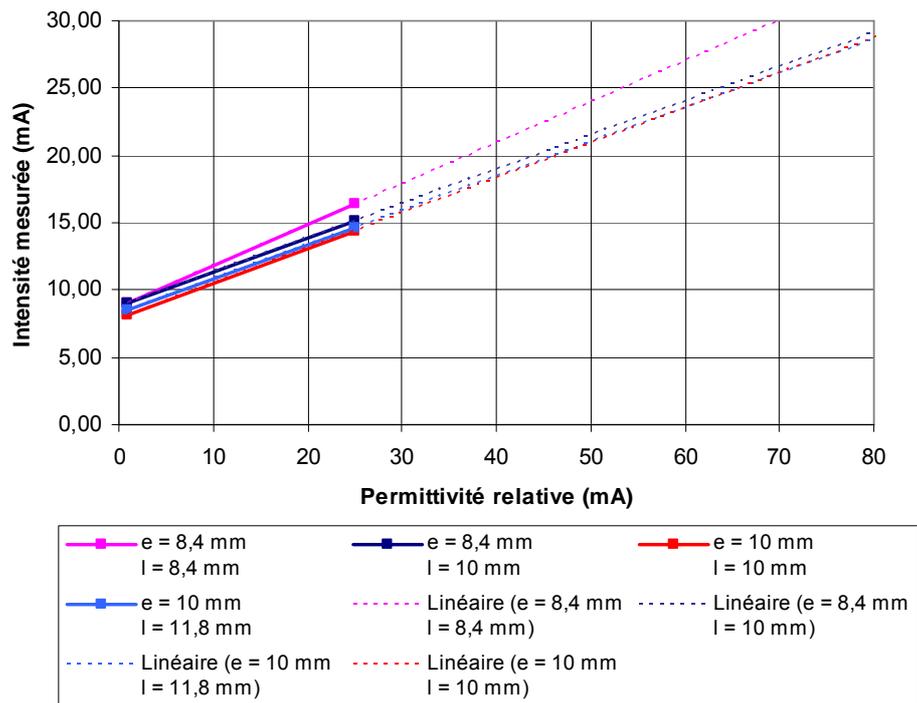


Illustration 9 - Influence de l'espacement des électrodes pour les trois milieux étalons : éthanol, air et azote

Ces illustrations montrent qu'à valeur constante de l'espacement inter-électrodes ($l = 10$ mm), l'augmentation de l'épaisseur des électrodes semble avoir tendance à diminuer l'offset et à augmenter la sensibilité de la mesure, tandis qu'à épaisseur constante ($e = 8,4$ mm ou $e = 10$ mm), une augmentation de l'espacement inter-électrodes tend à diminuer la sensibilité mais n'a pas une incidence nette sur la valeur de l'offset.

Ainsi, l'augmentation de la sensibilité et de l'offset lors du passage de l'Humilog à un Humitub de 50 mm de diamètre n'est que très faiblement compensée par des variations de géométrie des électrodes.

3.1.4. Influence du matériau des vis

La quantité de métal présente sur la canne pourrait également influencer les mesures. Des tests consistant à modifier le matériau des vis fixant les électrodes ont donc été conduits afin d'en déterminer l'influence. Plusieurs matériaux ont été ainsi testés : des vis inox (matériau utilisé par défaut), des pions en plastique, des vis en pvc, des vis en pvc graissée, des vis en pvc siliconées et en absence de vis, les trous scotchés.

L'illustration 10 présente les résultats obtenus dans l'air, l'eau et l'éthanol pour ces différents matériaux avec une sonde présentant les caractéristiques suivantes : $e = 8,4$ mm et $l = 8,4$ mm.

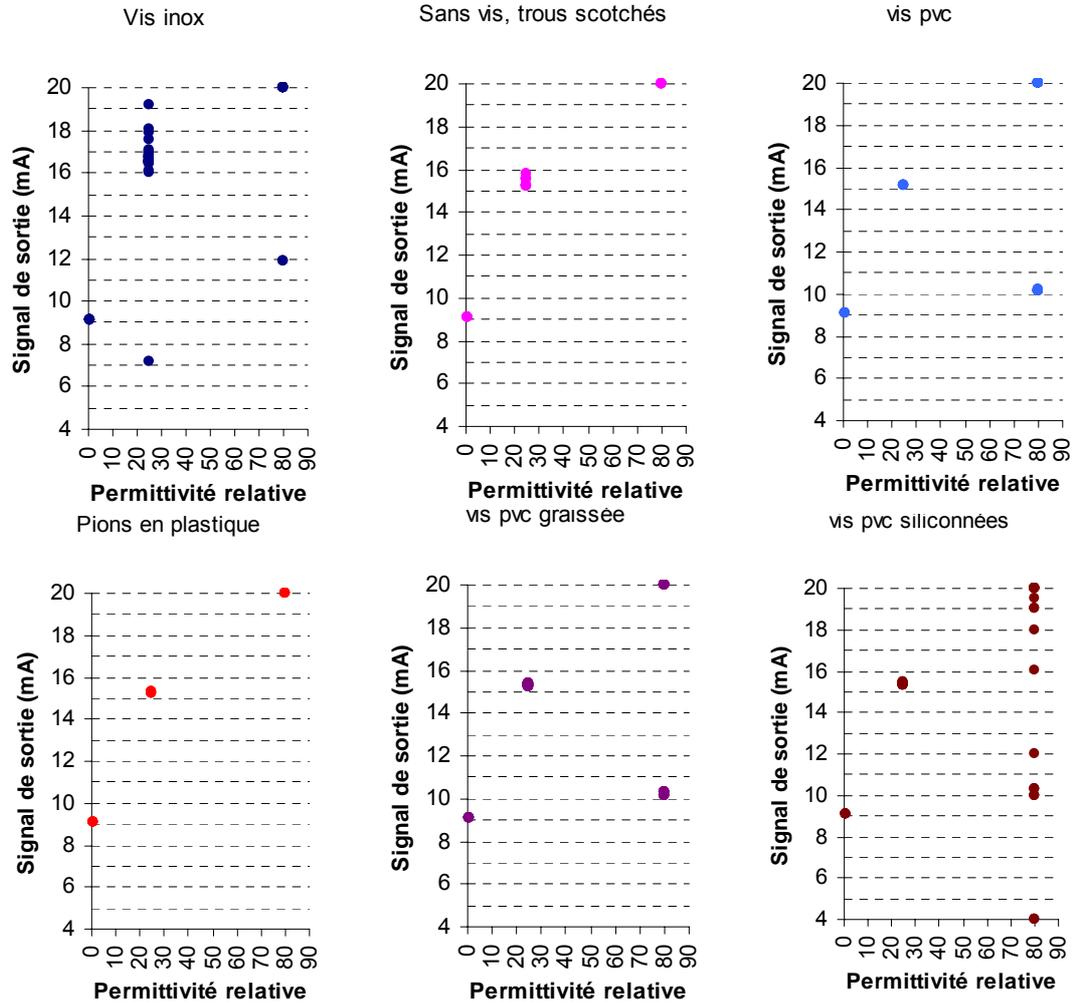


Illustration 10 – Résultats de la permittivité obtenue pour différents matériaux de vis

Comme le montre l'illustration 10, les différents matériaux de remplacement pour les vis ne semblent pas non plus avoir une nette influence sur les résultats obtenus en termes d'offset et de sensibilité des mesures. De plus, une dispersion des valeurs a été constatée dans l'éthanol avec des vis en inox, ce qui s'explique toutefois par une dérive liée à des intervalles de temps trop courts entre deux mesures successives. La mise en place de vis sans métal semble avoir résorbé cette dispersion, quelle que soit la nature des vis utilisées. Par ailleurs, ces mesures ont permis d'obtenir, en l'absence de vis, des valeurs stables situées autour de 20 mA dans de l'eau, et variant entre 10 mA et 20 mA dans les autres cas, y compris avec des vis en inox. Ce fait est étrange comparé aux résultats montrés sur l'illustration 9 pour lesquels la valeur dans l'eau avait été jugée trop fluctuante (observation que l'on retrouve dans le cas des vis PVC siliconnées), mais demanderait à être confirmé en appliquant un protocole expérimental rigoureusement identique avec un grand nombre de mesures successives.

Des tests similaires avaient également été effectués par Hemmati (2006), dans du sable (44 kg), afin de tester deux configurations des cannes ($e = 11,8$ mm, $d = 50$ mm,

l = 10 mm), avec ou sans isolant autour des électrodes en inox, l'isolant étant constitué de latex mis en place autour de celles-ci. Les résultats obtenus pour ces deux configurations sont présentés sur l'illustration 11.

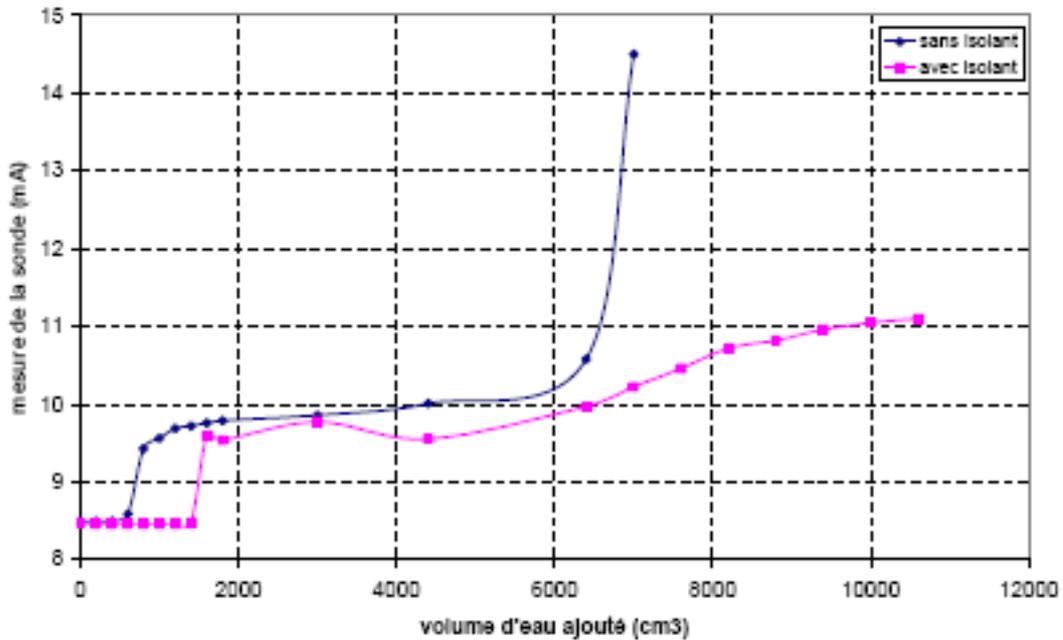


Illustration 11 – Mesure de la permittivité en fonction du volume d'eau ajouté dans le sable (Hemmati, 2006)

Ce graphique montre qu'en l'absence d'isolant, la sonde semble connaître l'effet de saturation après l'ajout de 7 000 cm³ d'eau alors que le sable est relativement proche de la saturation ($S_r = 0,78$). En présence de l'isolant en revanche, la valeur reste toujours comprise entre 10 et 11,1 mA (valeur attendue dans le sable) même après ajout de plus de 10 000 cm³ d'eau. Ce résultat est comparable aux résultats obtenus par Gaudu *et al.* (1993) avec de la paraffine.

Ainsi, en ce qui concerne l'influence de la géométrie et de la nature des matériaux de la sonde, le passage de l'Humilog à l'Humitub semble avoir eu pour effet d'augmenter l'offset et la sensibilité de la mesure, avec comme incidence un dépassement de la limite supérieure de la gamme des mesures (4 – 20 mA). Ce dépassement ne semble pas avoir pu être compensé par la diminution de l'épaisseur des électrodes, ni par l'augmentation de la longueur inter-électrode, ni par la modification du matériau des vis destinées à fixer les électrodes. En revanche, la mise en place d'un isolant sur les électrodes paraît modifier avantageusement les mesures (le dépassement de la gamme semble retardé) mais réduit considérablement la sensibilité du dispositif.

3.2. TEST DU RAYON D'INFLUENCE ET COMPARAISON AVEC LA SONDE TDR

Le test du rayon d'influence de l'Humitub a été réalisé dans le laboratoire du CERMES (Centre d'Enseignement et de Recherche en Mécanique des Sols) à l'École Nationale des Ponts et Chaussées (Martin, 2007), dans le cadre du travail de recherche doctorale de Sahar Hemmati, en préalable à un étalonnage des sondes Humitub sur le matériau de Mormoiron. Ces mesures ont été réalisées en parallèle avec une sonde TDR afin de vérifier la concordance des résultats. La sonde Humitub utilisée présente les caractéristiques suivantes : une épaisseur et un espacement des électrodes de 8,4 mm, un diamètre de 50 mm et des vis en PVC.

Dans un premier temps, des expérimentations simples ont été mises en œuvre afin de déterminer les rayons d'influence des sondes Humitub et TDR ainsi que leur influence mutuelle. L'Humitub présentant le plus souvent de fortes fluctuations dans l'eau, ces mesures ont été réalisées uniquement dans de l'éthanol. Les mesures de permittivité ont été effectuées dans un récipient en PEHD de 27 cm de diamètre intérieur.

Rayon horizontal

L'objectif des mesures est de déterminer la distance à partir de laquelle les bords du récipient n'ont plus d'influence. Les premières mesures sont effectuées au centre du récipient puis l'Humitub est déplacé toutes les 5 minutes radialement vers le bord du récipient avec un pas de 1 cm puis de 0,5 cm à proximité du bord, les mesures étant ensuite renouvelées en partant du bord vers le centre pour vérification.

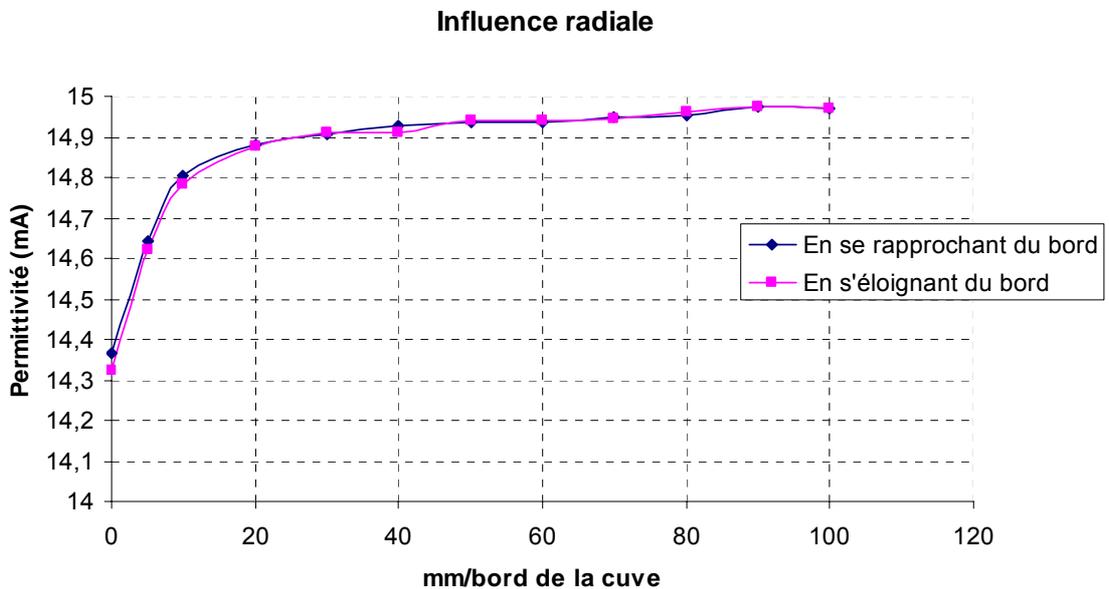


Illustration 12 - Mesures Humitub de la permittivité en fonction de l'éloignement par rapport au bord du récipient

Ces mesures permettent de mettre en évidence qu'à partir de 90 mm, le bord de la cuve n'a visiblement plus d'influence sur la valeur de la permittivité. Ainsi, le rayon d'influence horizontal de la sonde Humitub est de l'ordre de 90 mm, légèrement inférieur à ce qui était indiqué par les modélisations réalisées lors de la mise au point de l'appareil, lesquelles indiquaient des valeurs de l'ordre de 15 cm. Toutefois, il faudrait réaliser des mesures dans une cuve de taille supérieure pour valider ces résultats (le rayon de la cuve devant être au moins deux fois plus important que le rayon d'influence présumé de la sonde).

Rayon vertical

D'autres mesures ont été réalisées sur le même principe pour déterminer le rayon d'influence vertical (Illustration 13). L'expérience est réalisée dans la même cuve plastique de 27 cm de diamètre : la sonde est placée en fond de cuve et l'éthanol est versé dans la cuve jusqu'à atteindre le niveau des deux électrodes. Ensuite, de l'éthanol est ajouté toutes les cinq minutes de manière à augmenter l'épaisseur de recouvrement d'éthanol au dessus de l'électrode par pas de 1 cm, jusqu'à ce que la mesure se stabilise autour de la valeur correspondant à l'éthanol.

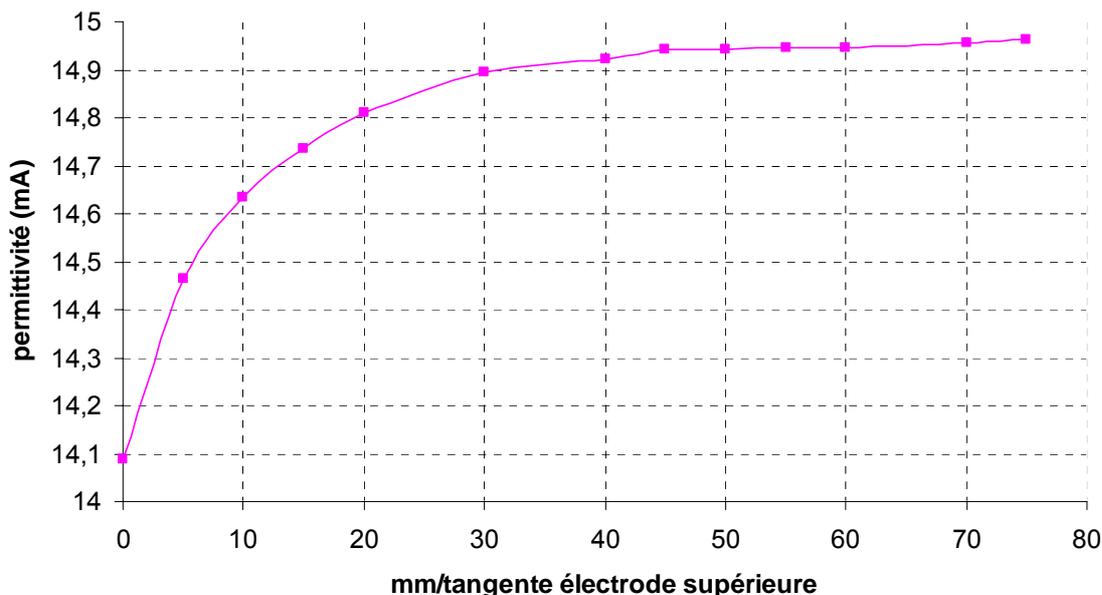


Illustration 13 - Mesures Humitub de la permittivité en fonction de l'éloignement par rapport à l'interface éthanol-air

Le rayon d'influence verticale obtenu est d'environ 50 mm. Toutefois, ces résultats devront être vérifiés car le protocole expérimental adopté ne tient pas compte de l'influence du sol et du fond de la cuve sur les mesures : il n'est donc pas exclu que le système soit influencé par le front éthanol-air et par le fond de la cuve, ce qui peut contribuer à biaiser les résultats.

Comparaison avec la sonde TDR

Ces mêmes mesures ont été réalisées pour la sonde TDR (Illustration 14) avec une zone d'influence horizontale non circulaire, la sonde TDR ne possédant pas une géométrie de révolution comme l'Humitub. Ainsi, pour le test du rayon d'influence horizontale, les deux configurations (dans le plan perpendiculaire et dans le plan parallèle aux électrodes) ont été testées. Les résultats de ces deux expériences sont respectivement montrés sur l'illustration 15 et l'illustration 16.

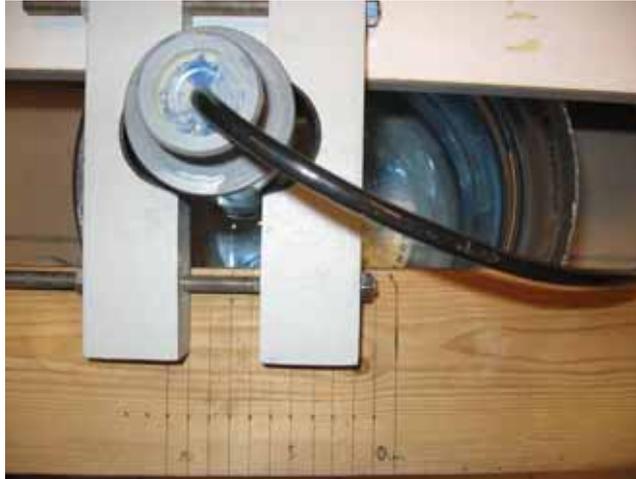


Illustration 14 - Dispositif expérimental pour la mesure du rayon d'influence de la sonde TDR

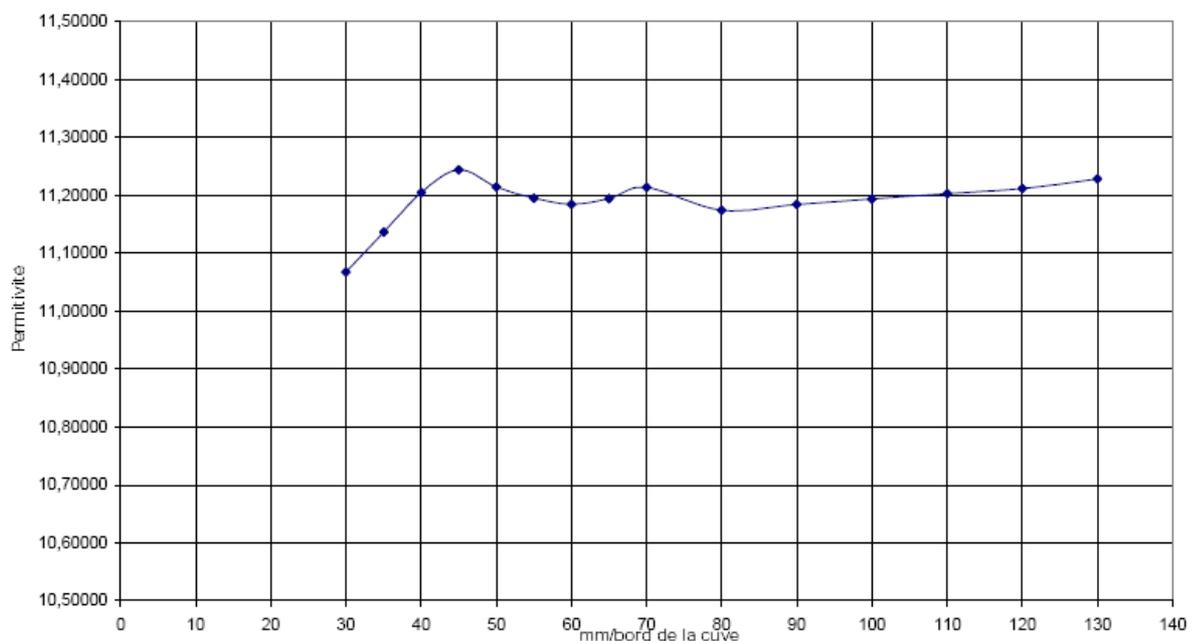


Illustration 15 - Mesures TDR dans l'éthanol de la permittivité par rapport à l'éloignement du bord de la cuve dans le plan perpendiculaire aux électrodes (les électrodes sont situées à 40 mm du bord de la gaine de la sonde)

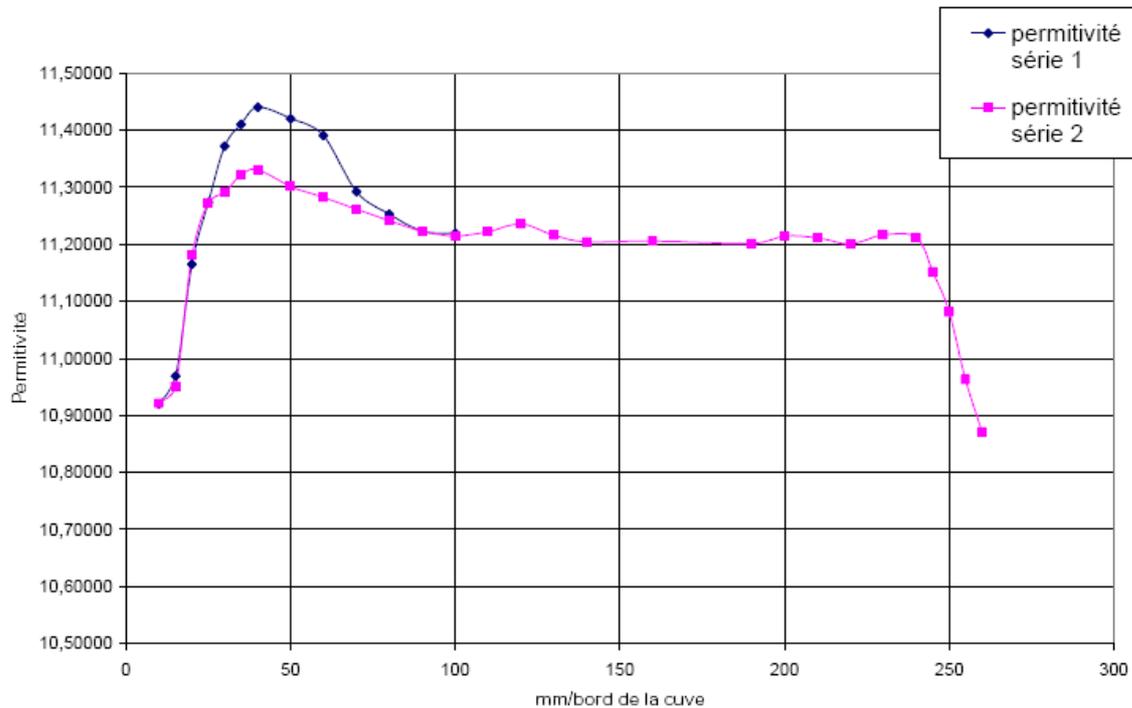


Illustration 16 - Mesures TDR de la permittivité par rapport à l'éloignement du bord de la cuve dans le plan parallèle aux électrodes (les électrodes sont situées à 50 mm du bord de la gaine de la sonde)

Le rayon d'influence horizontal de la sonde TDR dans le plan perpendiculaire aux électrodes, est d'environ 40 mm par rapport à l'extrémité de la sonde. Le rayon d'influence TDR dans le plan parallèle aux électrodes est d'environ 30 à 40 mm par rapport au bord de la sonde. Il est à noter que les courbes obtenues présentent un (voire 2) pics, ce qui pourrait être dû à la géométrie de la sonde TDR cumulée à de légères modifications de l'orientation lors de la réalisation des mesures.

Ce test du rayon d'influence de chacune des deux sondes a donc permis de confirmer que le rayon d'influence de l'Humitub est supérieur à celui de la sonde TDR.

3.3. LA TEMPERATURE

La température pourrait influencer de manière significative sur les mesures Humitub, et ceci de manière multiple : d'une part, la température pourrait avoir une influence au niveau de la mesure de la permittivité elle-même (influence sur la sonde) mais elle pourrait également jouer un rôle sur le dispositif d'acquisition (multiplexeur) lorsque celui-ci est placé en extérieur. Cette dernière observation a déjà été décrite par Rosnoblét (2002) à propos de la sonde TDR.

Une première partie rappelle les courbes d'étalonnage obtenues avec la sonde Humitub. Dans une seconde partie, les sources d'erreurs potentielles liées à l'influence de la température sont évaluées.

3.3.1. Courbe d'étalonnage de la mesure de température par la sonde Humitub

L'illustration 17 présente les résultats d'étalonnage en vue de déterminer la relation entre la valeur mesurée par le capteur de température associé à la sonde Humitub et la température réellement mesurée à l'aide d'un thermomètre (Martin, 2007). Cette illustration combine plusieurs séries de mesures réalisées dans du sable. La relation entre la température réelle et le signal indiqué en sortie du capteur de température de la sonde Humitub est bien linéaire. Elle est proche de celle déjà déterminée par Hemmati (2006) sur une gamme de température plus restreinte, à savoir : $T = 8,2 I - 59,6$.

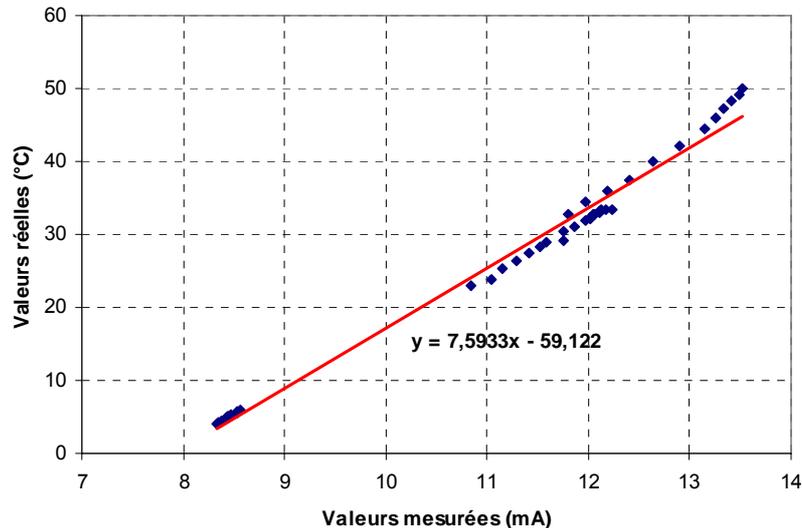


Illustration 17 - Relation entre la température réelle et la valeur brute indiquée par le capteur de température de la sonde Humitub

Dans les expériences qui suivent, la température et l'humidité sont enregistrées conjointement par la sonde Humitub et c'est donc cette dernière relation expérimentale ($T = 7,6 I - 59,1$) qui est utilisée pour évaluer la température à partir des mesures du capteur de la sonde Humitub.

3.3.2. Influence de la température sur les valeurs d'humidité mesurées à l'Humitub

L'influence de la température sur les valeurs de permittivité mesurées par l'Humitub peut être observée au laboratoire ou *in situ*, sur les sondes installées dans les sols du Deffend et de Mormoiron. Cette partie expose l'ensemble des résultats obtenus en laboratoire puis *in situ*.

En laboratoire

Ces tests ont été réalisés dans deux types de sol : un sol limoneux et un sol sableux (Martin, 2007).

Sol limoneux

Des mesures de la température et de l'humidité ont été réalisées dans un matériau limoneux (*Limon de Jossigny*) au laboratoire du CERMES. Les caractéristiques granulométriques de ce matériau (limon peu plastique) sont indiquées sur l'illustration 18. La sonde Humitub utilisée présente les caractéristiques suivantes : $d = 50$ mm, e et $l = 8,4$ mm. Deux modes opératoires différents sont mis en œuvre selon que les températures observées sont supérieures ou inférieures à la température ambiante. Le matériel utilisé est constitué d'une cuve en PVC de 215 mm de diamètre intérieur, de 18 kg de limon sec, d'un thermostat, d'un réfrigérateur et d'un compacteur. Il est à noter que, compte tenu du rayon d'influence de la sonde Humitub, un diamètre de cuve supérieur aurait été souhaitable.

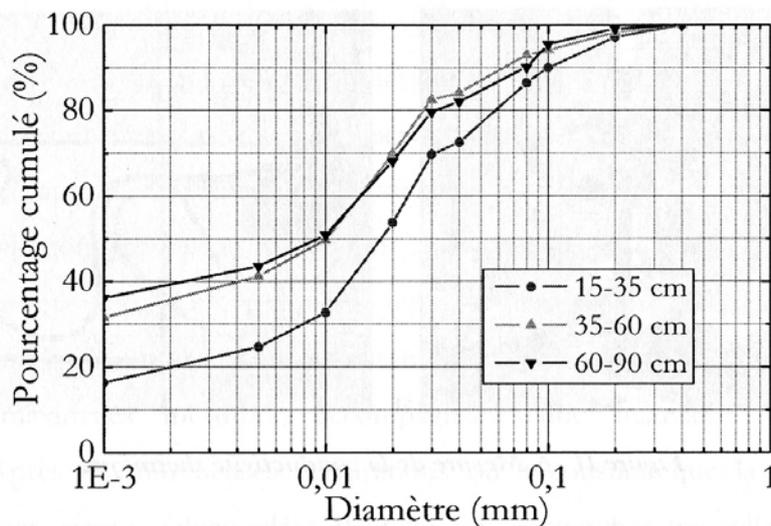


Illustration 18 – Courbe granulométrique du limon de Jossigny (Mantho, 2005)

Pour les températures supérieures à la température ambiante, 18 kg de limon sec sont placés dans la cuve et compactés à énergie de compactage constante (1,093 kNm/m³) autour de la sonde Humitub (Illustration 19), dont l'extrémité inférieure est placée à 10 cm du fond de la cuve. La cuve est ensuite plongée dans un bain-marie d'eau chauffée jusqu'à obtenir une température du sol de 35 à 40°C. Une fois cette température atteinte, le dispositif chauffant est retiré et les mesures sont alors effectuées à l'aide de l'Humitub, alors que le massif de sol se refroidit progressivement à température ambiante. Des mesures manuelles sont également effectuées afin de vérifier la relation entre la température mesurée et la température réelle.



Illustration 19 – Compactage du sol autour de la sonde Humitub



Illustration 20 – Cuve placée dans un bain-marie pour mesurer la permittivité à des températures supérieures à la température ambiante

Pour les températures inférieures à la température ambiante, la cuve contenant la même masse de sable est placée dans un réfrigérateur permettant d'obtenir des valeurs de températures allant jusqu'à 4°C. La sonde est ensuite placée dans le sable refroidi et le sol est compacté avec la même énergie de compactage autour de la sonde. Les mesures de température et d'humidité sont réalisées tandis que la température du sol augmente jusqu'à atteindre la température ambiante.

L'illustration 21 présente les résultats obtenus lors de cette expérimentation, les deux séries de mesures (températures inférieures et supérieures à la température ambiante) étant placées sur le même graphique.

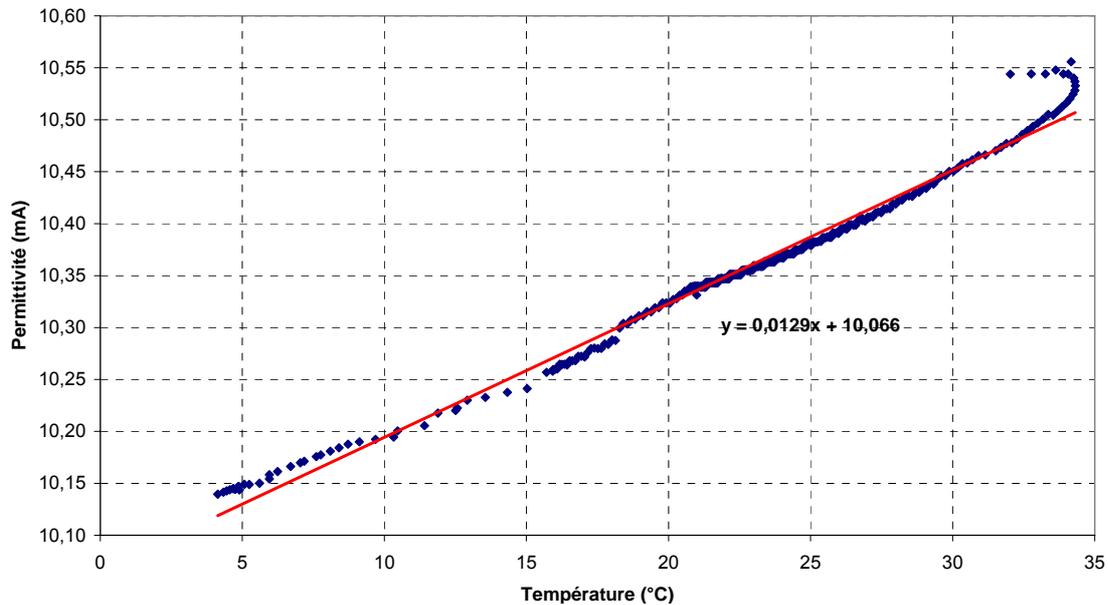


Illustration 21 – Influence de la température sur la permittivité mesurée dans un limon sec

Cette illustration montre que la température a une légère influence sur la permittivité. La relation entre température et permittivité peut être considérée comme linéaire ; pour une augmentation de température de 10 °C, la permittivité augmente de 0,13 mA, soit une augmentation d'environ 1 % sur la mesure de permittivité et de 0,5 points sur la valeur de teneur en eau massique. Par exemple, si la température d'un sol limoneux passe de 23 °C l'été à 3 °C en hiver, la teneur en eau massique en été est surestimée d'environ 1,05 points par rapport à l'hiver, ce qui reste relativement modeste.

Dans un sol sableux

L'illustration 22 présente la synthèse des mesures effectuées aux basses températures et aux hautes températures dans un sable. Ces deux expériences ont été effectuées avec la même configuration de sonde Humitub ($d = 50$ mm, e et $l = 8,4$ mm), dans la cuve PVC, en laissant un intervalle de 2 minutes (à basse température) ou 5 minutes (aux hautes températures) entre deux mesures successives.

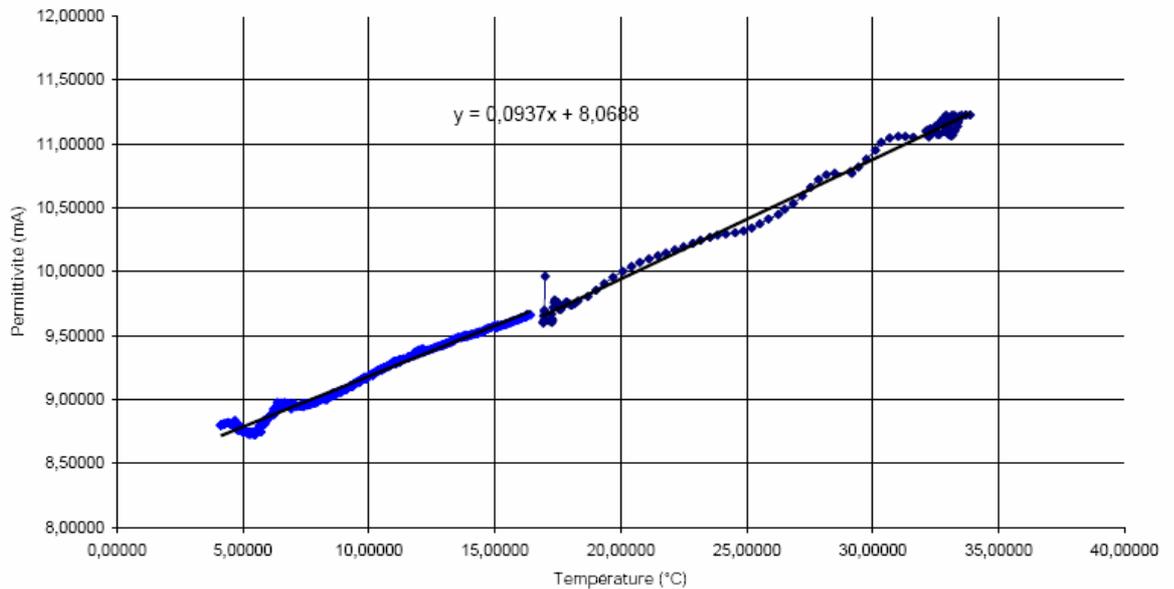


Illustration 22 - Influence de la température sur la mesure de la permittivité de l'Humitub dans les sables

L'évolution de la permittivité mesurée par l'Humitub en fonction de la température est linéaire. Le coefficient directeur de cette droite est de 0,09 mA par °C, soit une évolution de la teneur en eau massique de 2 à 9,5 % quand la température passe de 5 à 25 °C, valeurs couramment observées dans les sols à faibles profondeurs. Cette valeur est relativement importante, compte tenue de la faible sensibilité de l'Humitub aux variations hydriques d'un sable (cf. paragraphe 4.1).

Ces observations montrent que dans le cas d'un sol sableux, le signal de sortie enregistré est très influencé par la température. Au contraire, dans un sol limoneux, l'influence de la température est relativement faible ce qui est encourageant compte tenu du type de sols étudiés (plutôt argileux). Ces observations devront cependant être poursuivies dans d'autres milieux.

Mesures in situ

Sur les sites du Deffend et de Mormoiron, sont également souvent observées des variations journalières. Deux types de résultats sont présentés : les résultats issus des mesures habituelles et un test de curiosité pour lequel le pas de temps des mesures a été augmenté sur le site de Mormoiron.

Mesures habituelles

L'enregistrement des mesures de permittivité sur le site de Mormoiron traduit nettement un effet de la température sur le dispositif de mesure, avec une évolution plus ou moins sinusoïdale, de période journalière, visible à toutes les profondeurs, en particulier à 3,5 m (Illustration 23) où pourtant toute fluctuation de température du sol à

l'échelle de la journée est exclue comme le montre un simple calcul utilisant l'équation de la chaleur, ce qui est confirmé par l'enregistrement des températures à cette profondeur (Illustration 33). Ce type de fluctuation n'a pu être enregistré nettement sur le site du Deffend pour lesquels seules deux mesures journalières sont réalisées (contre 8 mesures journalières à Mormoiron).

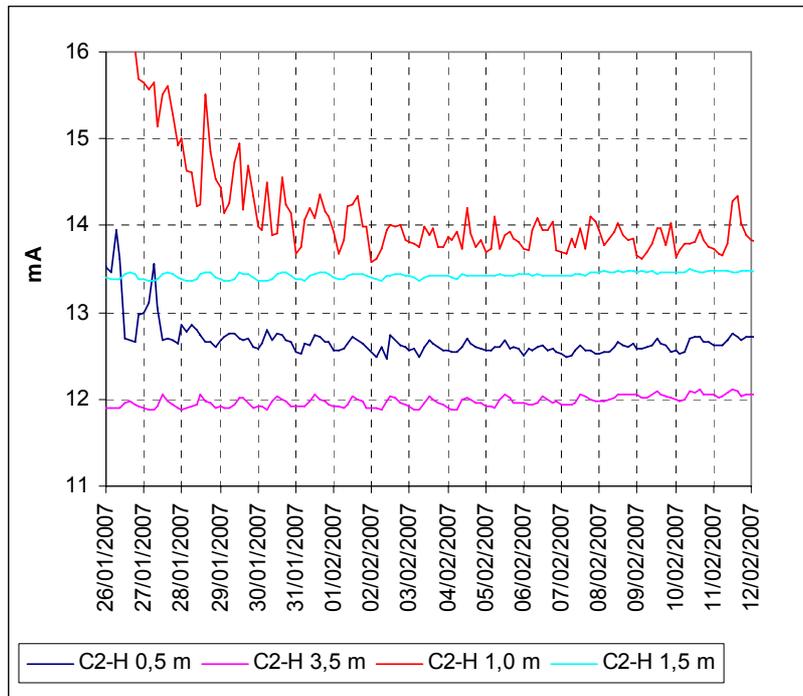


Illustration 23 – Fluctuations journalières des mesures d'humidité réalisées avec l'Humitub à différentes profondeurs sur le site de Mormoiron (26/01/07 – 12/02/07)

Cet effet avait déjà été observé par Rosnoblet (2002) avec des sondes TDR. Afin de le préciser, il a mené une expérimentation en chambre climatisée, à température de l'air contrôlée, dans laquelle il a placé le boîtier de mesure, le multiplexeur et la sonde TDR. Cette dernière a été placée dans un grand récipient de sol remanié afin de conserver une température constante à son niveau. Par comparaison avec des valeurs d'humidité mesurée par la méthode des cylindres, Rosnoblet observe une diminution de l'ordre de 0,5 % de l'humidité volumique mesurée pour chaque sonde TDR pour une augmentation de température de 10 °C. La température semble avoir un impact identique sur tous les canaux du multiplexeur et l'effet observé a été considéré comme relativement indépendant de la valeur de l'humidité.

Ainsi, les fluctuations journalières de températures au niveau du multiplexeur semblent avoir une influence sur les mesures de permittivité enregistrées par les sondes Humitub et vont dans le sens d'une augmentation apparente de l'humidité quand la température diminue (effet inverse de celui observé directement sur la sonde). Cependant, ces fluctuations journalières sont toujours observées dans le même sens

mais ne sont pas constantes au cours du temps et peuvent s'interrompre à certaines périodes.

Test de curiosité

Afin de vérifier ces résultats, le pas de temps de mesure *in situ* a été modifié sur le site de Mormoiron et est passé à 1 h puis 30 minutes sur une durée de 6 jours entre le 19/06/07 et le 25/06/07.

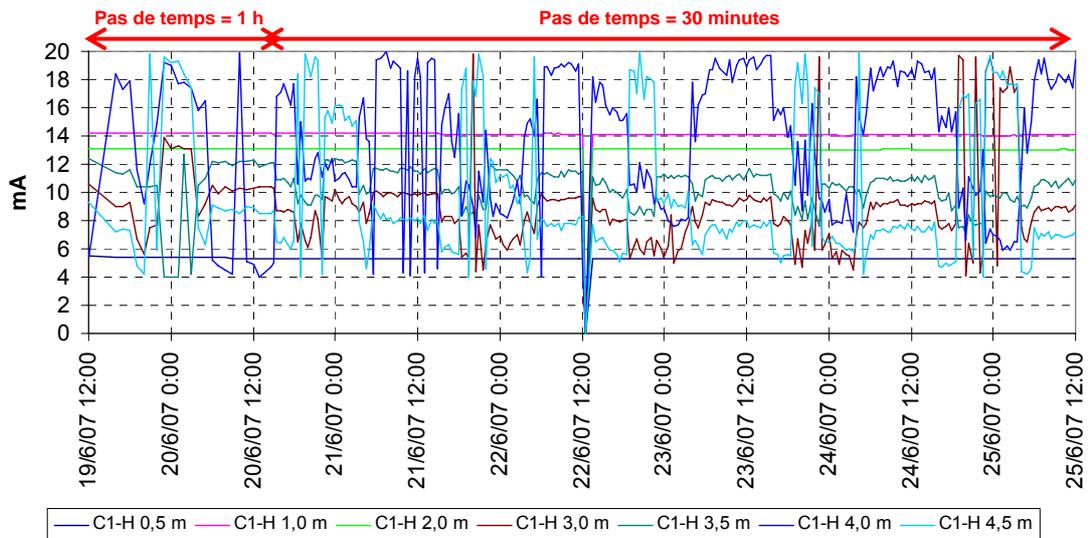


Illustration 24 - Fluctuations journalières des mesures d'humidité réalisées avec l'Humitub à différentes profondeurs sur la canne 1 avec un pas de temps de 1 h puis de 30 minutes – site de Mormoiron

L'illustration 24 montre deux types de comportement différent selon que le signal de sortie de l'Humitub correspond ou non à un état de saturation, ceci entre le 19/06/07 à 12 h et le 25/06/07 à 12 h. Pour les trois capteurs de la canne 1 qui sont loin de l'état de saturation, à savoir ceux situés à 0,5 m, 1 m et 2 m de profondeur, aucune variation sur 24 h n'est observée. En revanche, les autres capteurs dits « saturés » (à 0,5 m, 1,5 m, 2 m, 2,5 m et 3,5 m de profondeur) présentent tous des fluctuations périodiques journalières d'amplitude variable mais dont les formes sont identiques.

Si l'influence de la température (ou d'un autre paramètre restant à déterminer, qui présenterait également des variations à l'échelle journalière) sur la valeur de l'intensité mesurée semble réelle, sa quantification se révèle en revanche difficile à partir des seules mesures réalisées *in situ*. Il se peut par exemple, que l'effet de la température soit différent selon la valeur moyenne de la teneur en eau, ce qui pourrait expliquer les résultats obtenus pour les capteurs « saturés ». De nouveaux tests en laboratoire, similaires à ceux réalisés par Rosnoblet (2002), sont envisagés dans le but de compléter et de quantifier ces observations.

3.4. COMPREHENSION DE LA « SATURATION » DES CAPTEURS

Afin de mieux comprendre l'état dit « de saturation » du capteur, qui correspond à des valeurs fluctuantes, il est intéressant de regarder de près les valeurs obtenues pendant, avant et après les périodes de saturation.

L'illustration 25 présente les résultats d'une expérience réalisée en laboratoire en vue d'une approche préliminaire qualitative (Vincent *et al.*, 2006). Elle montre qu'après un brusque ajout de 3 litres d'eau dans une cuve de 80 litres de matériau argileux prélevé sur le site de Mormoiron, le capteur sature à partir d'une valeur d'intensité de sortie d'environ 13,8 mA.

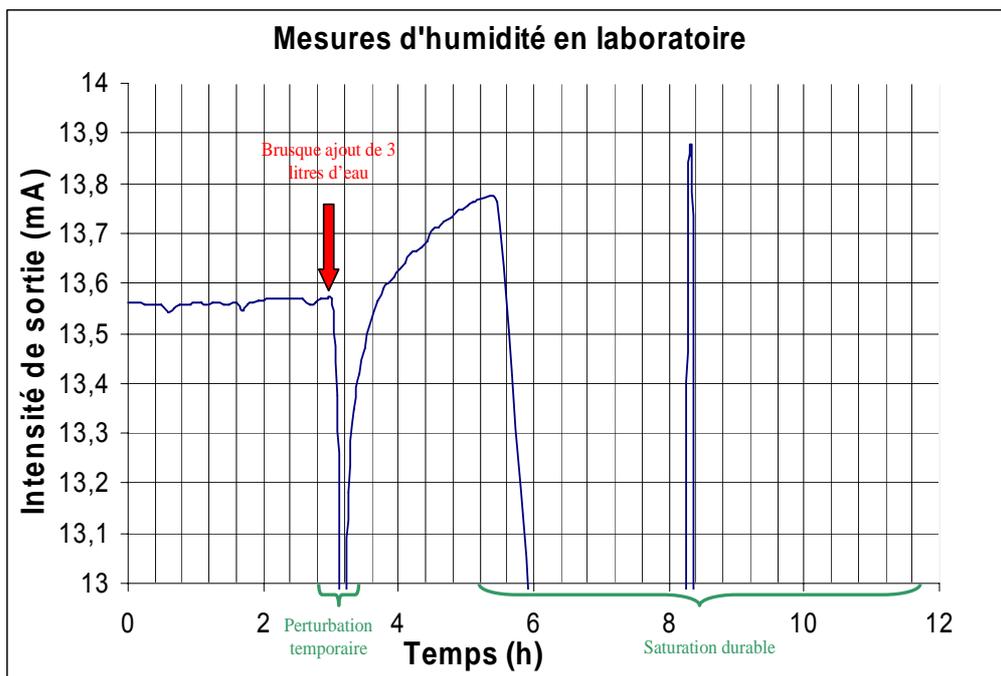


Illustration 25 – Évolution de l'intensité en sortie des capteurs en présence d'une variation d'humidité – mesure en laboratoire (Vincent *et al.*, 2006)

De même, Hemmati (2006) a observé le phénomène de saturation du capteur dans du sable après ajout d'eau : avant d'entrer en saturation, le capteur indique une valeur d'environ 13,8 mA qui est interprété comme correspondant à l'arrivée du front d'humidification au niveau de la première électrode du capteur. Ensuite, les valeurs fournies oscillent entre 4 à 20 mA alors que les deux électrodes sont probablement toutes les deux situées dans un matériau à forte humidité.

Sur les mesures *in situ* à Mormoiron, les périodes où le capteur indique des valeurs autour de 13,8 mA précèdent ou suivent le plus souvent des phases où les fluctuations sont importantes, ce qui semble confirmer les observations de Hemmati (2006) en laboratoire. Une situation exactement analogue à celle observée en laboratoire s'est par exemple produite sur la canne 2 à 1 m de profondeur, en janvier 2007.

Les tests devront être poursuivis en laboratoire où les conditions opératoires sont mieux contrôlées qu'*in situ*, pour pouvoir comprendre plus précisément ce qui déclenche les épisodes de saturation et définir si la teneur en eau peut être extrapolée à partir des mesures fluctuantes lorsque celles-ci oscillent autour d'une valeur donnée où si ces valeurs sont complètement aléatoires.

4. Courbe d'étalonnage entre permittivité et teneur en eau dans différents matériaux

Jusqu'alors, une seule courbe d'étalonnage a été réalisée pour interpréter les valeurs de la permittivité obtenues *in situ* sur chacun des sites du Deffend et de Mormoiron en termes de teneur en eau volumique. Cette courbe a été déterminée par interpolation de mesures obtenues dans trois milieux gazeux ou liquides de permittivité bien connue : l'air, l'éthanol et l'eau. Cependant il paraît important de vérifier si l'utilisation d'un matériau solide ne provoque pas de décalage ou de dérive par rapport à ces milieux étalons, ce qui se traduirait par une relation différente voire une courbe de corrélation non linéaire entre signal de sortie et teneur en eau volumique.

Afin d'approcher au mieux ces effets, il est souhaitable de réaliser des mesures d'étalonnage préalable dans les milieux étudiés et notamment les matériaux argileux des sites du Deffend et de Mormoiron. Les premières mesures réalisées concernent un matériau simple à manipuler et homogène : un sable siliceux propre de la formation du *Sable de Fontainebleau*. Ensuite, elles ont été réalisées dans un limon. Malheureusement, le test d'étalonnage n'a pas encore pu être réalisé dans les sols argileux prélevés au Deffend et à Mormoiron.

4.1. RESULTATS DANS LE SABLE

Les essais d'étalonnage de l'Humitub présentés ici ont été réalisés dans le laboratoire du CERMES (Martin, 2007). La sonde Humitub utilisée présente toujours les caractéristiques suivantes : une épaisseur et un espacement des électrodes de 8,4 mm, un diamètre de 50 mm et des vis en PVC. L'étalonnage est réalisé à température ambiante dans une cuve en PVC de 500 mm de hauteur et de 215 mm de diamètre intérieur. Le sable, de poids volumique 26 kN/m^3 , est initialement placé dans la cuve, mélangé avec de l'eau pour obtenir la teneur en eau souhaitée et compacté. La teneur en eau est ensuite mesurée manuellement par pesée. Les mesures de permittivité sont réalisées sur de longues durées afin d'avoir un grand nombre de valeurs.

L'illustration 26 présente les résultats de la permittivité mesurée en fonction de la teneur en eau volumique du sable en considérant la moyenne mesurée (ou la médiane dans le cas de 20 % d'humidité dans le sable).

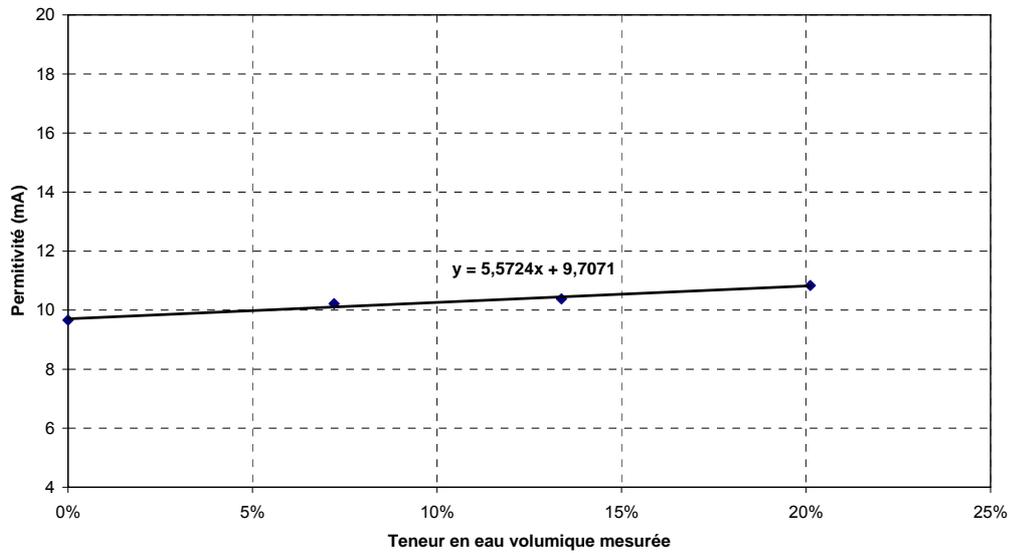


Illustration 26 – Valeur de la permittivité mesurée en fonction de la teneur en eau du sable pour la sonde Humitub (Martin, 2007)

L'illustration 26 montre que jusqu'à une teneur en eau volumique de 20 % (ce qui correspond à une teneur en eau massique d'environ 12 % et un degré de saturation de l'ordre de 0,6), la permittivité augmente quasi-linéairement avec la teneur en eau. Au-delà, la mesure obtenue présente des fluctuations (non présentées ici). La gamme de variation du signal de sortie est cependant très faible (comprise entre 9,7 et 11 mA) mais est comparable (quoique légèrement inférieure) à celle obtenue avec une sonde TDR qui présente une valeur de permittivité augmentant également linéairement entre 4 et 5,8 mA, donc fortement décalée vers des valeurs plus faibles (Illustration 27).

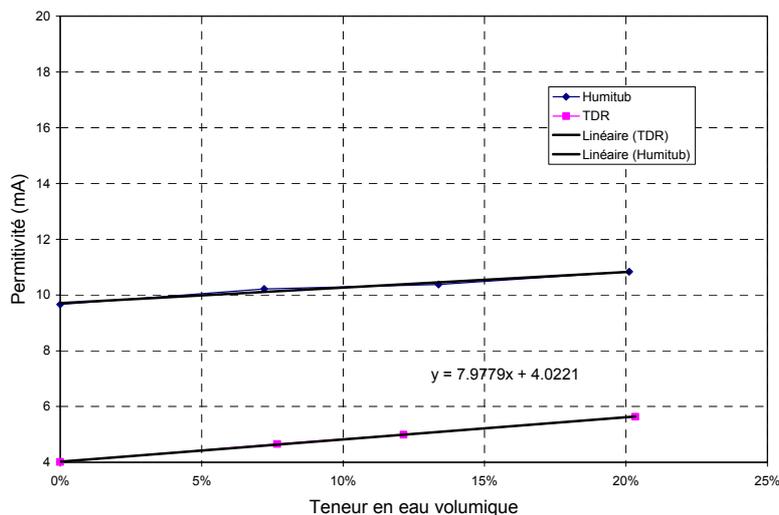


Illustration 27 – Permittivité en fonction de la teneur en eau pour les sondes Humitub et TDR dans un sable (Martin, 2007)

Ainsi, dans un sable, pour des teneurs en eau volumiques inférieures à 20 %, la relation entre la permittivité mesurée I_m (en mA) et la teneur en eau volumique w_v (en %) vaut $I_m = 5,5724 w_v + 9,7071$. Au-delà de cette teneur en eau, le capteur donne des valeurs fluctuantes. Ces mesures ont été réalisées à température ambiante supposée constante au cours de l'expérience.

4.2. RESULTATS DANS UN LIMON

Le limon considéré dans ces expériences présente une masse volumique de $2,72 \text{ t/m}^3$. Le protocole de mesure utilisé est le même que celui décrit dans le cas du sable.

L'illustration 28 présente les résultats obtenus dans un limon à l'aide de l'Humitub et de la sonde TDR. Elle montre que, comme pour le sable, quel que soit l'appareil de mesure utilisé, la permittivité mesurée augmente linéairement avec la teneur en eau volumique. Les deux appareils sont donc adaptés pour évaluer les variations de teneur en eau d'un sol limoneux.

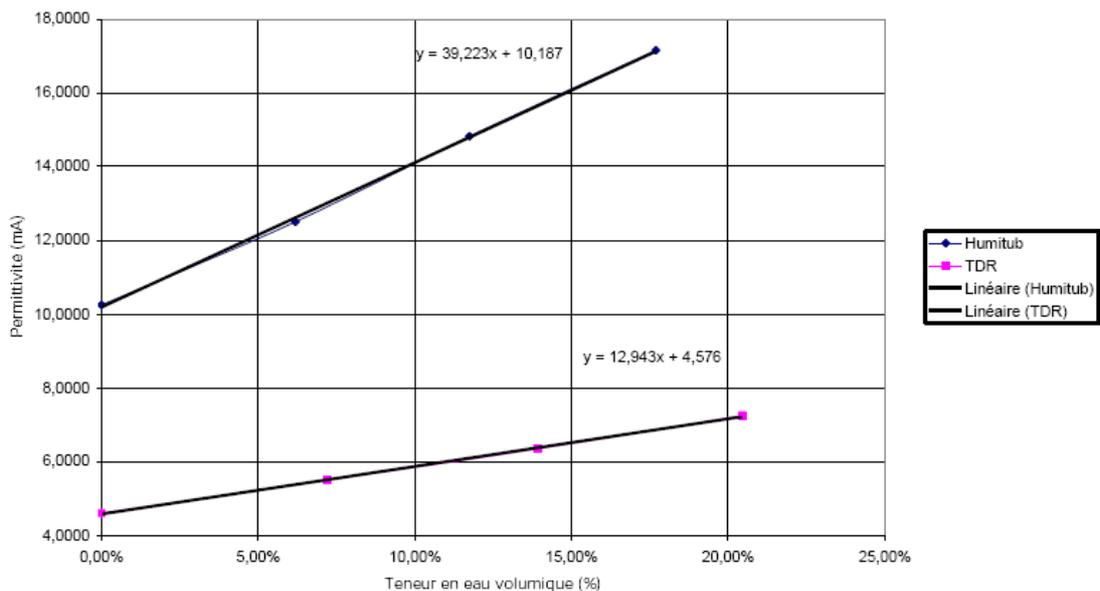


Illustration 28 - Permittivité en fonction de la teneur en eau pour les sondes Humitub et TDR dans un limon (Martin, 2007)

Dans le limon, les pentes des courbes obtenues à l'aide des sondes Humitub et TDR sont plus fortes que celles obtenues dans le sable : 0,13 mA pour une variation de teneur en eau de 1 % dans le cas de la sonde TDR et 0,38 mA pour une variation de teneur en eau de 1 % dans le cas de l'Humitub. La sonde Humitub présente une sensibilité environ trois fois supérieure à celle de la sonde TDR, même si son offset est plus élevé (de 5 à 6 mA supérieur).

Ainsi, dans un limon, pour des teneurs en eau volumique inférieures à 20 % et à une température de 22 °C, la relation entre la permittivité mesurée I_m (en mA) et la teneur en eau volumique w_v (en %) est la suivante : $I_m = 39,223 w_v + 10,187$.

4.2.1. Résultats dans un sol argileux

Dans les sols argileux, la mesure s'avère plus délicate à réaliser car le matériau se manipule plus difficilement et il n'est pas aisé de le mettre en place dans un récipient de manière homogène pour reconstituer un massif de sol présentant les mêmes caractéristiques que le sol *in situ*. La seule approche pour y parvenir consiste à sécher le matériau, le broyer, le tamiser pour enlever les éléments supérieurs à 50 μm , le ré-humidifier à une teneur en eau adaptée puis le mettre en place sous forme de couches successives compactées. Les tests d'étalonnage n'ont pas encore été réalisés dans ce type de matériau mais le seront prochainement.

4.2.2. Conclusions partielles

A ce stade et même si ce travail doit être poursuivi, les mesures d'étalonnage déjà entreprises en laboratoire en collaboration avec le CERMES sont encourageantes puisque dans le sable comme dans les limons, les deux courbes de calibration sont des droites, ce qui confirme la capacité de l'Humitub à caractériser de manière simple la teneur en eau du matériau, au moins entre 0 et 20 % (en volume). De plus, la sonde Humitub présente un très net avantage dans le cas des limons avec une sensibilité trois fois plus forte que celle de la sonde TDR. Cet essai devra être poursuivi sur différents types de sols comme les limons et les argiles prélevées sur les sites du Deffend et de Mormoiron.

5. Suivi et interprétation des mesures enregistrées sur le site de Mormoiron

5.1. RESULTATS DES MESURES

Cette partie présente l'ensemble des résultats obtenus sur le site de Mormoiron entre décembre 2004 et juin 2007, à savoir les données pluviométriques, les données de températures enregistrées et les valeurs d'intensité mesurées dans le sol pour estimer la teneur en eau, ainsi que les déplacements enregistrés par les extensomètres installés sur le site le 19 décembre 2006 et fonctionnels depuis le 9 janvier 2007.

5.1.1. Mesure de la pluviométrie

Deux sources de données météorologiques sont disponibles : d'une part les données enregistrées par Météo-France depuis janvier 1964 à la station de Carpentras, située à environ 10 km du site, et d'autre part des données mesurées directement sur le site de Mormoiron depuis décembre 2004 par un pluviomètre installé et géré par le BRGM. L'illustration 29 et l'illustration 30 présentent les données pluviométriques journalières et mensuelles mesurées sur le site depuis fin 2004.

L'illustration 29 montre que la période allant de janvier 2006 à juin 2007 est caractérisée par quelques épisodes pluvieux pour lesquels le cumul journalier dépasse 40 mm d'eau (épisodes de fin janvier 2006, mi-juillet 2006 et début octobre 2006), avec notamment une très forte précipitation en juin 2007 dépassant 60 mm d'eau.

Au pas de temps mensuel (Illustration 30), l'année 2006 est caractérisée par de très faibles précipitations en avril, mai et juin, mais par des mois de juillet et août beaucoup plus humides. Sur cette année, les précipitations ont été plus régulières qu'au cours de l'année 2005 :

- absence de mois très fortement pluvieux (présentant une pluviométrie supérieure à 150 mm d'eau comme en avril et septembre 2005), le maximum mensuel atteint étant inférieur à 100 mm en hauteur d'eau ;
- un seul mois présentant une pluviométrie inférieure à 20 mm (le mois de juin 2006) contre 5 mois en 2005.

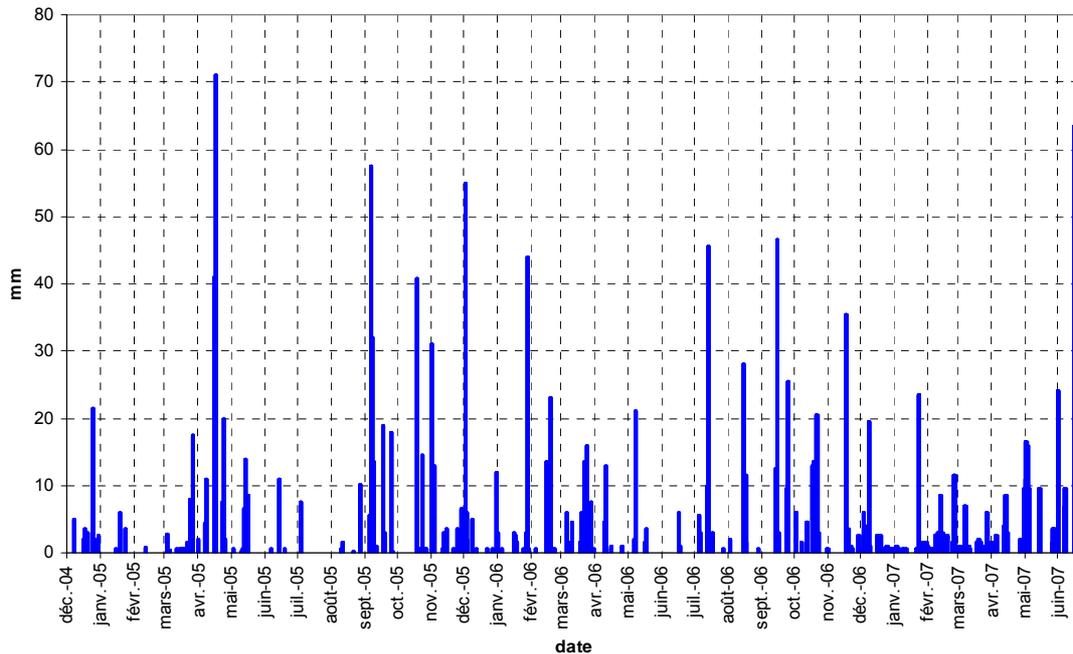


Illustration 29 - Pluviométrie journalière enregistrée par le pluviomètre sur le site de Mormoiron

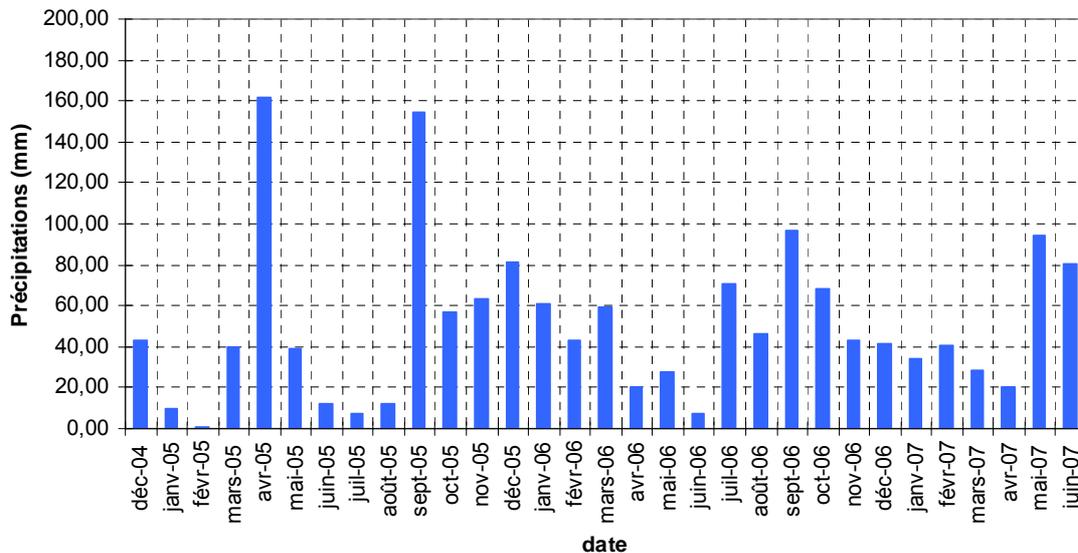


Illustration 30 - Pluviométrie mensuelle enregistrée par le pluviomètre sur le site de Mormoiron

L'illustration 31 permet de comparer les pluviométries mensuelles obtenues sur Mormoiron entre décembre 2004 et juin 2006 à la pluviométrie mensuelle moyenne enregistrée à Carpentras entre 1964 et 2006. Il est à noter que la pluviosité sur le site de Mormoiron, est supérieure d'environ 16 % à celle de Carpentras, situé à 10 km, pour les années 2005 et 2006 (contre 25 % dans Vincent *et al.*, 2006 – BRGM/RP-54567-FR sur une période plus courte, nécessairement moins représentative).

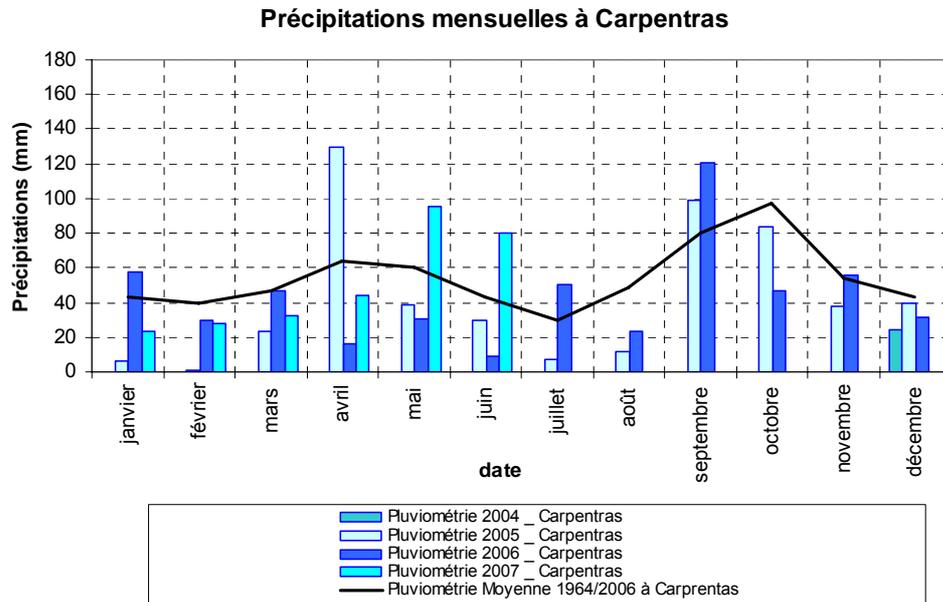


Illustration 31 –Pluviométries mensuelles entre décembre 2004 et juin 2007 à Mormoiron (données BRGM) et comparaison avec la moyenne trentennale mesurée à Carpentras (données Météo-France 1971 - 2000)

Ces données montrent que les précipitations enregistrées entre avril et juin 2006 étaient nettement inférieures aux valeurs mensuelles moyennes correspondant à Carpentras (qui sont normalement inférieures à celles observées sur le site de Mormoiron). A partir de juillet, les précipitations ont rattrapé les normales saisonnières avec toutefois un léger déficit hydrique en fin d'année 2006, se prolongeant jusqu'en avril 2007. Mai et juin 2007 ont été marqués par des précipitations nettement supérieures à la moyenne. Ces deux mois présentent toutefois des caractéristiques pluviométriques relativement différentes : la forte pluviosité de mai est liée à un épisode pluviométrique qui a duré plusieurs jours avec de faibles intensités, alors que celle de juin est principalement due à un intense épisode pluvieux qui a duré moins de 24 heures.

L'observation des cumuls pluviométriques annuels montre que l'année 2006 a présenté des précipitations bien inférieures à celles obtenues en 2005 sur le site de Mormoiron, elles-mêmes légèrement inférieures aux valeurs annuelles obtenues sur Carpentras (Illustration 32). De plus, la pluviosité en 2004, 2005 et 2006 sur ce site est toujours largement inférieure à la pluviosité moyenne annuelle obtenue sur celui-ci entre 1964 et 2006 (643 mm), ainsi qu'à la moyenne annuelle calculée sur la période de référence 1971-2000 sur ce site (657 mm), ce qui semble indiquer qu'il s'agit d'années sèches.

Année	Précipitations sur Mormoiron (mm)	Précipitations sur Carpentras (mm)	Moyenne annuelle sur Carpentras entre 1964 et 2006 (mm)	Moyenne annuelle sur Carpentras entre 1971 et 2000 (mm)
2004	–	451,6	643,06	656,87
2005	640,1	507,6		
2006	585	519		

Illustration 32 - Caractéristiques annuelles moyennes pour 2005 et 2006 sur le site de Mormoiron et à Carpentras

5.1.2. Mesures de température

Cette partie présente l'ensemble des données de température dans le sol enregistrées sur le site de Mormoiron (à des profondeurs respectives de 0,5 m, 1 m, 1,5 m, 2,5 m, 4 m, 5 m et 7 m), et les compare aux données enregistrées en surface sous abri par Météo-France sur le site de Carpentras.

Ces données sont présentées au pas de temps journalier (Illustration 33) et à un pas de temps mensuel (Illustration 34) qui permet de mieux visualiser les évolutions globales. Les données de température à 1,5 m, 5 m et 7 m ont été enregistrées par la canne 1 et les autres sur la canne 2.

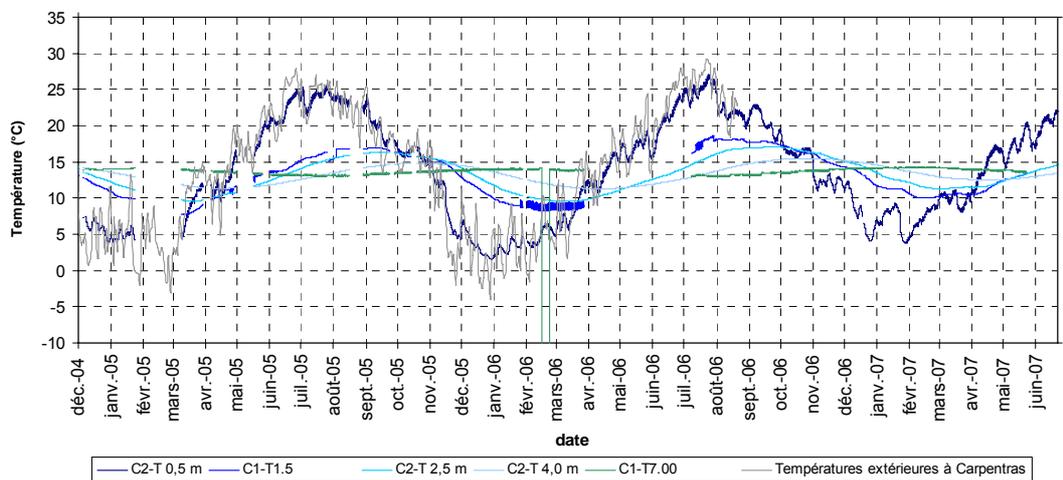


Illustration 33 – Températures enregistrées en surface à Carpentras (données Météo-France) et mesurées dans le sol par les deux cannes à Mormoiron

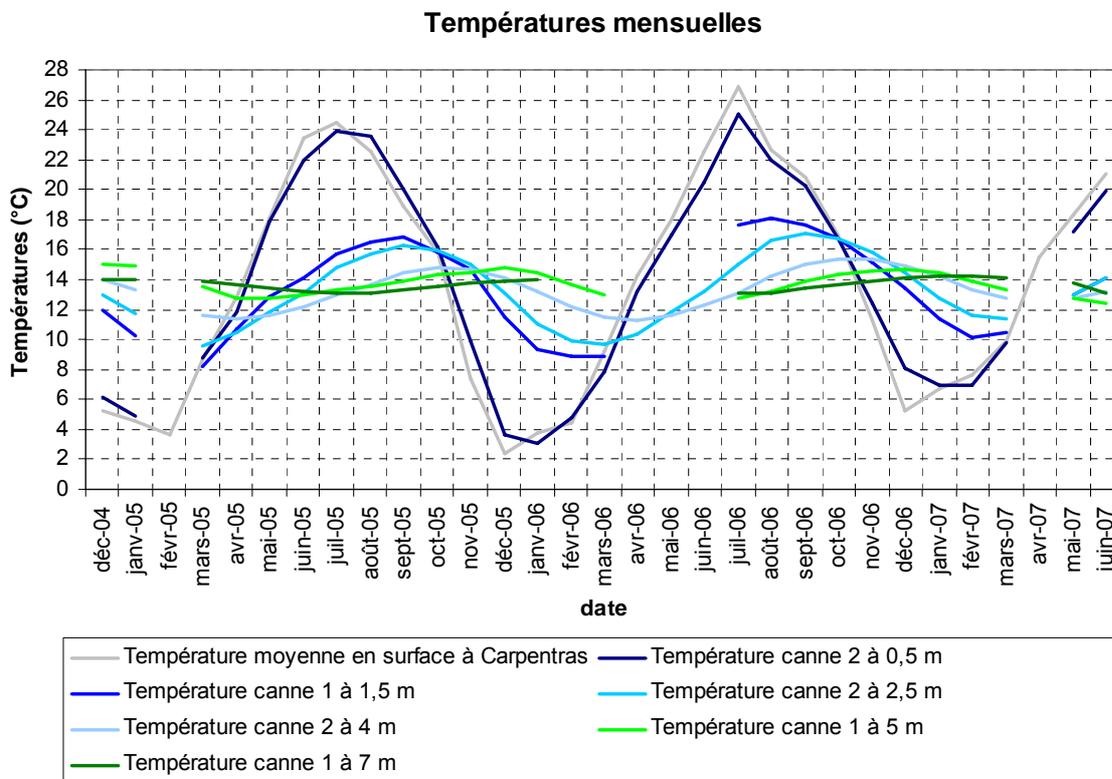


Illustration 34 – Températures moyennes mensuelles à Carpentras (données Météo-France) et mesurées dans le sol par les deux cannes à Mormoiron

Ces illustrations montrent que les températures mesurées dans le sol à différentes profondeurs sont parfaitement cohérentes avec celles mesurées au niveau du sol : les plus superficielles en sont très proches et les courbes présentent des variations de plus en plus atténuées en profondeur (entre 20 et 24°C en surface, de 18 à 20 °C à 0,5 m, de 9°C à 1,5 m, de 6°C à 2,5 m, de 4 °C à 4 m, de 2°C à 5 m et de 1°C à 7 m) et décalées dans le temps, selon les lois classiques de propagation de la chaleur dans le sol par diffusion thermique.

De plus, l'été 2006 a été légèrement plus chaud que l'été 2005 (de 2 °C), ce qui a eu une légère incidence sur les températures du sol. L'hiver 2007 a également été marqué par des températures nettement supérieures aux températures rencontrées en hiver 2005 et 2006 (environ 4 °C), ce qui s'est répercuté sur les températures du sol enregistrées jusqu'à 4 m de profondeur.

5.1.3. Mesures de l'humidité

Cette partie présente l'ensemble des mesures d'humidité obtenues à ce jour sur le site de Mormoiron. Dans un premier temps sont indiqués les résultats bruts de permittivité et, dans un deuxième temps, les résultats sont interprétés en termes de teneur en eau massique et de profils hydriques.

Résultats bruts

Pour les différentes profondeurs étudiées (à l'exception des profondeurs de 5 m et 6 m, quasiment inexploitable), les résultats fournis par les capteurs capacitifs Humitub pour la teneur en eau sont présentés en termes d'intensité mesurée en fonction du temps (signal brut de sortie compris entre 4 et 20 mA), superposés au cumul journalier de précipitation mesuré par le pluviomètre installé sur le site. La quasi-totalité des résultats correspondant à la canne 2 a été présentée, ceux de la canne 1 devant faire l'objet d'une vérification avant toute exploitation (en raison d'un doute subsistant sur la fiabilité de certaines connexions). Les différentes illustrations montrent l'ensemble des résultats depuis l'installation des sondes Humitub sur le site, mais seules les mesures comprises entre février 2006 et juin 2007 sont commentées ici, les autres mesures (entre décembre 2004 et février 2006) ayant déjà été montrées et interprétées (Vincent *et al.*, 2006 – BRGM/RP-54567-FR).

L'illustration 35, qui présente les mesures à 0,5 et 1 m de profondeur, confirme que les augmentations rapides de teneur en eau (correspondant à des augmentations de permittivité) se produisent, à ces profondeurs, quasi immédiatement après les épisodes pluvieux bien marqués, cités plus haut pour l'essentiel d'entre eux, (épisodes pluvieux des 14/07/06, 21/10/06, 23/01/07, 13/02/07 et 25/02/07). Au contraire, certains épisodes semblent avoir peu d'influence sur l'évolution de la teneur en eau à 0,5 et 1 m de profondeur ou ne font que la stabiliser en cours de dessiccation (épisode pluvieux du 15/08/06 notamment). Enfin, d'autres épisodes pluvieux ont pour effet une brutale augmentation de l'humidité à 0,5 m de profondeur qui ne se retrouve pas à 1 m de profondeur (événements des 16/09/06, 27/09/06 et du 19/11/06 en particulier).

Pour l'instant, l'influence des précipitations sur l'augmentation brutale de la teneur en eau à 1 m de profondeur n'est pas totalement prévisible. Par exemple, les précipitations de mi-septembre 2006, présentant une hauteur d'eau cumulée de 47 mm et survenant après une période relativement sèche, ont provoqué une augmentation de l'intensité mesurée de 1,6 mA à 0,5 m de profondeur, alors qu'elles n'ont pas eu d'influence sensible à 1 m de profondeur. Au contraire, en juillet 2006, le même type de précipitation (47 mm après une période relativement sèche) a provoqué une augmentation des intensités mesurées pour les deux profondeurs, respectivement de 1,3 mA et 1,6 mA alors que les intensités initiales mesurées à ces deux périodes étaient presque équivalentes pour les deux profondeurs et étaient respectivement de 10,2 mA et de 11,8 mA.

De plus, l'humidité semble très souvent plus forte à 1 m de profondeur qu'à 0,5 m et notamment pendant toute la période estivale alors que l'écart se réduit pendant les mois de septembre et d'octobre. Des périodes de saturation des capteurs, consécutives à un épisode pluvieux, ont lieu principalement entre février et mai et durent plus longtemps à 1 m de profondeur qu'à 50 cm. Ces deux observations peuvent être expliquées par le fait qu'en surface (à 0,5 m), le sol subit davantage le phénomène d'évapotranspiration qu'à 1 m de profondeur.

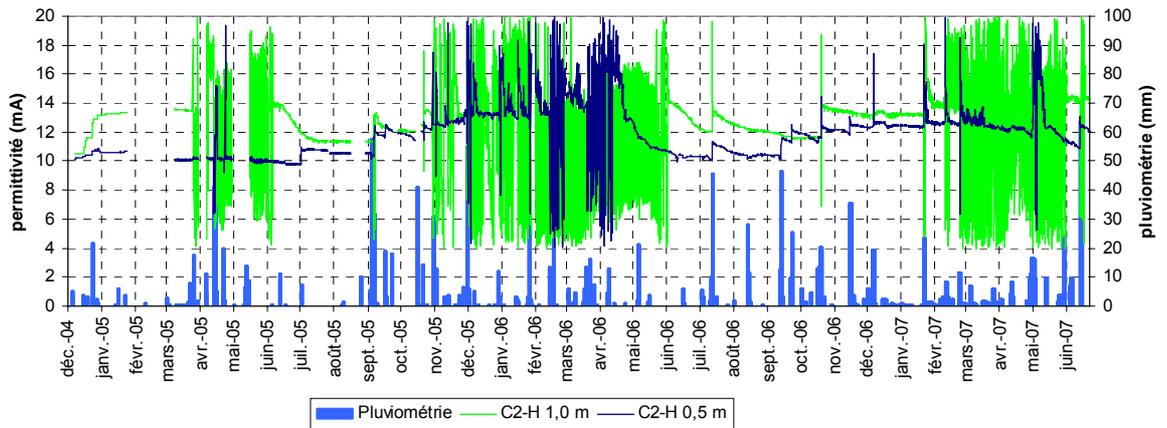


Illustration 35 – Suivi des intensités à 0,5 et 1 m de profondeur sur la canne 2 et pluviométrie – site de Mormoiron (période du 09/12/04 au 22/06/07)

La coupe lithologique du sondage à la carrière réalisé le 1^{er} décembre 2004 (Vincent et al., 2006 – BRGM/RP-54567-FR) montre, au niveau de la canne 2, que la nature lithologique du sol à 0,5 et 1 m est identique et constituée d’une argile verte. En revanche, la teneur en eau semble différente : l’horizon le plus superficiel est peu humide, alors que l’horizon compris entre 1 m et 2,5 m est normalement humide ce qui tend à confirmer l’influence de l’évapotranspiration en surface.

L’illustration 36 qui présente les mesures à 1,5 et 2 m de profondeur, montre également le phénomène de saturation du capteur à 1,5 m, lequel apparaît aux mêmes périodes qu’à 1 m de profondeur alors que les mesures enregistrées à 2 m sont beaucoup plus stables.

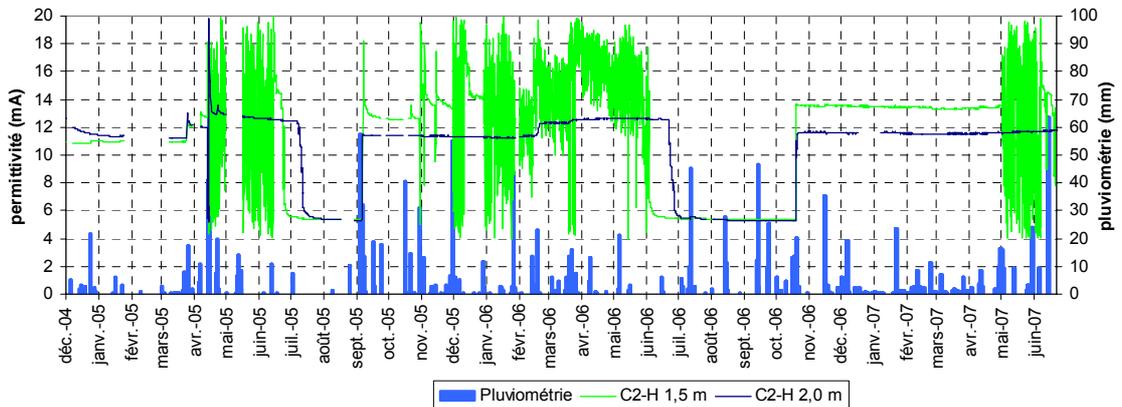


Illustration 36 - Suivi des intensités à 1,5 et 2 m de profondeur sur la canne 2 et pluviométrie – site de Mormoiron (période du 09/12/04 au 22/06/07)

De plus, des chutes brutales de l’intensité, enregistrées par certains capteurs (1,5 m, 2 m et 2,5 m) et déjà constatées pendant la période estivale 2005, apparaissent également pendant celle de 2006 mais de façon plus durable : à 1,5 m de profondeur, ce décrochage a duré un peu plus de 4 mois et demi en 2006, alors qu’il n’avait été observé que pendant un peu plus de deux mois en 2005. Ces chutes brutales de

l'intensité s'expliquent *a priori* par un retrait du sol autour du capteur pendant les périodes de retrait. Ainsi, la plus faible pluviosité de l'année 2006 pourrait expliquer que le phénomène dure plus longtemps qu'en 2005. Toutefois, cette hypothèse n'a pas pu être confirmée par des observations *in situ* ou des mesures en laboratoire (des valeurs de l'ordre de 5 à 6 mA n'y ayant jamais été mesurées, même dans l'air).

Afin de tenter de valider cette hypothèse, les mesures de permittivité enregistrées par la canne 1 à 0,5 m de profondeur et qui présentent le même type de comportement ont été superposées aux mesures enregistrées par les extensomètres à 0,2 m et à 0,5 m de profondeur. L'illustration 37 met ainsi en évidence que les périodes de chutes brutales de la permittivité sont synchrones aux périodes de forts tassements du sol par retrait enregistrés par les extensomètres. De plus, la chute brutale du signal de sortie intervient quelque soit l'état de déformation du sol (sol gonflé ou rétracté).

Le fait que la dernière phase de chute brutale de la permittivité à 0,5 m ne coïncide pas avec un fort tassement du sol par retrait à 0,5 m de profondeur ne remet pas en cause cette hypothèse ; cela pourrait s'expliquer par l'éloignement entre les extensomètres et l'Humitub ou plutôt par le fait qu'elle intervient juste après une période où le sol avait été très desséché, l'épisode pluvieux intense de juin 2007 n'ayant pas permis de ré-humidifier le sol de manière significative. Toutefois, la valeur de 5 à 6 mA demeure inexpliquée.

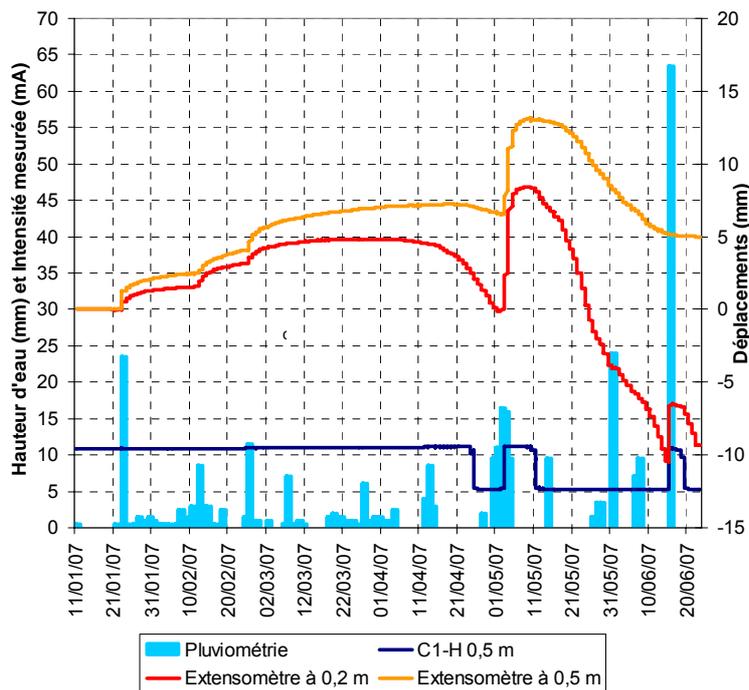


Illustration 37 – Comparaison entre les résultats de permittivité obtenus sur la canne 1 à 0,5 m de profondeur et les déplacements obtenus sur la canne 2 à 0,2 m et 0,5 m de profondeur –site de Mormoiron

L'illustration 38 présente les valeurs enregistrées à 2,5 m, 3 m, 3,5 m et 4,5 m de profondeur. Le capteur installé à 2,5 m enregistre peu de fluctuations : seules les périodes printanières connaissent des variations sensibles. A cette profondeur, la chute brutale de l'intensité observée à 1,5 et 1 m de profondeur est également marquée à la même période mais plus brièvement et la valeur observée est un peu plus forte : elle vaut 7 mA au lieu de 5-6 mA. Au contraire, les capteurs présents à 3 m, 3,5 m et 4 m enregistrent d'importantes fluctuations de l'intensité mesurée sur la quasi-totalité de la période d'observation. Seule la période comprise entre août 2005 et octobre 2005 voire février 2006 est exempte de ces fluctuations. Cette période fait suite à quelques mois très secs en début d'année 2005 et pourrait être due à la propagation en profondeur du front de dessiccation alors que ces horizons sont habituellement affectés par des remontées capillaires depuis les circulations temporaires qui se produisent à la faveur de niveaux silteux intercalés. Comme énoncé dans Vincent *et al.* (2006), ces fluctuations seraient dues à la saturation du capteur, effet constaté en laboratoire.

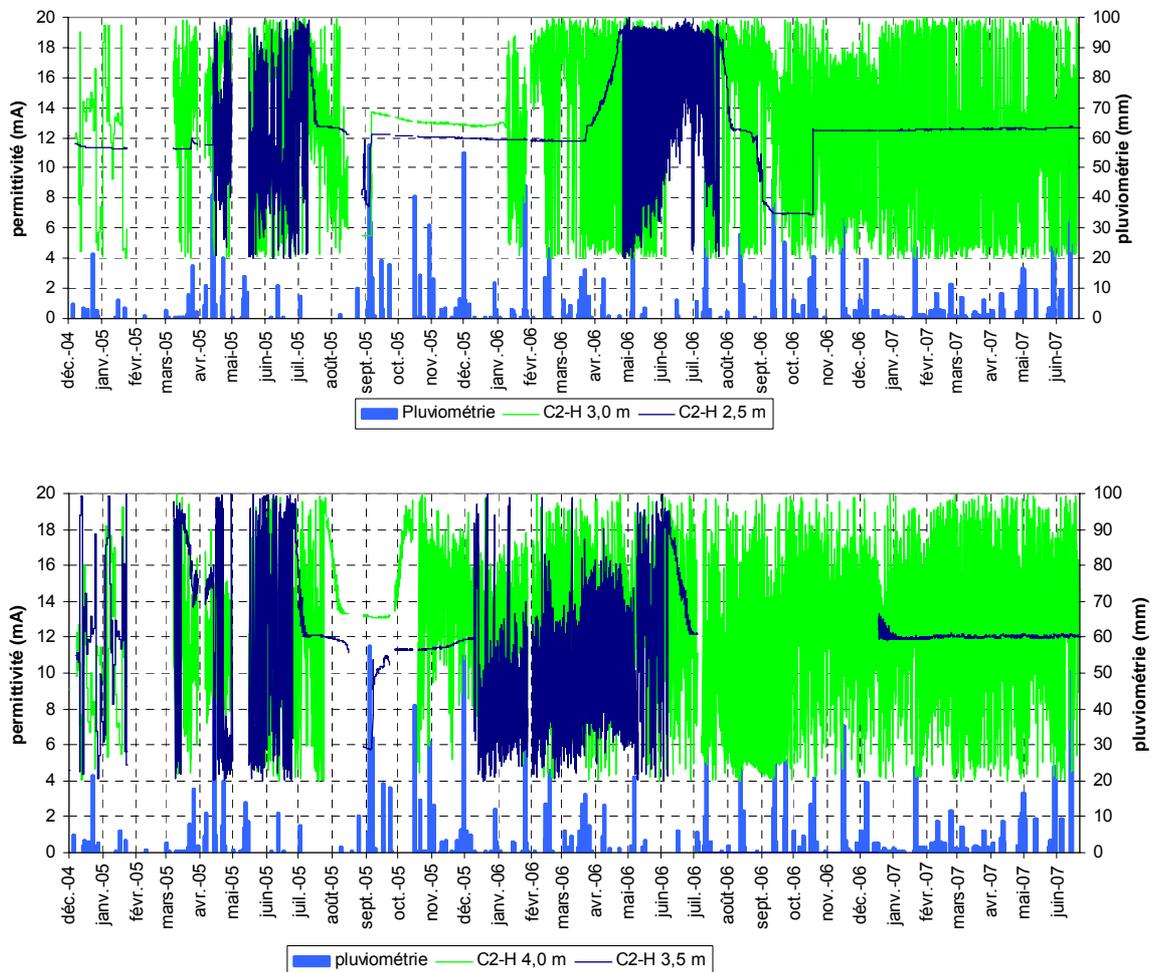


Illustration 38 - Suivi des intensités à 2,5 m, 3 m, 3,5 m et 4 m de profondeur sur la canne 2 et pluviométrie – site de Mormoiron (période du 09/12/04 au 22/06/07)

A partir de 4,5 m de profondeur (à l'exception de la profondeur 7 m), les mesures enregistrées sont quasiment inexploitablees puisqu'elles présentent d'importantes fluctuations (sur la totalité de la gamme, entre 4 et 20 mA). Les valeurs mesurées à 4,5 m, 5 m et 6 m de profondeur ne présentent pas d'intérêt particulier et n'ont donc pas été présentées.

A 7 m de profondeur, les valeurs mesurées oscillent mais avec des amplitudes beaucoup moins importantes (de l'ordre de 6 mA et non sur la pleine échelle comme observé pour les autres capteurs). Des recherches au sujet de la périodicité sont en cours et devraient pouvoir, à terme, expliquer la cause de telles variations.

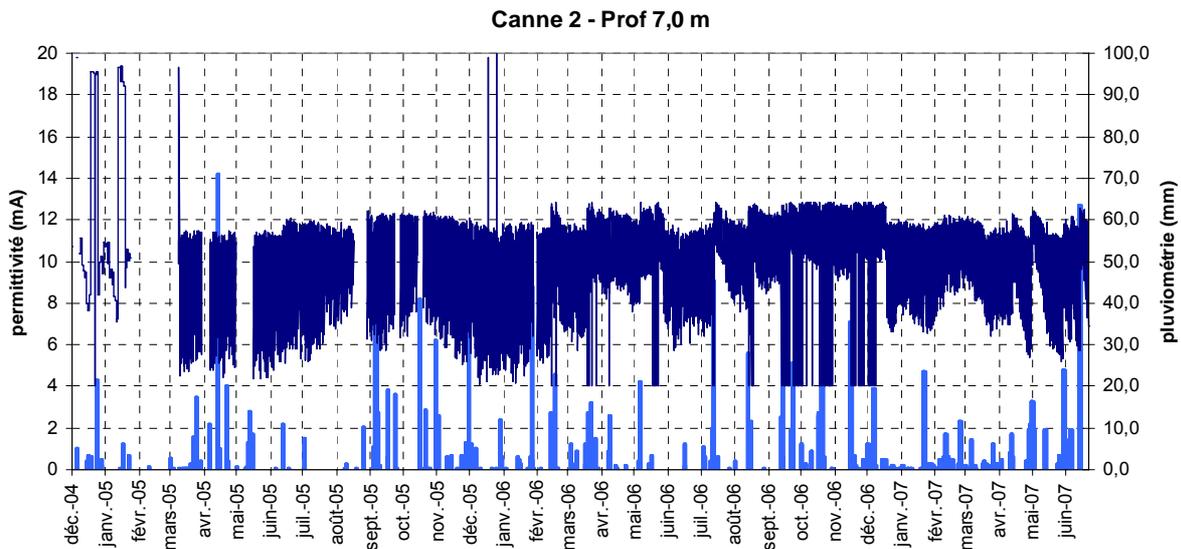


Illustration 39 - Suivi des intensités à 7 m de profondeur sur la canne 2 et pluviométrie – site de Mormoiron (période du 09/12/04 au 22/06/07)

Interprétation des résultats

Les résultats présentés dans cette partie sont interprétés en termes de teneur en eau massique à partir de la conversion énoncée dans Vincent *et al.* (2006) – rapport BRGM/RP-54567-FR.

L'illustration 40 présente, à un pas de temps mensuel et depuis la date d'installation des sondes Humitub, l'évolution des cumuls de précipitation et des teneurs en eau massiques du sol, à différentes profondeurs (en moyennes mensuelles). Les lacunes dans les mesures correspondent aux périodes de saturation du capteur (mesures oscillantes). Seuls les capteurs les plus superficiels sont présentés dans cette partie, les autres ne permettant pas de déterminer une valeur mensuelle de la teneur en eau suffisamment fiable du fait des fluctuations des mesures.

Cette figure montre que les teneurs en eau mesurées à 0,5 m de profondeur ont été plus importantes pendant l'hiver 2005-2006 (de l'ordre de 30 %) que pendant l'hiver 2006-2007 (de l'ordre de 22,5 %) ce qui est concordant avec le fait que l'année 2005 a

été, sur le site de Mormoiron, plus humide que l'année 2006 (Illustration 32). Cette différence de pluviosité entre les années 2005 et 2006 a également eu une influence sur la teneur en eau à 2 m et 2,5 m : en effet, la forte pluviosité en 2005 pourrait être à l'origine de l'augmentation de la teneur en eau entre février et juin 2006 à 2 m de profondeur, notée également entre avril et juillet 2005, mais non constatée en 2007. En effet, à cette période en 2007, la teneur en eau massique est restée stable autour de 16 %. Toutefois, pour modérer ce propos, les valeurs observées à 2 m et 2,5 m en octobre 2006 sont légèrement supérieures à celles observées à la même période en 2005. Davantage de données exploitables sur les teneurs en eau des niveaux inférieurs auraient peut-être permis d'interpréter plus précisément ces observations.

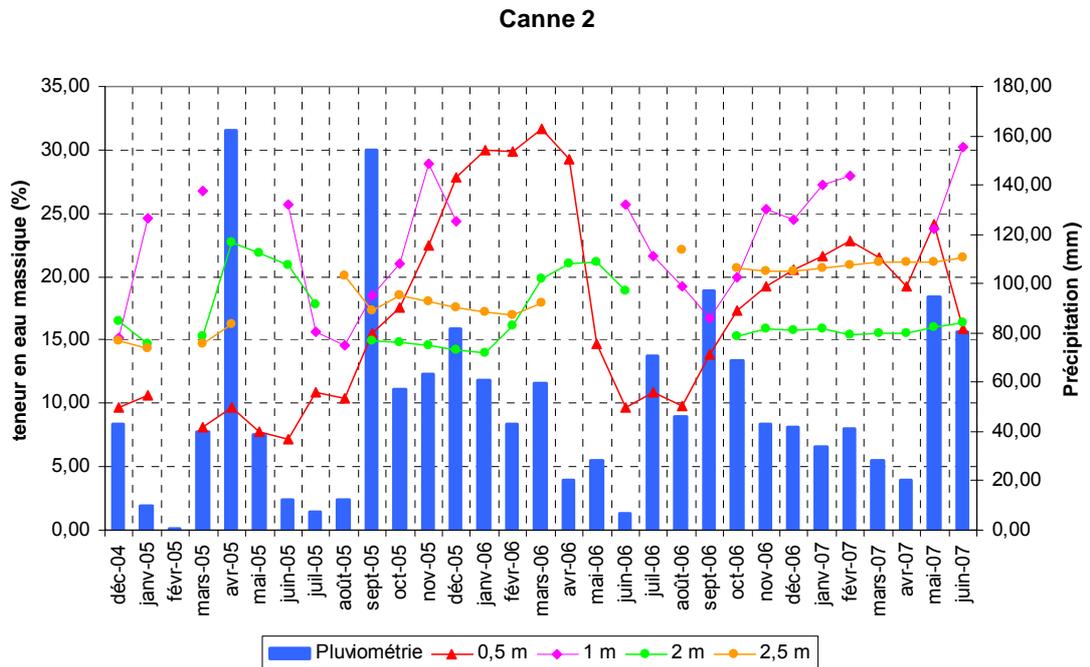


Illustration 40 - Mesures de teneur en eau mensualisées enregistrées sur la canne 2 et pluviométrie mensuelle - site de Mormoiron

La teneur en eau à 1 m de profondeur, rarement inférieure à 15 %, est presque toujours supérieure à celle mesurée à 0,5 m, laquelle connaît les plus grandes amplitudes de fluctuations, ce qui est logique car cet horizon superficiel subit les plus fortes évapotranspirations et est le plus exposé aux précipitations. Pour les deux capteurs de surface, les teneurs en eau massiques présentent de fortes amplitudes : elles passent de 7 à 32 % à 0,5 m et de 15 à 30 % à 1 m, soit des variations respectives de 25 et 15 points.

La limite de retrait (teneur en eau massique en dessous de laquelle le sol continue à se dessécher sans se rétracter) est évaluée à 8 % pour le sol de Mormoiron. En moyenne mensuelle, cette limite n'est atteinte qu'à une seule reprise, en mai-juin 2005. A partir d'une profondeur de 1 m, la teneur en eau massique ne descend jamais en dessous de 14 %, valeur nettement supérieure à la limite de retrait observée sur le sol de

Mormoiron. Pour l'ensemble des capteurs situés entre 1 et 2,5 m de profondeur, les teneurs en eau massiques fluctuent en moyenne entre 15 et 30 %, donc autour de la limite de plasticité, qui vaut 23,2 %. Elles n'atteignent jamais la limite de liquidité, qui vaut 58 %, ni même la teneur en eau à saturation estimée à 45 %, valeur qui n'a jamais été enregistrée au cours de la période d'observation entre décembre 2004 et juin 2007, alors que cette période correspond plutôt à des années globalement sèches comme noté plus haut.

Cela signifie que le sol oscille entre un état solide avec retrait ($8 \% < w_m < 23,2 \%$) et un état plastique ($23,2 \% < w_m < 45 \%$), qui correspond précisément au domaine pour lequel les variations de volume varient le plus fortement en fonction des variations de teneur en eau.

Profondeur (m)	Teneur en eau massique minimale (%)	Teneur en eau massique maximale (%)	Teneur en eau massique moyenne (%)	Amplitude de teneur en eau massique (%)
0,5	7	32	17,3	25
1	15	30	22,7	15
2	14	23	17,0	9
2,5	15	21	18,8	6

Illustration 41 – Tableau récapitulatif des teneurs en eau massiques mensuelles minimales, maximales et moyennes et de leur amplitude de variation pour chaque profondeur

Profils hydriques

Une autre façon de présenter les données issues des capteurs Humitub est de tracer des profils de teneur en eau à différentes périodes, comme le montre l'illustration 42 sur laquelle apparaissent les différents profils mensualisés enregistrés sur l'ensemble de la période instrumentée. Seules les valeurs ayant une signification physique ont été conservées (c'est-à-dire hors période de saturation des capteurs Humitub en période très humide ou de retrait du sol autour des capteurs en période très sèche), ce qui induit probablement une certaine minoration de la plage de variation.

Les variations de teneurs en eau observées à différentes profondeurs confirment les résultats déjà obtenus et montrés par Vincent et al. (2006). Cette gamme de variation est très étendue dans les horizons superficiels (par exemple entre 7 et 24 %, voire 31 % à 0,5 m de profondeur).

Au contraire, entre 2 et 3 m de profondeur, les variations de teneurs en eau sont plus réduites, mêmes si elles restent significatives (entre 14 et 23 % à 2 m et 2,5 m de profondeur). À 3,5 m de profondeur, la gamme de variation est d'une étendue équivalente, mais avec des teneurs en eau légèrement inférieures (de 9 à 19 %), ce qui pourrait s'expliquer par une lithologie différente avec prédominance d'éléments silteux plus grossiers. En revanche, à 3 m de profondeur, les teneurs en eau enregistrées sont plus fortes que sur l'ensemble du profil, ce qui pourrait être dû à l'influence des écoulements préférentiels dans les niveaux silteux sous-jacents.

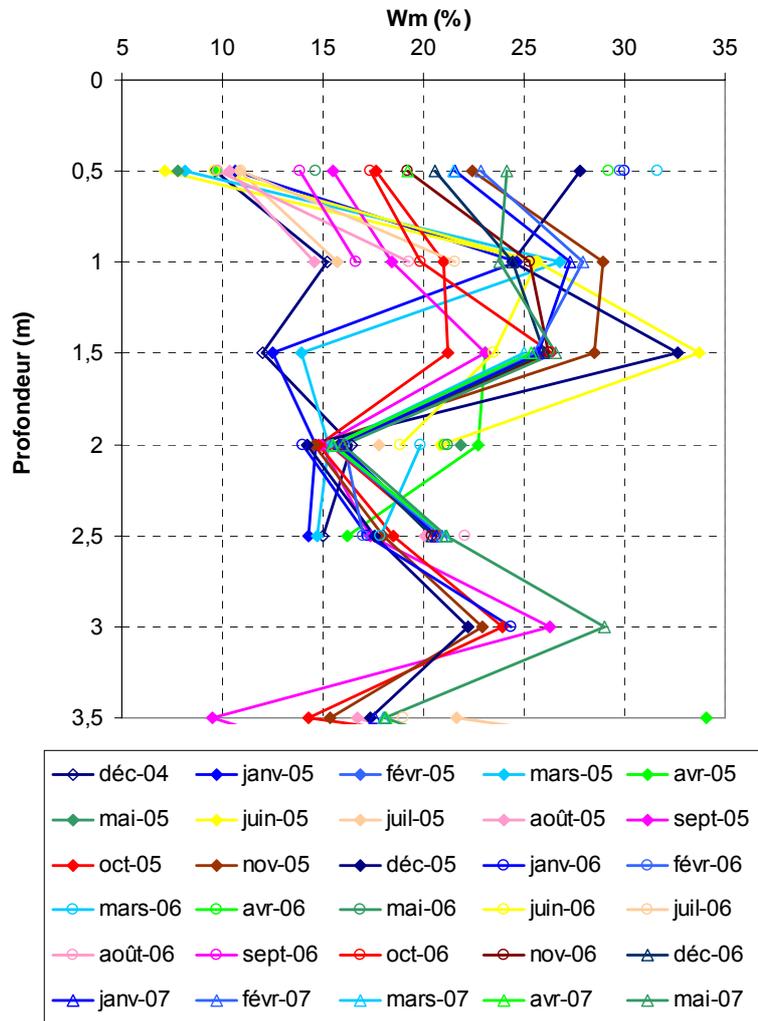


Illustration 42 - Profil hydrique moyen mensuel enregistré sur la canne 2 entre 0,5 et 3,5 m de profondeur sur toute la période instrumentée –site de Mormoiron

Cette figure confirme également que si 2004, 2005, 2006 et 2007 ont été des années très différentes d'un point de vue météorologique, certaines observations sont communes. Par exemple, les teneurs en eau mesurées dans l'horizon le plus superficiel en été sont le plus souvent inférieures à 17 % et celles mesurées en hiver sont sensiblement supérieures à cette même valeur.

Les résultats des mesures Humitub ont été comparés à des mesures directes effectuées en laboratoire sur échantillons prélevés *in situ* lors de la mise en place des cannes Humitub (1^{er} décembre 2004) et des extensomètres (19 décembre 2006) (Illustration 43). Les valeurs enregistrées par les capteurs Humitub de la canne 2, située à quelques mètres de distance, correspondent d'une part aux données mensualisées pour les mois de décembre 2004 et 2005, et d'autre part aux mesures réelles enregistrées le 19 décembre 2006.

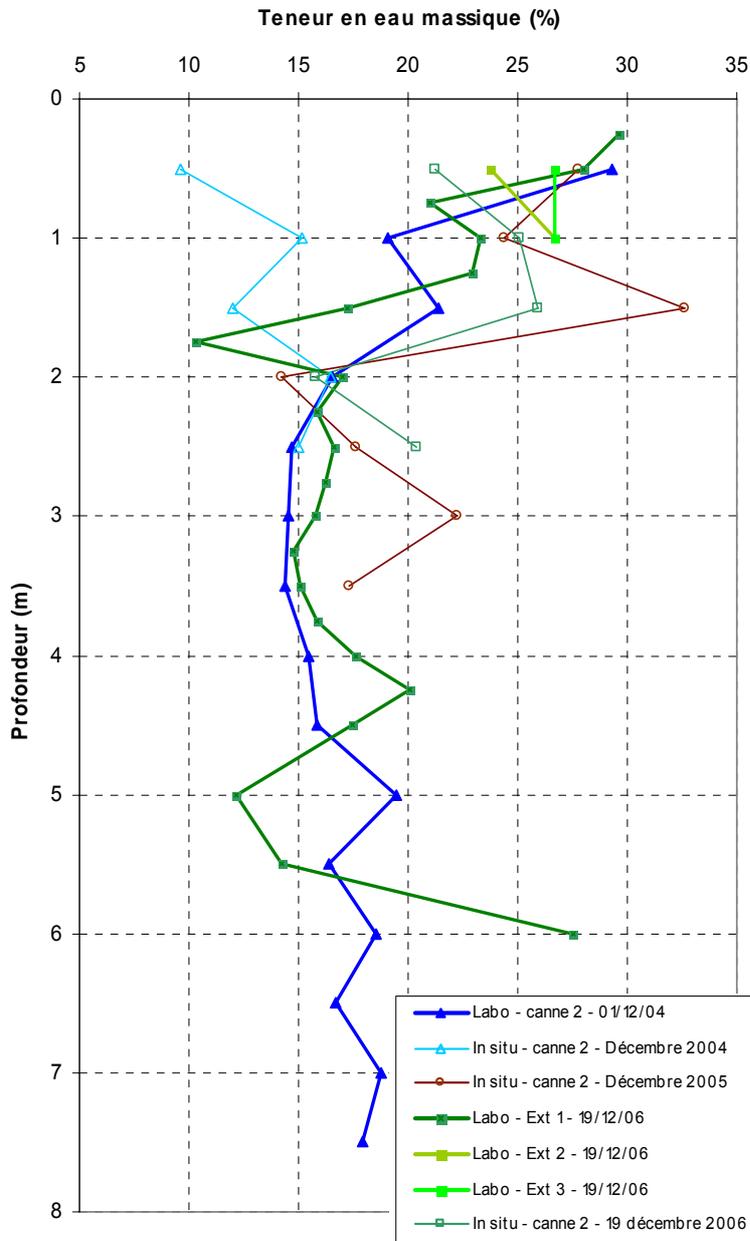


Illustration 43 - Comparaison des profils hydriques obtenus par mesure directe (en laboratoire sur échantillon prélevé in situ) et indirecte (Humitub) de Mormoiron

Les teneurs en eau issues des prélèvements du 1^{er} décembre 2004 présentent certains écarts avec les valeurs Humitub moyennées sur le mois de décembre 2004 en surface, mais les valeurs obtenues à 2 m et 2,5 m de profondeur sont parfaitement superposées. Les deux séries de valeurs sont cependant difficilement comparables car les prélèvements effectués pour les mesures en laboratoire témoignent d'un état antérieur à celui du début des enregistrements Humitub. Le profil obtenu par les capteurs Humitub en décembre 2005 est, quant à lui, beaucoup plus humide en surface qu'en décembre 2004.

Au 19 décembre 2006, à 0,5 m de profondeur, les résultats obtenus en laboratoire sur les échantillons prélevés au niveau des trois extensomètres (pourtant espacés de 2 m seulement les uns des autres) montrent des résultats relativement dispersés, entre 24 et 27 %, ce qui confirme la présence d'hétérogénéités du sol. Les mesures Humitub sont néanmoins concordantes avec celles mesurées en laboratoire par méthode gravitaire, bien que visiblement un peu surestimées à certaines profondeurs.

Ces résultats confirment la pertinence des mesures par capteurs capacitifs Humitub malgré les difficultés de calibration qui restent à résoudre (au delà de 3 m, les capteurs donnent à cette date des oscillations inexploitable) et l'intérêt de travailler avec des teneurs en eau moyennées sur des périodes mensuelles.

Par la suite, seront présentés des profils hydriques mensuels sur des périodes annuelles afin de tenter de montrer l'évolution des profils au cours du temps pour les années 2005, 2006 et 2007.

L'illustration 44, déjà présentée dans un précédent rapport (Vincent *et al.*, 2006) mais qu'il semble nécessaire de montrer à nouveau pour la comparer aux profils hydriques plus récents, permet d'observer des décalages temporels dans l'humidification ou la dessiccation entre les horizons de surface et ceux plus profonds pendant la période de réhumidification de 2005, puisque les courbes de la fin de l'été et celles du début de l'hiver se croisent : le profil du 14/08/2005 est le plus sec en surface et le plus humide en profondeur, même s'il faut tenir compte de la saturation des capteurs à 3,5 et 4 m de profondeur en fin d'automne et en hiver, sans doute influencés par des écoulements préférentiels dans les niveaux plus silteux rencontrés à cette profondeur.

L'illustration 45 met en évidence que les teneurs en eau de l'ensemble du profil entre 0,5 et 1,5 m sont plus faibles en fin d'année 2006 qu'en fin d'année 2005 (mois de novembre et décembre). Par exemple, en novembre 2006, le profil est quasiment identique à celui de novembre 2005 avec des teneurs en eau toutefois un peu plus faibles, certainement dues à des précipitations moindres au cours de l'année 2006 qu'en 2005. Au contraire, à partir de 2 m de profondeur, les profils se croisent ce qui semble indiquer que les teneurs en eau à ces profondeurs sont plus influencées par les conditions météorologiques de l'année précédente que par celles de l'année en cours.

De plus, cette illustration confirme les décalages temporels déjà observés pour la période 2004 – 2005 entre les horizons de surface et les horizons plus profonds. Par exemple, à 0,5 m de profondeur, le sol continue de s'hydrater entre novembre 2005 et mars 2006 puis commence à se dessécher à partir de mars 2006 jusqu'en août 2006, date à partir de laquelle la teneur en eau augmente à nouveau. Au contraire, à 2 m et 2,5 m de profondeur, les mois les plus humides sont les mois d'été ce qui indique, qu'ils n'ont pas encore connu la dessiccation due à la période estivale.

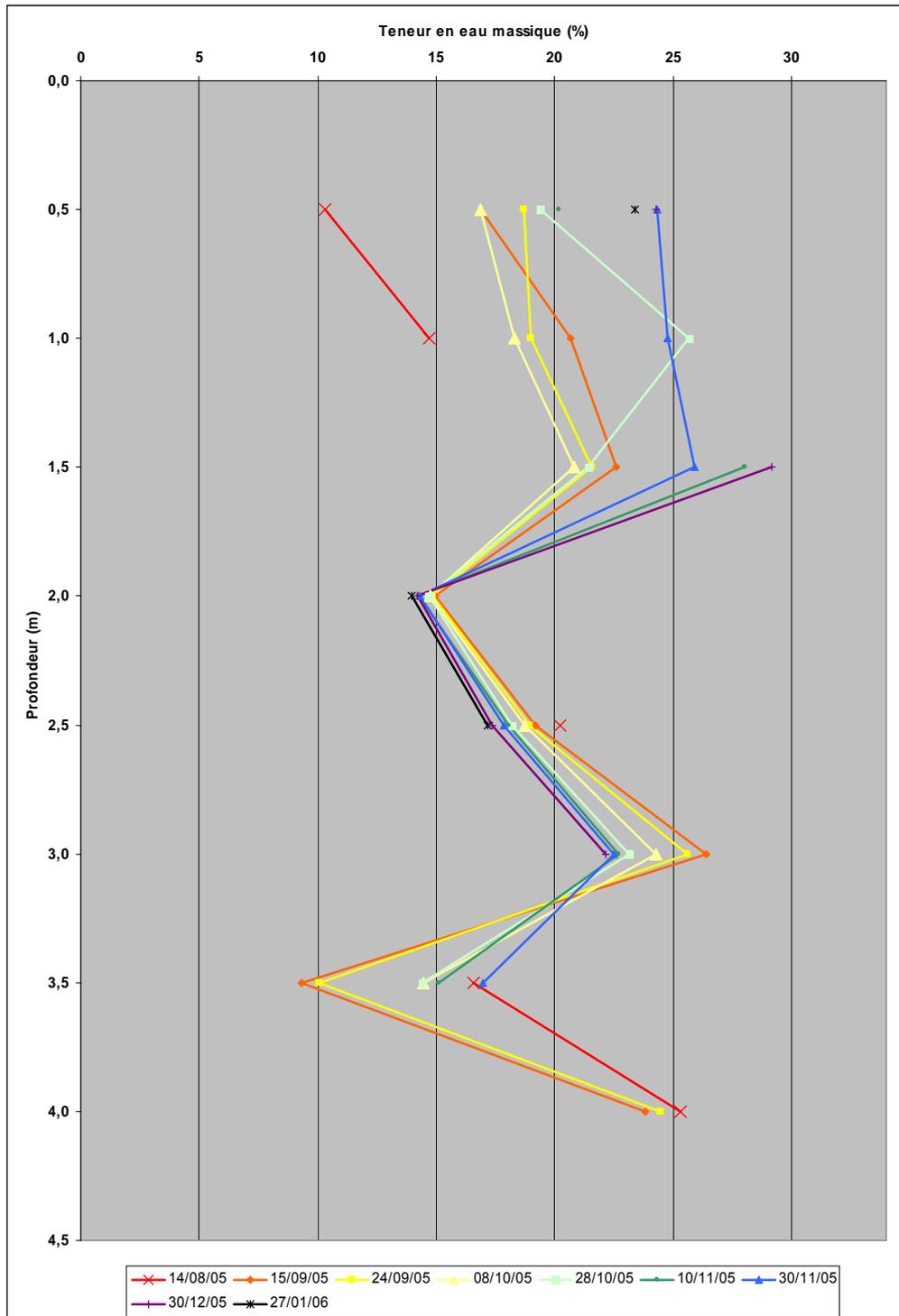


Illustration 44 – Profils de teneurs en eau entre la fin de l'été 2005 et le milieu de l'hiver 2005 – 2006 – Canne 2 – Site de Mormoiron (Vincent et al., 2006)

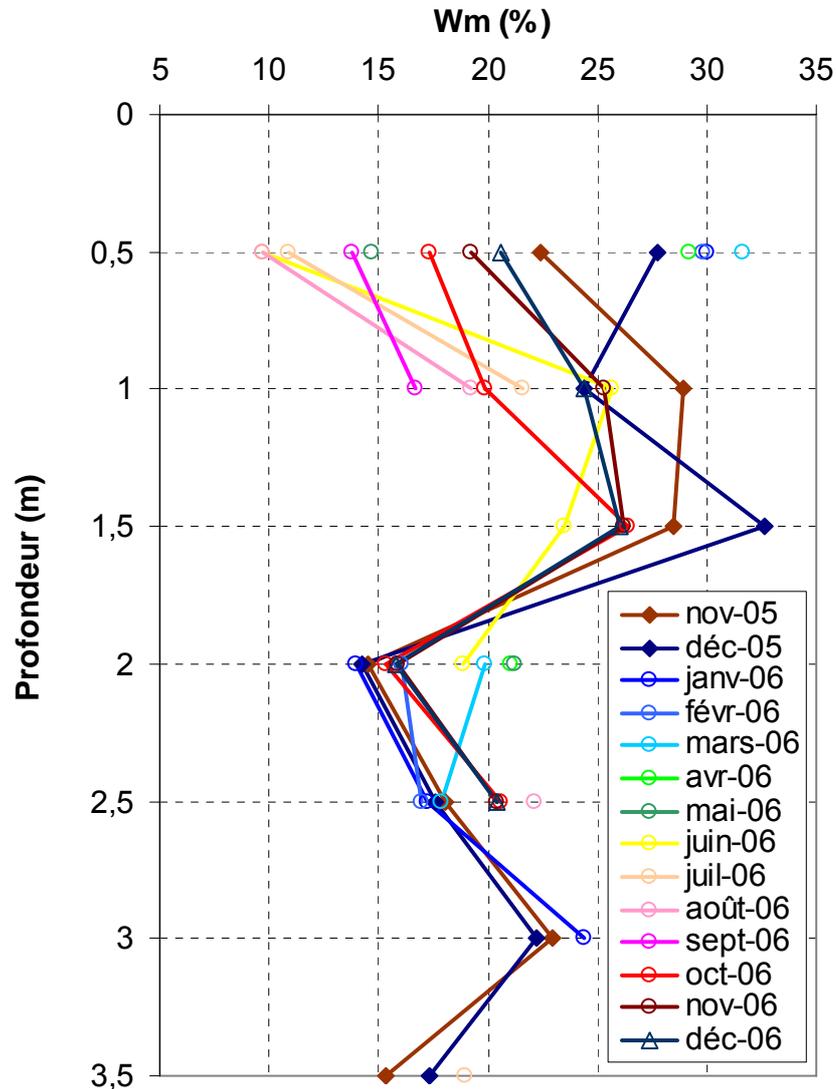


Illustration 45 - Profils hydriques moyens mensuels enregistrés sur la canne 2 entre 0,5 et 3,5 m de profondeur entre novembre 2005 et décembre 2006 – site de Mormoiron

L'illustration 46 présente les profils hydriques entre avril 2006 et juin 2007. Elle indique qu'en surface (à 0,5 m de profondeur) le sol a connu une réhumidification entre décembre 2006 et février 2007 et qu'à partir de mars 2007 le sol subit une nouvelle phase de dessiccation, interrompue toutefois par les fortes précipitations enregistrées en mai 2007. En juin 2007, le sol en surface connaît à nouveau une dessiccation alors qu'à 1 m de profondeur, le sol enregistre une réhumidification à partir de la surface : les fortes précipitations de mai 2007 atteignent des horizons plus profonds. Comme sur les illustrations précédentes, plus en profondeur le sol est plus humide en été qu'en hiver bien que la gamme de variation soit très réduite. Enfin, en juin 2007, le profil présente exactement la même configuration que celui observé en juin 2006 même si entre 0,5 et 1,5 m de profondeur, les teneurs en eau sont supérieures en 2007 en raison principalement de la forte pluviosité du mois de mai.

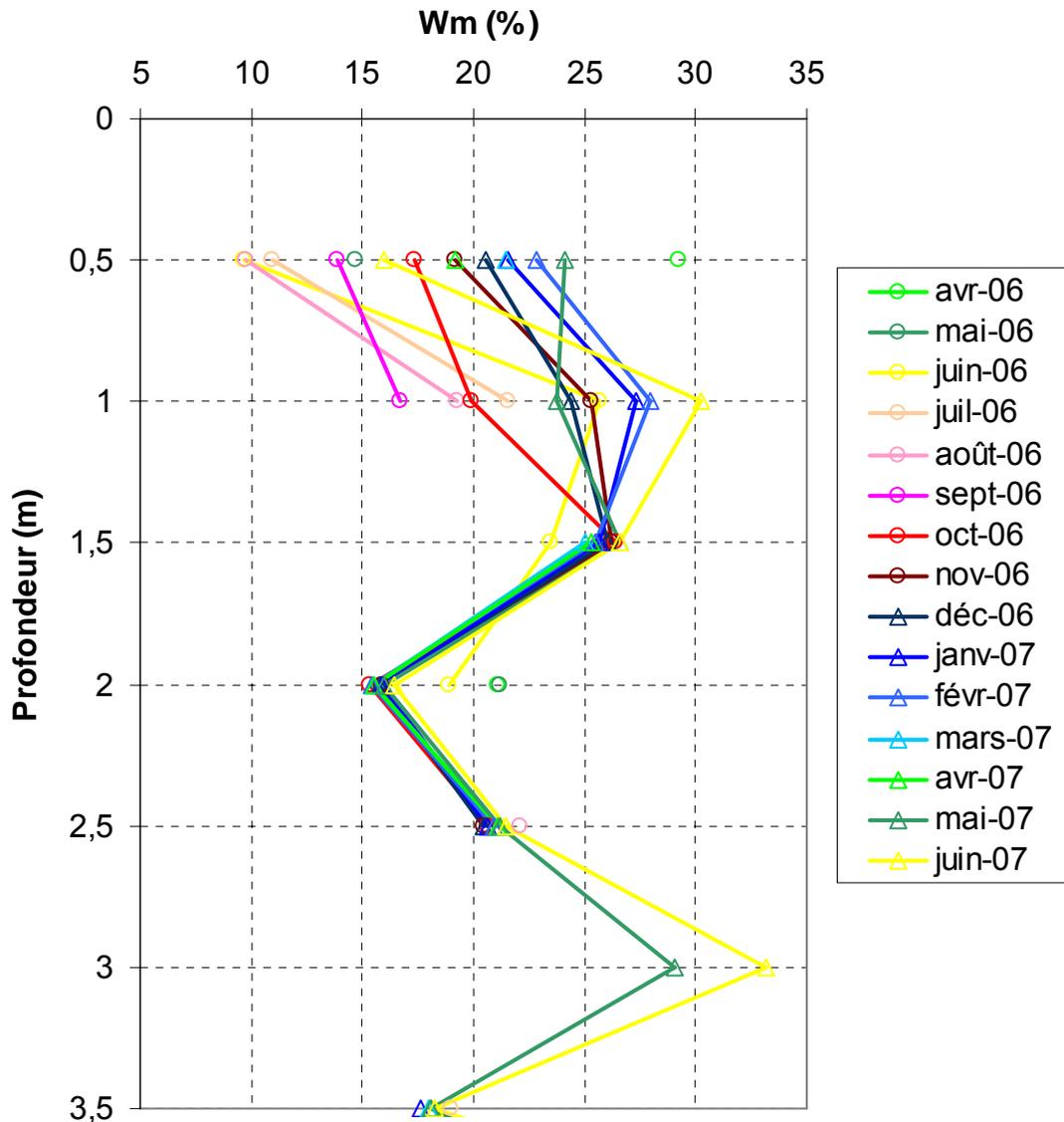


Illustration 46 - Profils hydriques moyens mensuels enregistrés sur la canne 2 entre 0,5 et 3,5 m de profondeur entre avril 2006 et juin 2007 – site de Mormoiron

Les illustrations 43 à 45 donnent une idée de la profondeur du front de dessiccation qui s'établirait entre 1,5 et 2 m de profondeur en 2005 et 2006 : en deçà de ces profondeurs, les fluctuations saisonnières sont faibles.

Enfin, l'illustration 47 présente une comparaison des profils mensuels pour les années 2004, 2005, 2006 et 2007 : pour chaque mois, un graphique présente les différentes valeurs obtenues pour les années de mesures disponibles.

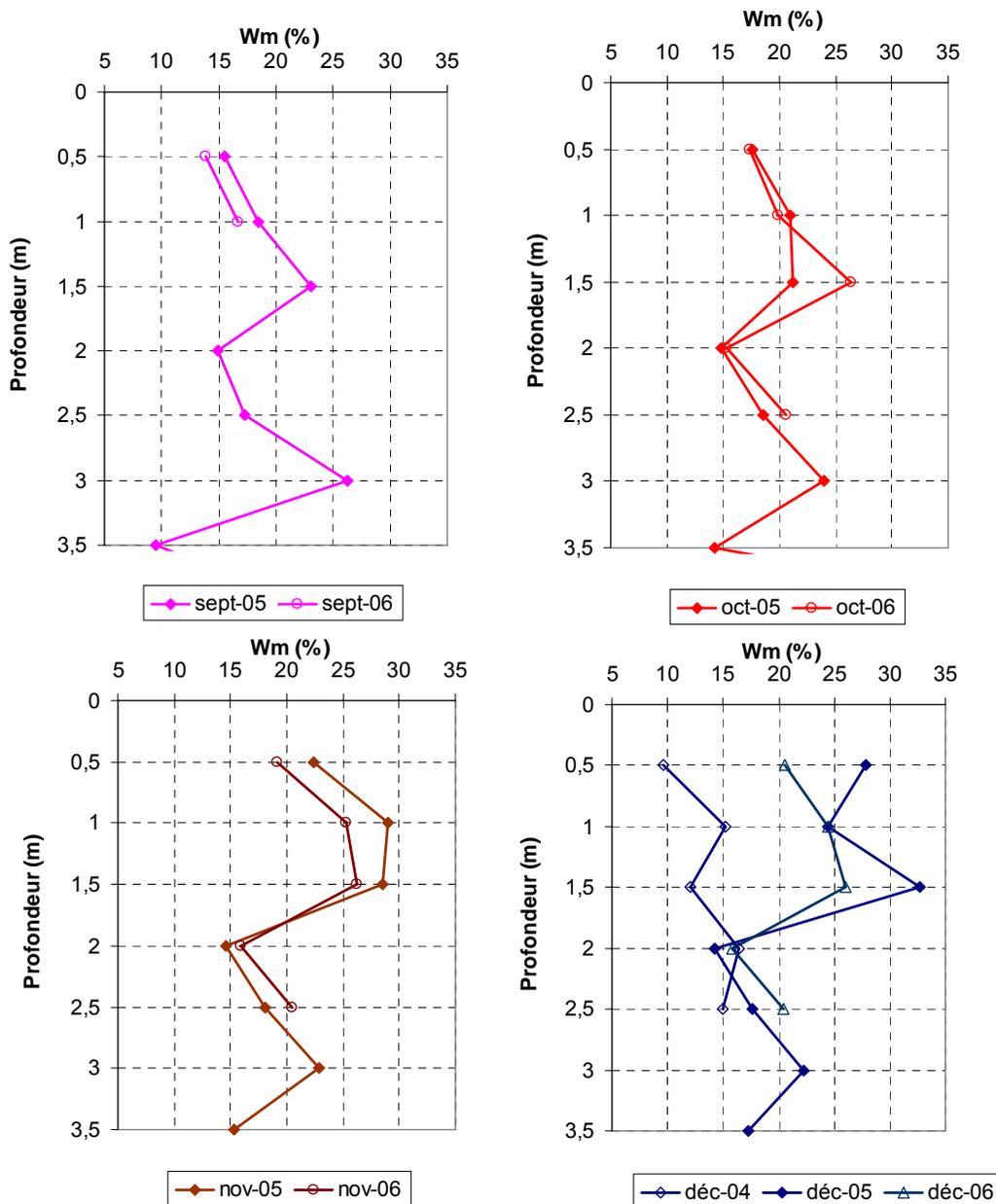


Illustration 47 - Comparaison des profils mensuels de septembre à décembre pour les années 2004, 2005, 2006 et 2007 – site de Mormoiron

Cette figure permet de visualiser les similitudes entre années successives, comme notamment en octobre, novembre et décembre pour les années 2005 et 2006 (voire septembre). Le mois de décembre est un peu particulier dans le sens où des données sont disponibles également pour l'année précédente, ce qui permet de constater que les années 2005 et 2006 sont très similaires alors que l'année 2004 présente des valeurs de teneur en eau beaucoup plus faibles jusqu'à 2 m de profondeur. Malheureusement, les seules informations pluviométriques accessibles avant fin 2004 sont les données Météo-France enregistrées sur le site de Carpentras, à 10 km de

distance, lesquelles présentent des écarts significatifs avec les précipitations du site de Mormoiron. Néanmoins, sur le site de Carpentras, l'année 2004 a été encore plus sèche que 2005 et 2006, ce qui explique sans doute les singularités du profil hydrique de décembre 2004.

5.1.4. Mesures extensométriques

Les extensomètres ont été installés sur le site de Mormoiron à proximité de la canne 2. L'illustration 48 présente les mesures de déplacements obtenues sur le site de Mormoiron, superposées à la pluviométrie et à la mesure de l'humidité à 0,5 m (enregistrée par la canne 2). Cette figure montre que les déplacements verticaux sont bien déclenchés par les pluies et leur succèdent quasi-immédiatement, y compris à 1 m de profondeur.

Les courbes peuvent être grossièrement décomposées en 7 phases sur la période d'enregistrement actuellement disponible, soit de janvier à juin 2007.

A la mise en place des extensomètres, trois phases successives de gonflement se sont produites provoquant des déplacements relativement restreints de l'ordre de 1 à 2 mm à toutes les profondeurs. Ces épisodes de gonflement ont été suivis par une phase de retrait, puis à nouveau une phase de gonflement, une phase de stagnation et enfin un léger retrait de l'ordre de 5 mm à 0,2 m de profondeur, de 1 mm à 0,5 m et minime à 1 m de profondeur. Le retrait en surface a commencé pendant une période où la teneur en eau à 0,5 m varie peu, ce qui pourrait aller dans le sens d'un retrait très superficiel.

Ensuite, la plus importante période de gonflement s'est produite à la suite de l'épisode pluvieux du 02/05/07 (62,5 mm d'eau en 5 jours). Les amplitudes de déplacement, plus importantes en surface, ont été de 8,3 mm, 6,4 mm et 1,7 mm à respectivement 0,2 m, 0,5 m et 1 m de profondeur. Suite à ce gonflement, le sol a eu tendance à se rétracter à partir du 10 mai en surface et environ 5 jours plus tard à 1 m de profondeur. Ce tassement s'est poursuivi jusqu'à la forte pluie du 15/06/07 (63,5 mm en 6 heures) et a atteint une amplitude de 18 mm à 0,2 m de profondeur, de 8 mm à 0,5 m de profondeur et de 6 mm à 1 m de profondeur.

L'épisode pluvieux du 15/06/07 a produit quasiment instantanément (dans les trois heures) un gonflement en surface d'environ 4 mm mais qui n'a pas eu lieu en profondeur : à 0,5 m et 1 m de profondeur, le retrait observé a été simplement interrompu. Ainsi, seule la tranche superficielle de sol (comprise entre 0,2 et 0,5 m de profondeur) a été affectée par cette forte pluie très brève et le gonflement s'est produit sur un peu plus de 24 heures pour la couche de sol la plus superficielle.

Enfin, entre le 16/06/07 et le 22/06/07, date d'arrêt des observations prises en compte dans le présent document, le sol a repris son retrait à la même vitesse que précédemment.

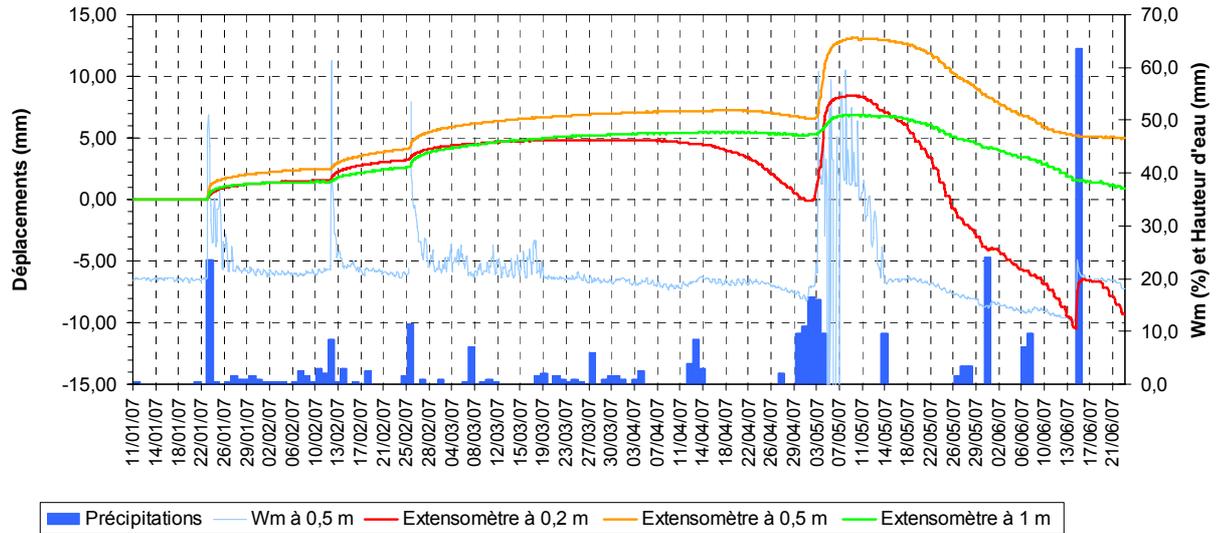


Illustration 48 – Comparaison entre les déplacements mesurés à 0,2 m, 0,5 m et 1 m de profondeur, la pluviométrie enregistrée et l'humidité mesurée à 0,5 m de profondeur sur le site de Mormoiron entre le 11/01/07 et le 22/06/07

L'observation des déplacements en subsurface permet de confirmer la survenance d'un gonflement rapide (conséquence directe de la ré-humidification) dans la tranche superficielle de sol suite à un épisode pluvieux ayant eu lieu en période de retrait (exemple du 02/05/07) aussi bien qu'en période de gonflement (exemple du 25/02/07). En revanche, un fort épisode pluvieux qui fait suite à une longue période de retrait peut avoir très peu d'influence sur la ré-humidification du sol à 0,5 m et 1 m (exemple du 15/06/07), ce qui s'explique sans doute par la difficulté de l'eau à s'infiltrer dans un sol desséché et dur en surface.

L'illustration 49 présente les valeurs d'humidité mesurées sur les cannes 1 et 2 sur le site de Mormoiron à des profondeurs comprises entre 0,5 et 2,5 m entre le 01/06/07 et le 22/06/07. Cette figure mélange les résultats obtenus sur les 2 cannes, seul moyen d'obtenir un profil complet de teneur en eau. L'observation attentive des profils de teneur en eau autour du 15/06/07 indique qu'une augmentation d'humidité se fait sentir jusqu'à 1,5 m de profondeur : à 0,5 m de profondeur les variations d'humidité atteignent 9 %, à 1 m de profondeur elles ne sont plus que de 3 % à 1,5 m elles sont de l'ordre de 1 %. Ainsi, les variations d'humidité à 0,5 m de profondeur permettent le gonflement de la couche de sol comprise entre 0,5 m et 0,2 m mais l'augmentation de la teneur en eau plus en profondeur est nettement plus faible et manifestement insuffisante pour provoquer un gonflement : elle ne fait qu'interrompre les déplacements à 0,5 et 1 m de profondeur.

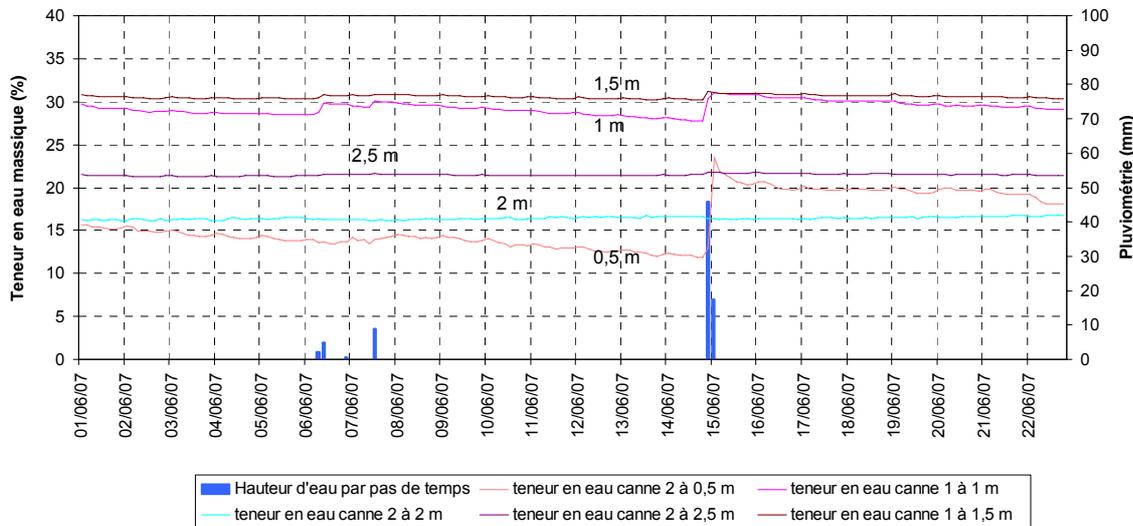


Illustration 49 – Influence des précipitations du 15/06/07 sur les variations d'humidité à des profondeurs comprises entre 0,5 et 2,5 m de profondeur (valeurs enregistrées sur la canne 1 ou la canne 2) – site de Mormoiron

La vitesse maximale de gonflement atteinte, calculée sur le pas de temps de mesure, atteint 2,55 mm en 3 h à 0,2 m de profondeur, ce qui correspondrait à une vitesse moyenne de l'ordre de 0,85 mm/h. Elle s'est produite suite aux précipitations du 15/06/07. Quant à la vitesse maximale de retrait observée, elle est de 0,33 mm toujours sur un pas de temps de 3 h (soit un maximum de 0,11 mm/h en moyenne) et a été obtenue le 25/05/07, suite à une douzaine de jours sans précipitations. Ainsi, le gonflement se produit beaucoup plus rapidement que le retrait (vitesse maximale environ 8 fois plus grande), ce qui est conforme aux résultats de modélisation réalisée avec le modèle BExM par le LAEGO (Vincent *et al.*, 2006 – BRGM/RP-54862-FR). Toutefois, les vitesses de gonflement décroissent significativement avec la profondeur, tandis que les vitesses de retrait décroissent plus faiblement.

5.2. PROPAGATION DU FRONT DE DESSICCATION

A l'inverse du front d'humidification, le front de dessiccation se caractérise, dans un sol homogène, par une teneur en eau croissante avec la profondeur selon un fort gradient d'humidité et délimite le sol sec du sol humide sous-jacent. Dans un sol hétérogène, deux horizons successifs peuvent être tous deux humides avec des teneurs en eau très différentes (ainsi à saturation, la teneur en eau massique d'un sable ne dépassera guère 20 % alors qu'elle peut être de l'ordre de 35 % dans un sol argileux). Dans ce type de profil, les valeurs de teneur en eau à différentes profondeurs ne peuvent donc pas être comparées entre elles.

La propagation en profondeur du front de dessiccation peut être estimée de différentes manières en considérant une profondeur donnée : une première approche consiste à suivre dans le temps les variations mensuelles d'humidité et une seconde se base sur l'évolution de la teneur en eau par rapport à sa valeur moyenne annuelle pour une profondeur donnée.

L'approche retenue dans cette partie consiste à comparer pour chaque mois, l'humidité mesurée par rapport à l'humidité moyenne annuelle de la tranche de sol en question. On considère ainsi, toujours avec un pas de temps mensuel, que chaque capteur se trouve au dessus du front de dessiccation si l'humidité qu'il mesure est supérieure à la moyenne annuelle observée à cette profondeur. Cette moyenne ne pouvant pour l'instant être calculée que sur les 31 mois d'observation disponibles, il va de soi que sa valeur ne peut être considérée que comme indicative et devra être affinée ultérieurement sur la base d'une période de suivi plus longue.

L'illustration 50 représente les profils hydriques moyens retenus pour les mesures enregistrées sur la canne 2 à Mormoiron, lesquels n'ont pas non plus été calés avec les quelques profils hydriques réalisés ponctuellement au cours de l'installation et depuis lors. Afin de prendre en compte les périodes pour lesquelles aucune mesure n'a été enregistrée, les moyennes obtenues à certaines profondeurs ont été légèrement corrigées : elles ont été revues à la baisse à 2 m de profondeur pour tenir compte de l'absence de donnée pendant l'été 2006 et revues légèrement à la hausse à 2,5 m de profondeur pour prendre en compte les lacunes en hiver.

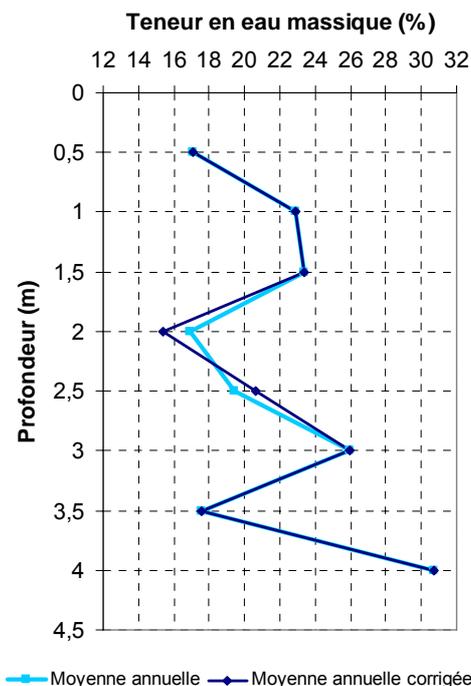


Illustration 50 – Profils hydriques moyens retenus pour la canne 2 sur le site de Mormoiron

L'illustration 51 représente l'humidité mesurée mensuellement sur chaque capteur par rapport à la valeur moyenne retenue pour ce capteur. Les plages rouges représentent un état de dessiccation (teneur en eau inférieure à la moyenne), alors que les plages bleues désignent un sol plus humide que la moyenne. Les périodes pour lesquelles aucune valeur n'était exploitable ont été interprétées : en bleu lorsque le capteur est en période de saturation et en rouge lorsque la valeur est très basse du fait du retrait autour du capteur.

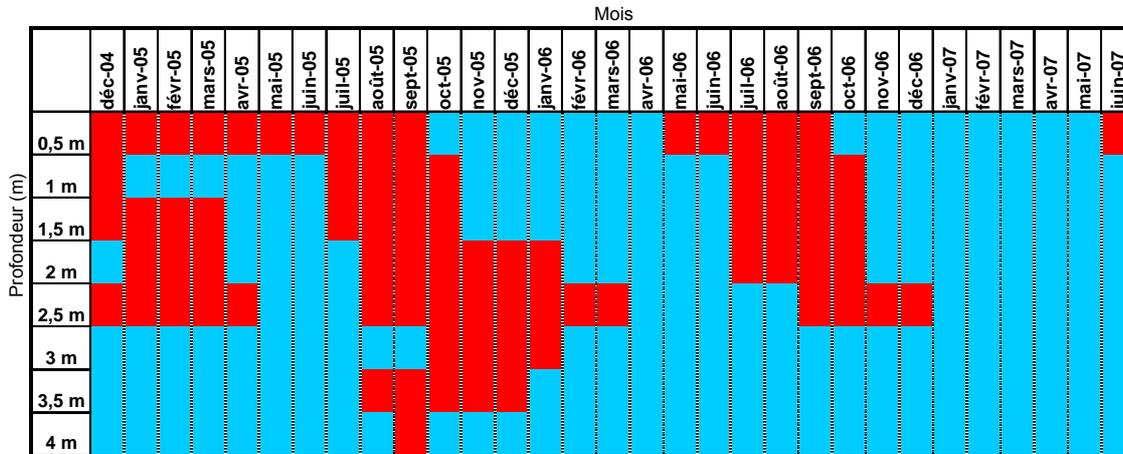


Illustration 51 – Etat hydrique mesuré par chaque capteur comparé au profil hydrique moyen obtenu sur le site de Mormoiron

Ces graphiques mettent en évidence un certain nombre de phénomènes :

- en période estivale le front de dessiccation semble se propager en profondeur depuis les couches superficielles et de même, en période hivernale, pour le front d'humidification ;
- le front de dessiccation a pénétré plus en profondeur au cours de l'été 2005 qu'en 2006 (il a atteint les couches profondes jusqu'à 3,5 voire 4 m de profondeur), ce qui est concordant avec le fait que l'été 2005 entre juin et août a été très sec (Illustration 31) ;
- à la date de juin 2007, le sol ne semble pas encore avoir été soumis au phénomène de sécheresse (mais est en cela conforme à juin 2005 et 2007).

5.3. CORRELATIONS ENTRE LES MESURES DE TENEUR EN EAU ET DE DEFORMATIONS

Cette partie tente d'établir les premières corrélations entre les mesures de teneur en eau et de déformation obtenues *in situ*. Afin de corréliser ces déplacements avec les mesures d'humidité, il est nécessaire de calculer les variations d'épaisseur ou les déformations subies par des couches d'épaisseur restreinte. Pour cela, les déplacements enregistrés par deux extensomètres voisins sont soustraits.

Les variations d'épaisseur et les déformations ont ainsi été calculées pour les couches comprises entre 0,2 et 0,5 m, 0,5 et 1 m, 0,2 et 1 m et 1 et 6 m (le niveau à 6 m de profondeur, point d'ancrage des extensomètres, étant considéré comme fixe).

L'illustration 52 présente les déformations calculées pour chacune de ces couches. La couche de surface présente une incohérence apparente pour les premières pluies : en effet, la courbe rouge traduit un tassement initial du sol (déformation négative) alors

qu'on se trouve, *a priori*, en phase de gonflement. Ceci est peut-être le fait d'un réajustement initial du sol autour du capteur. Les déformations de la couche comprise entre 1 et 6 m sont quant à elles très faibles et ne sont pas directement exploitées dans la suite de l'analyse, d'autant que cette tranche de sol ne peut être considérée comme lithologiquement homogène.

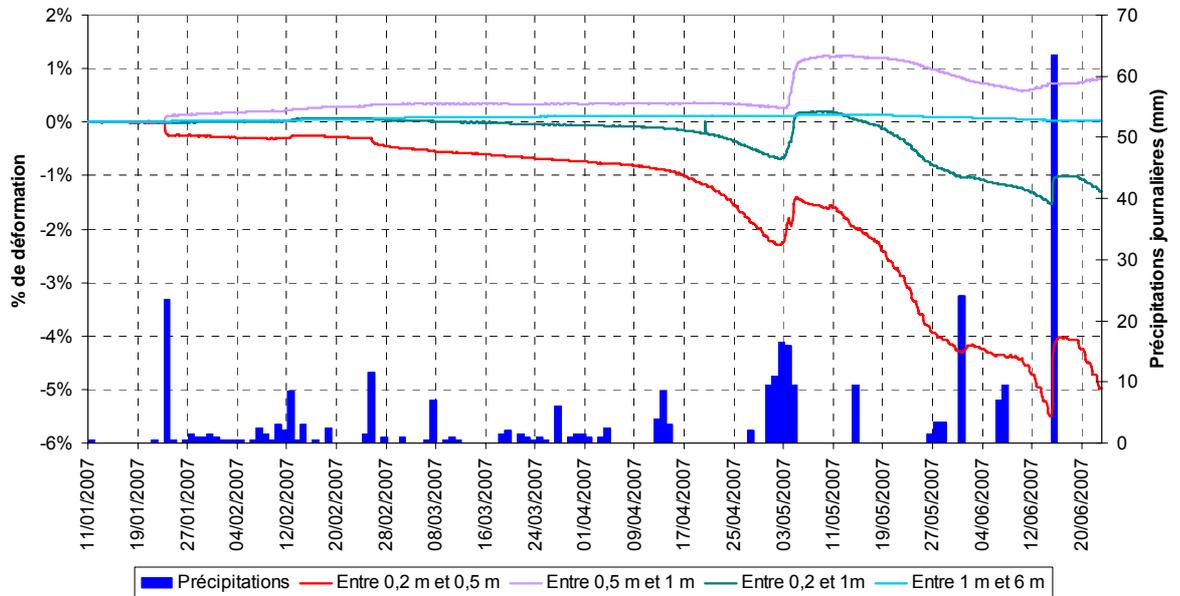


Illustration 52 – Déformations calculées pour les différentes couches de sol – site de Mormoiron

Concernant la mesure de la teneur en eau, seules les données enregistrées par la canne 2 ont été exploitées, pour les raisons citées précédemment mais également du fait de leur plus grande proximité avec les extensomètres. Les teneurs en eau recherchées sont celles localisées au milieu des couches observées, soit les teneurs en eau à 0,35 m, à 0,75 m et à 0,6 m. Les seules mesures d'humidité réellement exploitables (disponibles sur toute la période comprise entre le 11/01/07 et le 22/06/07) sont celles mesurées à 0,5 m de profondeur ; ce sont donc celles-ci qui ont été utilisées pour établir les corrélations.

L'illustration 53, qui présente la déformation de l'épaisseur de la tranche de sol comprise entre 0,2 et 1 m et la teneur en eau massique à 0,5 m au cours du temps (à un pas de temps journalier), semble montrer que les déformations sont particulièrement bien corrélées avec l'humidité mesurée à 0,5 m.

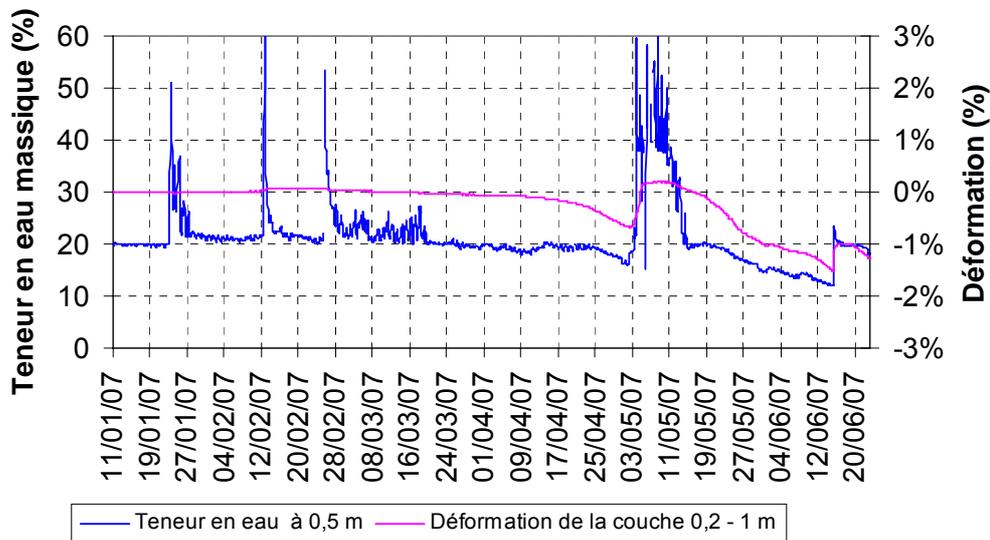


Illustration 53 – Évolution de la déformation de la couche 0,2 à 1 m en fonction de la teneur en eau massique à 0,5 m – site de Mormoiron

Cette illustration montre qu'entre le 11 janvier et le 3 mai 2007, les déformations du sol sont très peu influencées par les variations de teneur en eau. Ainsi, les rapides augmentations de teneur en eau des 23/01/07, 12/02/07, et 25/02/07 induisent très peu de déformations. Entre le 25/02/07 et le 03/05/07, le sol connaît un tassement d'à peine 1 %. Ensuite, les précipitations de mai 2007 engendrent une augmentation de la teneur en eau du sol, qui passe de 20 à 45 % et un gonflement quasi-immédiat du sol de l'ordre de 1 %. Puis la teneur en eau diminue et passe de 45 % à 15 %, ce qui s'accompagne d'un tassement de 1,2 %. Enfin, le tassement est interrompu par une brève remontée de la teneur en eau d'environ 10 %, ce qui est accompagné d'un gonflement ponctuel de 0,3%.

6. Suivi et interprétation des mesures enregistrées sur le site du Deffend

6.1. RESULTATS DES MESURES

6.1.1. Données météorologiques

Deux sources de données météorologiques sont disponibles : d'une part les données enregistrées depuis 1949 par Météo-France dans sa station de Poitiers-Biard, située à environ 8 km du site et à la même altitude, et d'autre part des données mesurées directement sur le site par l'Université de Poitiers depuis le 13 novembre 2002.

Ces données ont été comparées sur la période de disponibilité commune aux deux séries. Le graphique ci-après (Illustration 54) représente les données mesurées par l'Université de Poitiers et par Météo-France entre décembre 2002 et décembre 2006.

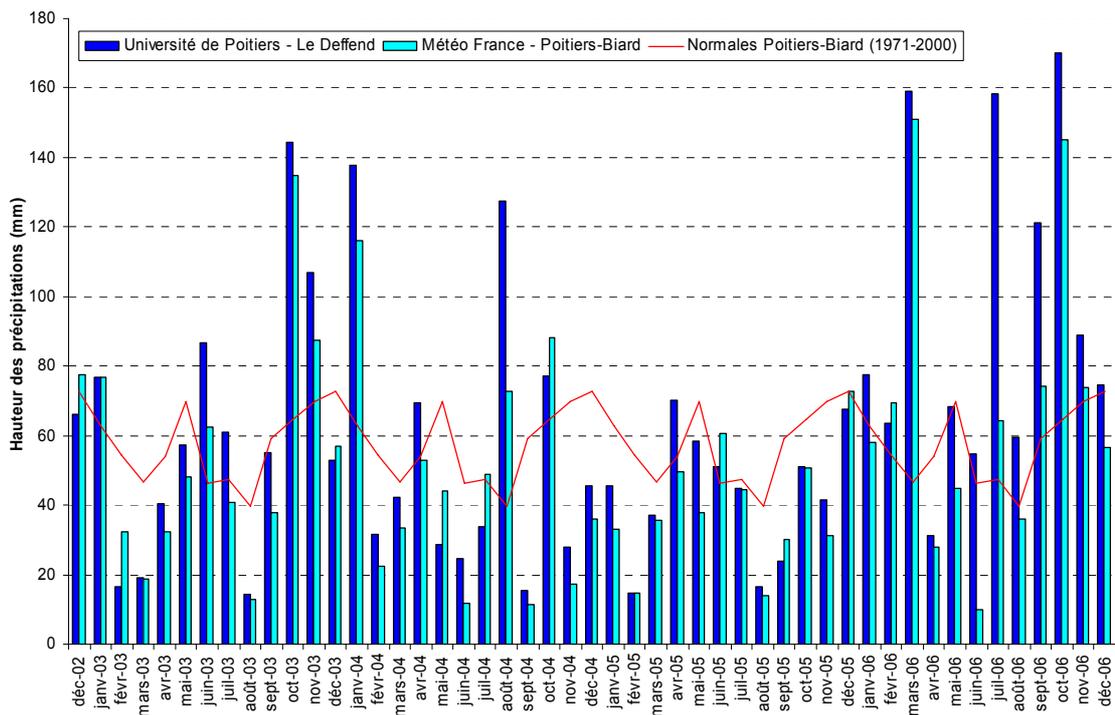


Illustration 54 – Pluviométrie mensuelle enregistrée sur le site du Deffend par l'Université de Poitiers et sur la station de Poitiers-Biard par Météo-France

La période de comparaison montre des précipitations globalement plus importantes sur le Deffend que sur Poitiers-Biard. En moyenne, les précipitations mensuelles sont

30 % plus importantes au Deffend qu'à Poitiers-Biard, sans qu'une explication ait pu être apportée pour l'instant à un tel écart. Une partie des différences peut s'expliquer par des orages localisés, qui semblent plus fréquents au Deffend qu'au nord-ouest de Poitiers. Ainsi, le 17 juin 2006, alors que la station de Poitiers-Biard n'a enregistré que 3,8 mm de pluie, ce sont 36,8 mm de pluie qui ont été observés au Deffend, ce qui explique largement l'écart en pluviométrie mensuelle constaté en juin 2006 entre les données de l'Université de Poitiers et celles de Météo-France. Cet orage sur le site du Deffend est par ailleurs corrélé avec une forte augmentation de l'humidité mesurée à 0,5 m de profondeur en prairie, ce qui atteste de sa réalité locale. Le bulletin mensuel publié par Météo France confirme d'ailleurs l'importance des orages sur la zone concernée (Illustration 55).

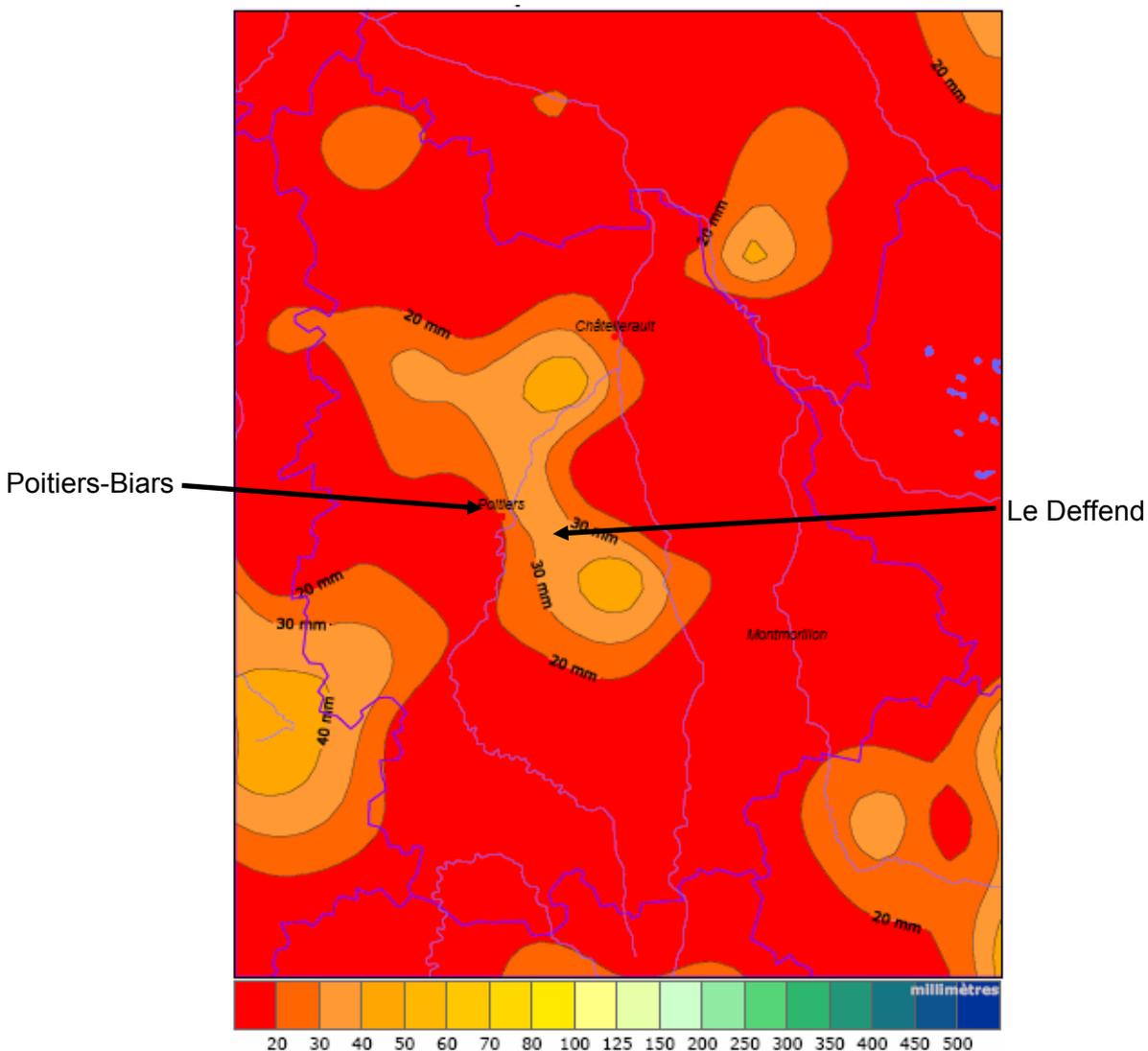


Illustration 55 – Carte départementale des précipitations mensuelles de la Vienne au mois de juin 2006 (issu du bulletin Météo France de la Vienne pour juin 2006)

Une analyse plus approfondie des données recueillies par l'Université de Poitiers est en cours pour tenter de mieux comprendre l'origine des écarts observés et s'assurer de l'absence d'un biais systématique qui expliquerait les écarts constatés. En première approche, il semble cependant que la répartition temporelle des précipitations soit très comparable d'une station à l'autre.

Pour des raisons pratiques de disponibilité des mesures, il a été décidé d'exploiter dans la suite de cette étude prioritairement les données enregistrées sur le site par l'Université de Poitiers, en utilisant néanmoins les données de Météo-France pour suppléer aux lacunes occasionnellement causées par les pannes de la station. Ces données de cumul de précipitation et de température moyenne au pas de temps mensuel sont représentées sur le graphique de l'illustration 56 sur la période allant de décembre 2002 à juin 2007.

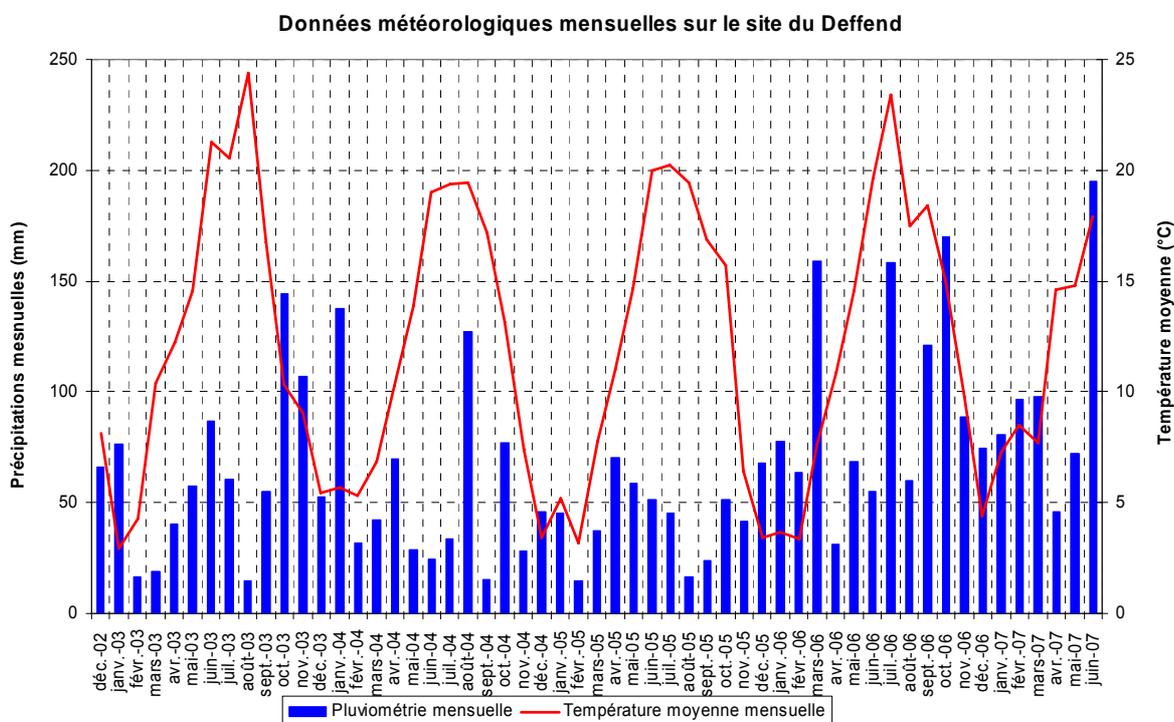


Illustration 56 – Température moyenne mensuelle et cumul mensuel de précipitation enregistrés sur le site du Deffend par l'Université de Poitiers de décembre 2002 à juin 2007

Ces données permettent de caractériser les conditions météorologiques mensuelles moyennes sur une année (Illustration 57), même si ces données moyennes sont calculées sur une période très courte correspondant aux 5 années sur lesquelles les données sont disponibles, et ne peuvent donc être comparées aux moyennes Météo-France, réalisées sur des périodes considérablement plus importantes (1949 à 2006).

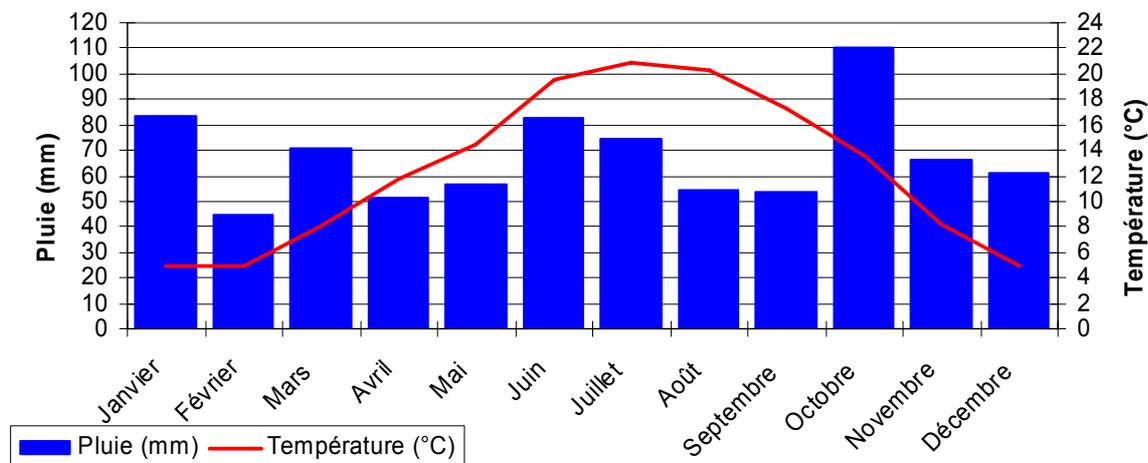


Illustration 57 – Précipitations et températures moyennes mensuelles sur la période 2002-2007 d'après les données disponibles sur le site du Deffend

Ainsi, la moyenne des cumuls de précipitations annuelles est estimée à 760,5 mm d'après les données de l'Université de Poitiers pour une température annuelle moyenne de 12,1 °C, alors que les mêmes valeurs annuelles moyennes calculées à partir des données enregistrées par Météo-France à la station de Poitiers-Biard sur la période comprise entre 1971 et 2000 atteignent seulement 687,5 mm de cumul de précipitations par an pour une température moyenne de 11,3 °C.

Sur les dernières années qui intéressent plus directement l'étude (2003 à 2006), la comparaison entre les deux séries de données indique systématiquement des cumuls de précipitation supérieurs au Deffend qu'à la station de Poitiers-Biard (Illustration 58).

Année	Température moyenne (Université de Poitiers, site du Deffend) (°C)	Température moyenne (Météo France, station de Poitiers-Biard) (°C)	Précipitations (Université de Poitiers, site du Deffend) (mm)	Précipitations (Météo France, station de Poitiers-Biard) (mm)
2003	12,33	12,69	730,9	641,4
2004	11,75	11,66	661,8	555,2
2005	11,99	11,96	522,7	475,0
2006	12,36	12,43	1 126,7	824,7

Illustration 58 – Caractéristiques moyennes des années 2003 à 2006 sur le site du Deffend et à Poitiers-Biard

Ces données montrent néanmoins que par rapport à l'ensemble des données disponibles (Météo-France et Université de Poitiers), l'année 2003 s'est révélée relativement chaude (écart de 12 % par rapport à la normale 1971-2000 de Poitiers-

Biard), bien que les précipitations ne soient que légèrement inférieures à la normale (de l'ordre de 7 % sur Poitiers-Biard).

L'année 2004 présente quant à elle une température sensiblement conforme à la normale, mais des précipitations relativement faibles (inférieures de 19,2 % à la normale sur 30 ans).

L'année 2005 est en moyenne un peu plus chaude et surtout les précipitations enregistrées traduisent un déficit considérable (supérieur de 30,9 % à la normale à Poitiers-Biard).

Quant à l'année 2006, bien que particulièrement chaude (et même plus chaude que 2003, d'après les données de l'Université de Poitiers), elle présente des précipitations bien supérieures à la moyenne. D'après les données enregistrées sur le site du Deffend, le cumul annuel de pluie en 2006 serait même plus de deux fois supérieur à celui de 2005.

Les premières données fournies sur le site du Deffend pour l'année 2007 montrent des mois de février et mars particulièrement humides, alors que janvier, avril et mai bénéficient de précipitations très légèrement inférieures aux normales sur le site. Le bilan sur les 6 premiers mois de l'année 2007 montre au final un cumul de l'ordre de 590 mm d'eau, soit davantage que les cumuls sur toute l'année de 2004 et 2005. En comparaison, la pluviométrie sur le premier semestre de 2006, année particulièrement humide, s'élevait seulement à 454 mm d'eau.

6.1.2. Mesures de température

Sur certains des capteurs Humitub, des mesures de températures sont effectuées. Ces données sont disponibles sur la grappe 2 (prairie) aux profondeurs de 0,5 m, 1 m, 1,5 m, 2 m, 2,5 m, 3 m, 3,5 m, 4 m, 5 m et 6 m, et sur la grappe 1 (forêt) aux profondeurs de 0,5 m, 1,5 m, 2,5 m et 5 m.

L'illustration 59 montre la comparaison des mesures effectuées sur les deux grappes (en prairie et en forêt) avec celles obtenues par une simulation simple réalisée en appliquant l'équation de la chaleur aux températures enregistrées dans l'air sur le site, moyennant un coefficient de diffusivité thermique de $0,95 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ (à titre d'exemple, Williams et Gold (1977) proposent des valeurs de diffusivité thermique allant de $10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ pour un sable sec à $2 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ pour de la roche, avec une valeur de $1,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ pour l'argile humide et $2 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ pour l'argile sèche).

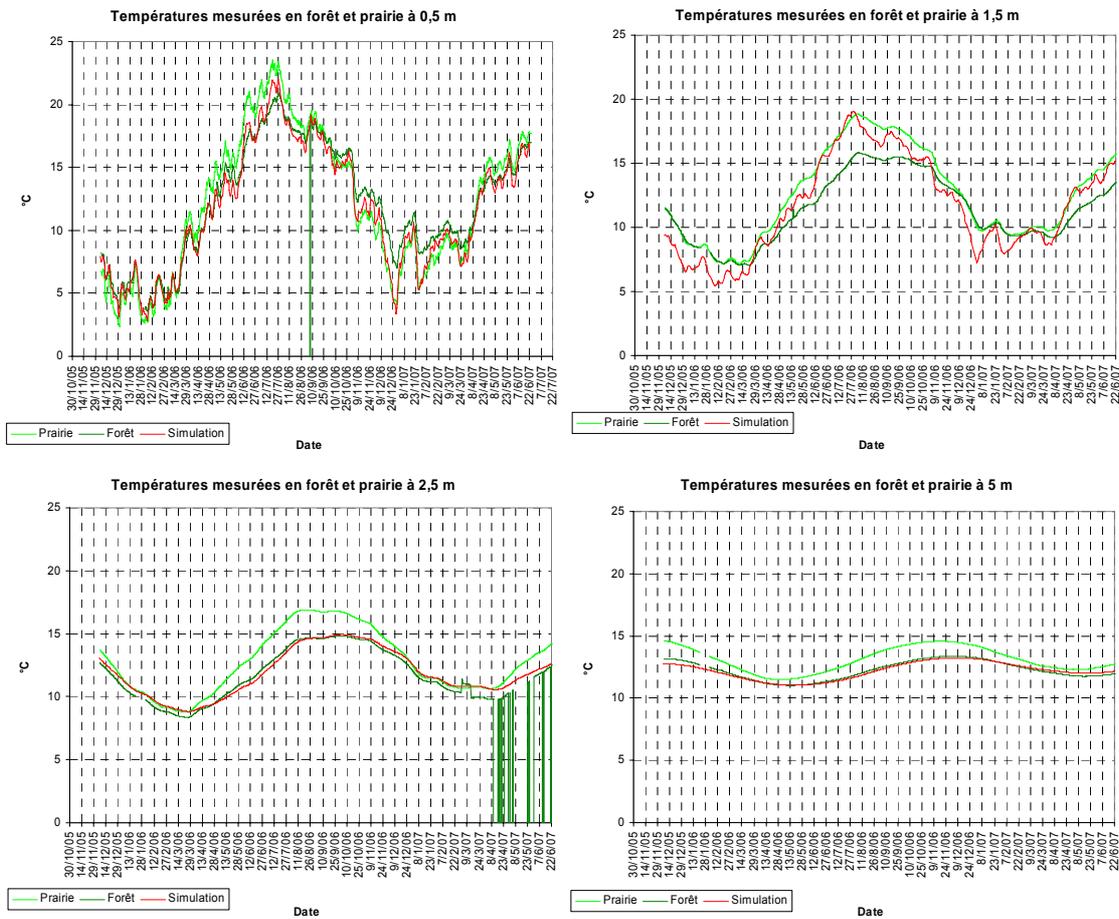


Illustration 59 – Températures dans le sol du Deffend mesurées en prairie et en forêt, et issues d'une simulation numérique simple

Conformément aux résultats attendus, les températures mesurées présentent bien des oscillations sensiblement sinusoïdales, d'amplitude décroissante avec la profondeur, et avec un déphasage traduisant un retard de la propagation des phénomènes en profondeur.

Ces résultats mettent également en évidence l'influence du couvert végétal sur la température dans les sols : alors qu'en période « froide » (c'est-à-dire en hiver à proximité de la surface, et plutôt au printemps pour les capteurs plus profonds) les températures mesurées en forêt et en prairie sont sensiblement équivalentes (malgré des variations journalières moindres en forêt), les périodes « chaudes » se traduisent en prairie par des températures plus élevées qu'en forêt de 3 °C environ aux abords de la surface, et de l'ordre de 1,5 °C à 5 m de profondeur. Ceci s'explique par la présence du couvert végétal en forêt, qui protège le sol du rayonnement solaire et limite ainsi l'élévation de température à la surface du sol.

Les résultats fournis par l'application de l'équation de la chaleur sont cohérents avec les amplitudes et les déphasages observés sur les mesures. On notera toutefois que

ces résultats semblent plus proches des températures mesurées en prairie pour les horizons de surface (avec cependant des variations journalières amplifiées, particulièrement à 1,5 m), alors qu'ils se rapprochent des températures mesurées en forêt pour les horizons profonds.

6.1.3. Mesures d'humidité

Grappe 1 (forêt)

Les illustrations 32 à 34 présentent les mesures d'humidité obtenues en forêt sur le site du Deffend. Seules ont été représentées les courbes présentant au moins une période dont la validité de la mesure semble garantie (absence de saturation).

Ces graphiques montrent que la plupart des capteurs ont connu durant leur période de fonctionnement (depuis décembre 2005) des périodes de saturation, d'allures et de durées variables. Ces phénomènes sont encore mal expliqués, mais la plupart peuvent clairement être attribués à des teneurs en eau trop élevées pour la gamme de mesure du capteur (comprise entre 4 et 20 mA).

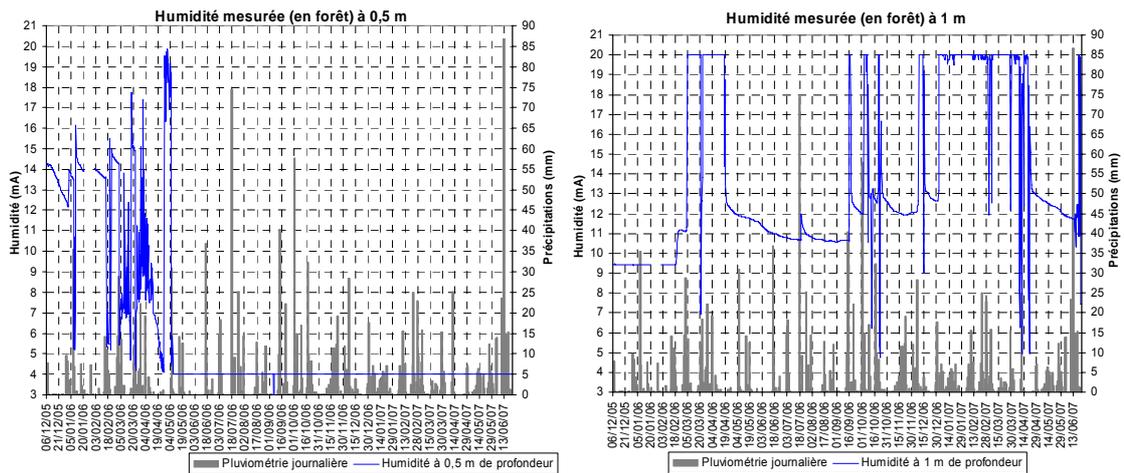


Illustration 60 - Mesures brutes des capteurs Humitub de la grappe 1 (forêt) sur le site du Deffend à 0,5 et 1 m de profondeur

Concernant le capteur à 0,5 m (Illustration 60), les premières mesures réalisées se sont avérées encourageantes, malgré des saturations répétées mais brèves, liées à l'infiltration des eaux de pluie dans les horizons superficiels. Malheureusement, depuis le 7 mai 2006, plus aucune mesure valide n'a pu être réalisée avec ce capteur (signal constant de 4 mA). L'origine de la panne n'a pu être identifiée, mais un contrôle sur site a montré une probable dégradation du capteur lui-même. Ce capteur devrait donc être enlevé pour vérification lors d'une prochaine intervention, puis éventuellement remplacé sur le site s'il s'avère encore utilisable.

Le capteur à 1 m (Illustration 60), quant à lui, détecte des pics d'humidité qui se traduisent en général par une saturation temporaire du capteur. Ces pics d'humidité

sont bien corrélés avec les épisodes pluvieux enregistrés par Météo-France et par l'Université de Poitiers. On notera toutefois une saturation prolongée du capteur entre le 1^{er} janvier 2007 et le 24 avril 2007. Cette saturation correspond à une période particulièrement humide (plus de 318 mm d'eau entre le 29 décembre 2006 et le 16 avril 2007 d'après les données de l'Université de Poitiers).

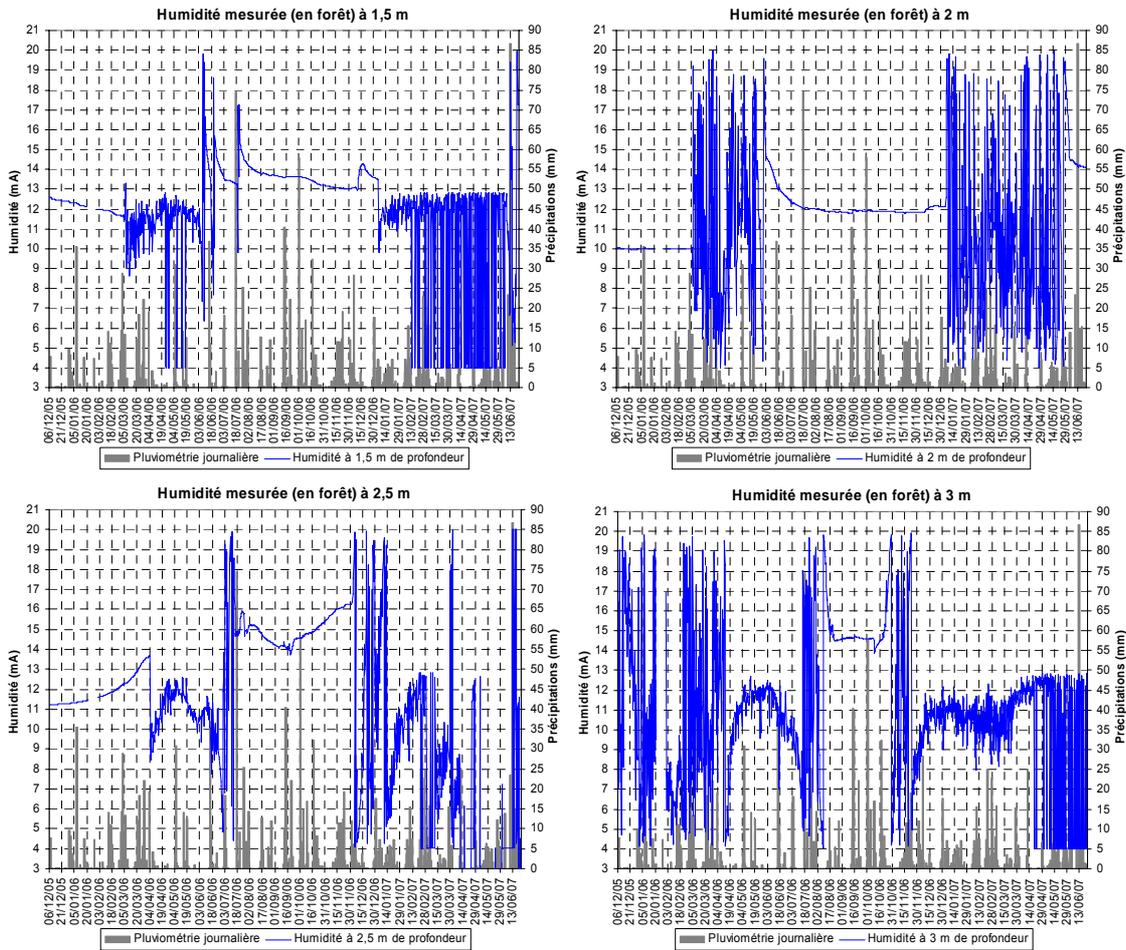


Illustration 61 - Mesures brutes des capteurs Humitub de la grappe 1 (forêt) sur le site du Deffend à 1,5 m, 2 m, 2,5 m et 3 m de profondeur

A 1,5 m, 2 m et 2,5 m (Illustration 61), les capteurs ont fonctionné correctement jusqu'au début mars 2006 où un fort épisode pluvieux (plus de 75 mm de pluie en une semaine) a provoqué une saturation des capteurs jusqu'à la mi-juin, voire début août. Les mesures sont ensuite valides et mettent en évidence un certain nombre d'épisodes pluvieux jusqu'au 4 janvier 2007 (2 décembre 2006 seulement à 2,5 m), où des phénomènes de saturation durables s'installent et empêchent toute nouvelle mesure depuis cette date sur ces capteurs. On peut toutefois noter à 2 m un récent retour à des mesures fiables (depuis le 5 juin 2007), qui annonce probablement aussi un retour à la normale sur les capteurs à 1,5 m et à 2,5 m. Ces trois capteurs permettent également l'observation d'un front de dessiccation au cours de l'hiver 2005-2006 : alors

qu'on observe une dessiccation régulière à 1,5 m, l'humidité reste très stable à 2 m et elle augmente considérablement à 2,5 m.

À 3 m (Illustration 61), les seules mesures valides obtenues correspondent à la période estivale, entre mi-juin et mi-octobre 2006. En dehors de ces dates, le capteur est manifestement en saturation suite à une trop grande humidité du sol.

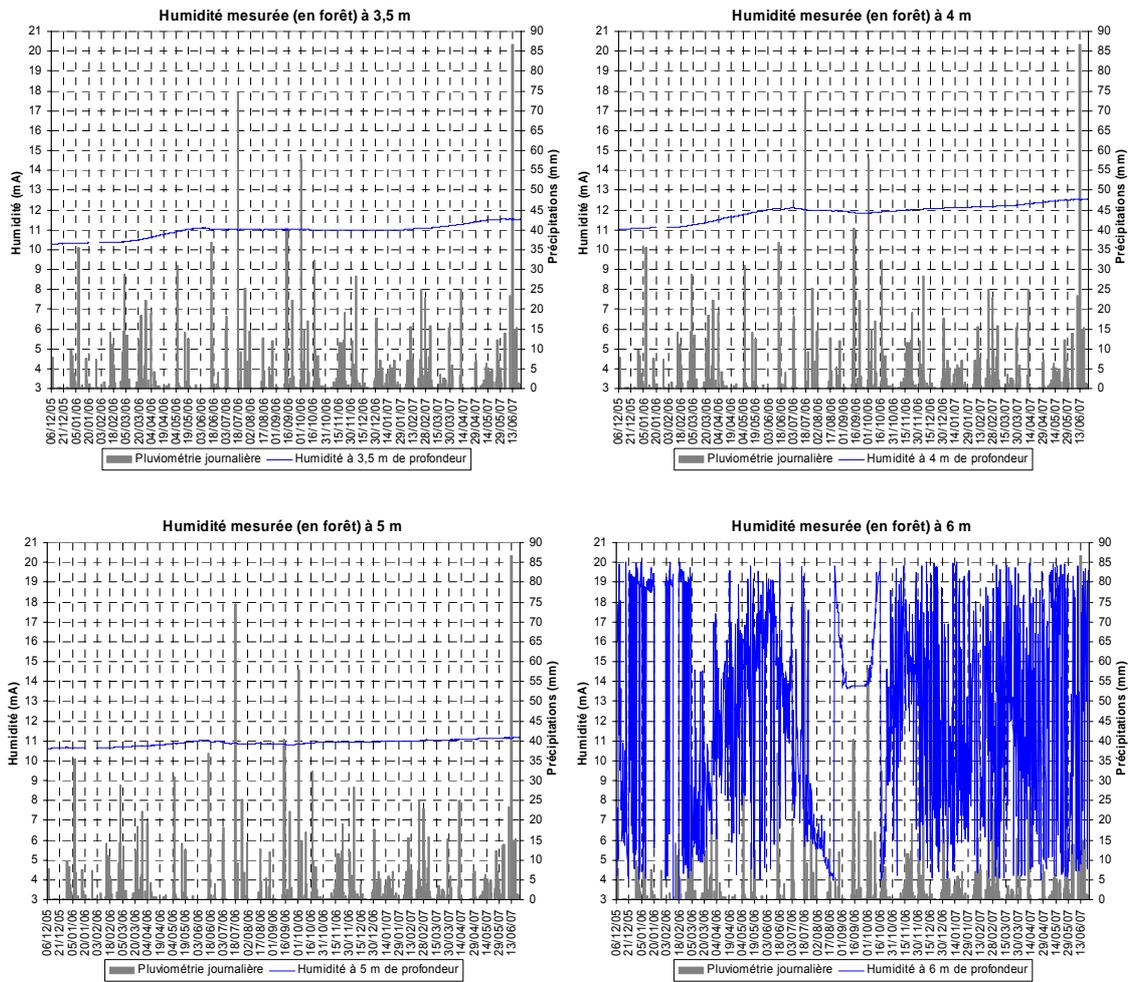


Illustration 62 – Mesures brutes des capteurs Humitub de la grappe 1 (forêt) sur le site du Deffend à 3,5 m, 4 m, 5 m et 6 m de profondeur

À 3,5 m, 4 m et 5 m (Illustration 62), les courbes de variations d'humidité obtenues présentent toutes les trois la même allure : une augmentation progressive de l'humidité entre les premières mesures de décembre 2005 (état très sec, confirmé visuellement sur le terrain lors de l'installation du site) et début juin à mi-juin 2006, puis une légère dessiccation et une période plus stable avant une nouvelle accélération de l'humidification à partir de mars 2007. Ce comportement pourrait s'expliquer par le caractère particulièrement sec des années 2004 et 2005, qui se traduirait par la propagation jusqu'à ces profondeurs d'un état de dessiccation très marqué, avant une

ré-humidification en 2006 et 2007, années très humides d'après les données disponibles.

Enfin, le capteur implanté à 6 m de profondeur (Illustration 62) n'a fourni de mesures exploitables qu'entre la fin août et la mi-octobre 2006, le reste des mesures correspondant à des périodes de saturation du capteur.

A 7 m, le capteur n'a jamais fonctionné depuis son montage, le signal étant constamment nul.

Grappe 2 (prairie)

L'illustration 63 présente les mesures d'humidité obtenues en prairie sur le site du Deffend (grappe 2). Seules ont été représentées les courbes présentant au moins une période dont la validité de la mesure semble garantie (absence de saturation).

Sur la grappe 2, on peut noter le fonctionnement en continu du capteur implanté à 0,5 m, qui n'a jamais subi de période de saturation, mais qui présente des pics d'humidité particulièrement bien corrélés avec la pluviométrie enregistrée sur le site.

Il en est de même pour le capteur implanté à 1 m de profondeur : les pics d'humidité sont très marqués et bien corrélés avec la pluviométrie. Seuls quelques courts épisodes pluvieux provoquent une saturation du capteur : de fin mars 2006 jusqu'au 10 avril 2006 (un important pic d'humidité suite aux 34 mm de pluie tombés entre le 22 et le 24 mars 2006, puis une saturation consécutive à un cumul de précipitation de 22 mm le 30 mars), du 3 octobre 2006 au 5 novembre 2006 (près de 60 mm de pluie le 3 octobre), et enfin entre le 18 novembre et le 10 décembre 2006 (avec seulement 11,5 mm de pluie le 11 novembre). Aucune autre période de saturation n'est à déplorer ensuite jusqu'au 14 juin 2007 où près de 87 mm de pluie déclenchent une saturation qui n'est pas encore achevée le 22 juin 2007.

A 1,5 m, on retrouve des mesures similaires à celles obtenues sur la grappe 1 : après des premières mesures tout à fait intéressantes durant l'hiver 2005-2006, un épisode pluvieux plus intense provoque la saturation du capteur entre le 17 février et le 17 juillet 2006 (plus de 35 mm d'eau entre le 15 et le 17 février 2006). La période estivale, plus sèche, permet alors le suivi de l'humidité durant près de 4 mois, puis la saturation reprend le 19 novembre 2006 (32,3 mm de pluie).

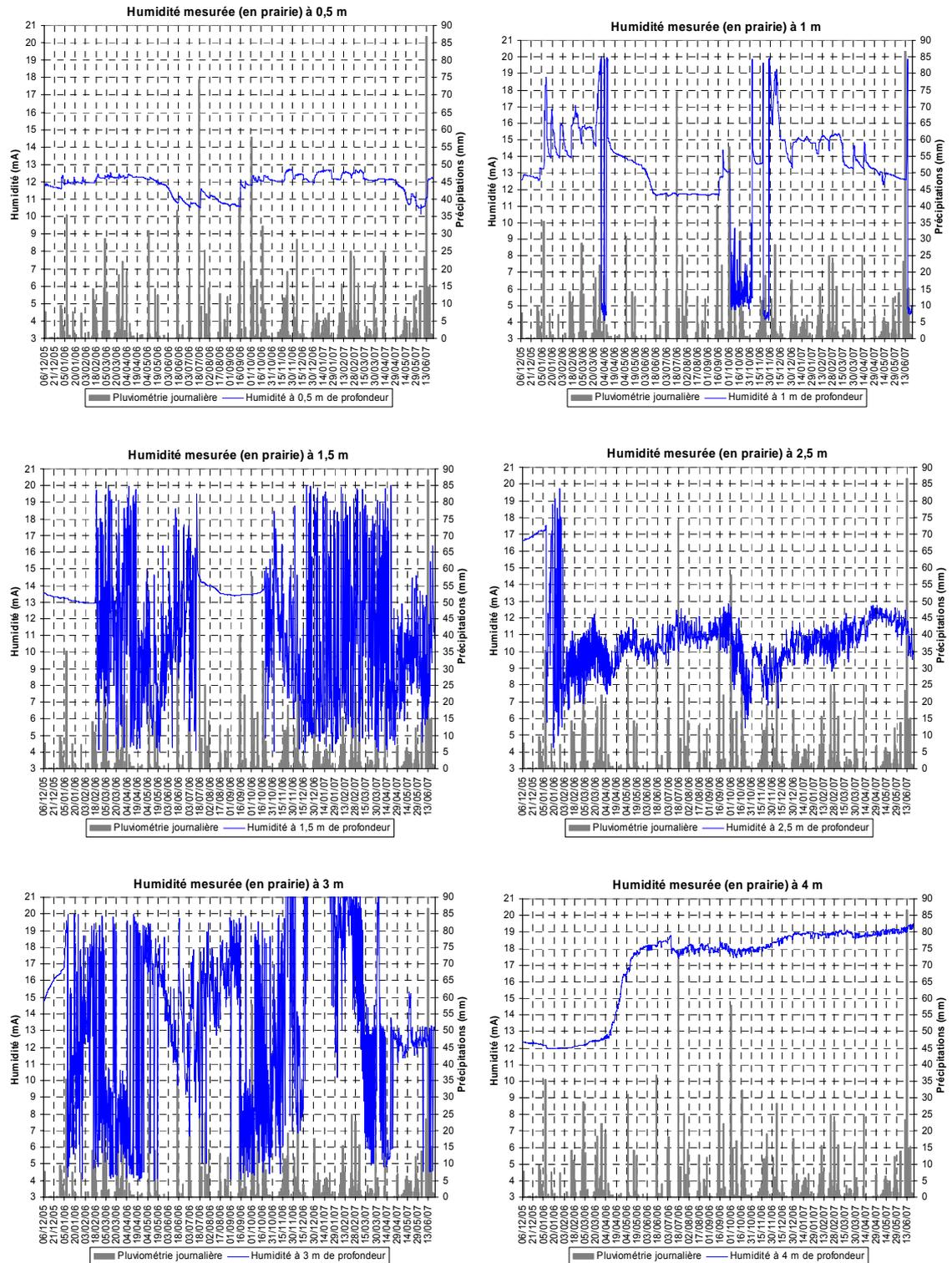


Illustration 63 - Mesures brutes des capteurs Humitub de la grappe 2 (prairie) sur le site du Deffend entre 0,5 m et 4 m de profondeur

6.1.4. Interprétation des mesures

Afin de faciliter la lecture et l'interprétation des mesures d'humidité, ces données ont été mensualisées en établissant une moyenne sur l'ensemble des mesures fiables réalisées chaque mois. Les résultats sont présentés sur les illustrations suivantes sous forme de teneurs en eau volumiques, obtenues par conversion des intensités mesurées en permittivité, puis en teneurs en eau volumiques par la relation de Weiller (Vincent *et al.*, 2006). Il faut toutefois noter que certaines valeurs de l'humidité peuvent être sous-estimées du fait de la saturation des capteurs qui empêche parfois de moyenniser les mesures sur les périodes les plus humides du mois.

Grappe 1 (forêt)

A 0,5 m de profondeur (Illustration 64), les 4 mois sur lesquels les mesures sont disponibles mettent en évidence une ré-humidification de la couche la plus superficielle du sol durant l'hiver 2005-2006, à partir d'un état probablement très sec, compte tenu des faibles précipitations enregistrées en 2005.

A 1 m de profondeur (Illustration 64), l'état initial en décembre 2005 apparaît également particulièrement sec par rapport aux mesures obtenues ultérieurement.

La ré-humidification se produit très rapidement entre février et avril 2006, grâce, en particulier, aux intenses précipitations du mois de mars (plus de 150 mm dans le mois).

Les mois d'avril, mai et juin 2006 se révélant ensuite assez secs (moins de 70 mm mensuels), une phase de dessiccation commence et se prolonge pendant la période estivale, malgré les importants orages survenus au mois de juillet (près de 160 mm), ce qui s'explique par l'importance de l'évapotranspiration à cette période du fait de la reprise de l'activité végétale en forêt. On peut toutefois noter que malgré cette dessiccation de 4 mois, le sol reste nettement plus humide qu'en début d'hiver 2005, période particulièrement sèche.

La ré-humidification reprend dès octobre et novembre 2006, entretenue par des précipitations soutenues, mais s'arrête en décembre avec un ralentissement des précipitations. Ensuite, malgré l'absence de précipitations prononcées, aucune mesure fiable n'a été enregistrée jusqu'au mois de mars 2007. Ceci s'explique probablement par un cumul de précipitations soutenu sur plusieurs mois, intervenant sur un sol déjà particulièrement humide.

Les mesures redeviennent exploitables au mois d'avril 2007, où l'on note la plus forte humidité jamais enregistrée à cette profondeur (35,2 % en teneur en eau volumique). Les résultats ensuite obtenus en mai et juin 2007 traduisent une dessiccation de cet horizon. On peut toutefois noter qu'un violent orage le 14 juin 2007 (près de 87 mm d'eau) a provoqué une saturation du capteur et donc une ré-humidification, non retenue pour le calcul de l'humidité mensuelle. Le mois de juin 2007, bien qu'incomplet pour les résultats présentés ici (données disponibles du 1^{er} au 22 juin 2007) se révèle en effet le plus humide jamais rencontré depuis décembre 2005 en termes de précipitations.

Globalement, l'allure des variations d'humidité mesurées traduit correctement les conditions météorologiques sur la période d'observation : un état initial très sec en hiver 2005, après une année très peu pluvieuse, puis une ré-humidification significative au cours de 2006, où les précipitations sont très supérieures à la normale, et enfin une poursuite de l'humidification en 2007, après un premier semestre encore plus humide. La teneur en eau volumique à 1 m de profondeur en décembre 2006 se révèle ainsi supérieure de près de 18 points à celle enregistrée en décembre 2004, alors que l'humidité en juin 2007 est supérieure de plus de 4 points à celle enregistrée en juin 2006. Il semble donc, d'après les données disponibles sur fin 2005, l'année 2006 et le premier semestre 2007, que les variations interannuelles soient plus marquées en hiver qu'en été. Quant aux variations inter-saisonniers, elles semblent présenter un contraste assez limité en 2006 et sur les données disponibles en 2007, mais sensiblement plus fort en 2005 où l'on observe une augmentation d'humidité de l'ordre de 18 points en l'espace de 3 mois.

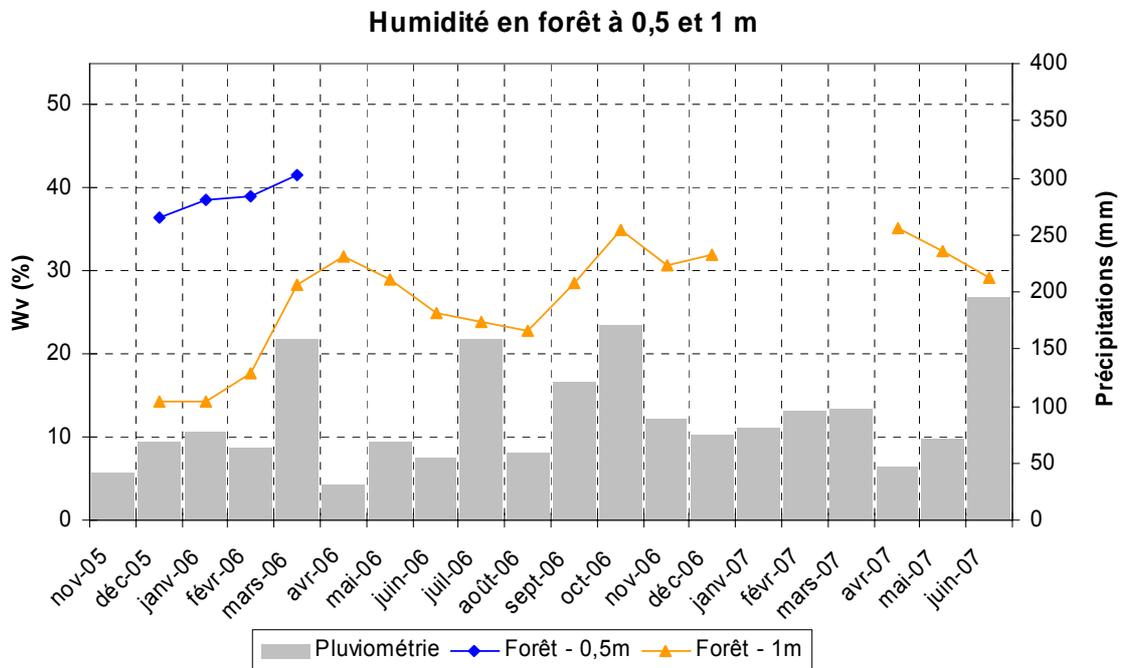


Illustration 64 - Mesures d'humidité mensualisées à 1 m en forêt et pluviométrie mensuelle sur le site du Deffend

A une profondeur de 1,5 m (Illustration 65), les données disponibles sont plus limitées, du fait de la saturation du capteur lors des épisodes les plus humides.

Après une dessiccation initiale, les fortes pluies de mars 2006 ont provoqué la saturation du capteur, inexploitable jusqu'à juin 2006. Les mesures disponibles entre juin et décembre 2006 montrent un sol sensiblement plus humide que pendant l'hiver 2005-2006.

Le sol, dans cette tranche de profondeur, paraît cependant peu sensible aux orages estivaux, les fortes précipitations de juillet, septembre et octobre n’ayant que peu ou pas d’influence visible sur la teneur en eau volumique. L’infiltration de l’eau jusqu’à 1,5 m de profondeur est en effet limitée par l’évapotranspiration et le pompage par les racines d’arbres durant cette période, ce qui se traduit par une dessiccation lente mais régulière. Comme à 1 m de profondeur, les quelques mois de précipitations limitées mais régulières entre novembre 2006 et mars 2007 provoquent une saturation du capteur et donc une perte des mesures. Seuls les derniers jours disponibles en juin permettent de nouveau d’estimer l’humidité du sol. Les valeurs obtenues sont alors considérablement plus élevées qu’avant l’hiver, aux limites des capacités estimées des capteurs.

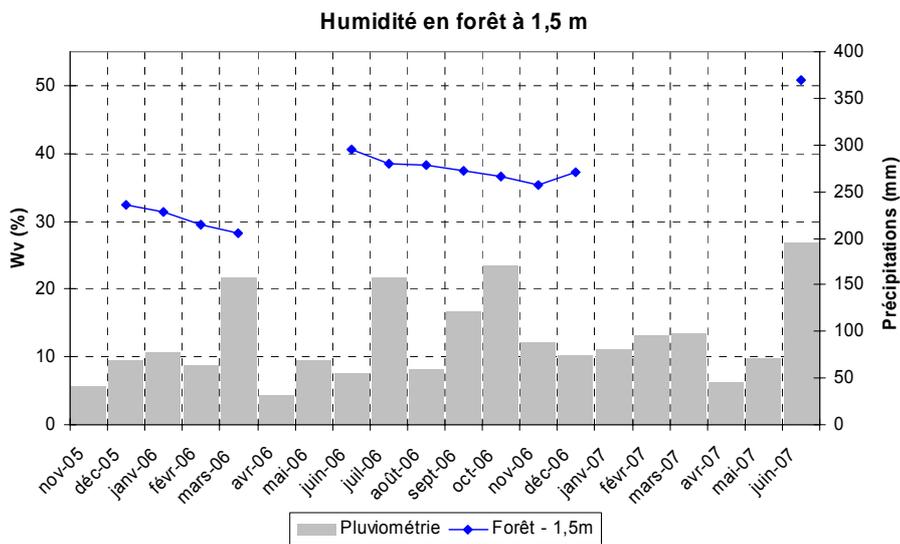


Illustration 65 - Mesures d'humidité mensualisées à 1,5 m en forêt et pluviométrie mensuelle sur le site du Deffend

A 2 m (Illustration 66), les périodes de disponibilité des mesures sont assez similaires à celles observées à 1,5 m, bien que le signal semble sortir de saturation plus rapidement (un mois plus tôt pour chacune des deux périodes de saturation observées).

On observe cependant que par rapport aux mesures obtenues à 1 m, les valeurs de la teneur en eau volumique varient peu en dehors des périodes de sortie de saturation : l'état hydrique semble très stable sur les quatre premiers mois de mesure, ainsi que durant l'été-automne 2006, où les valeurs d'humidité mesurées sont là encore bien supérieures à celles obtenues durant l'hiver 2005-2006.

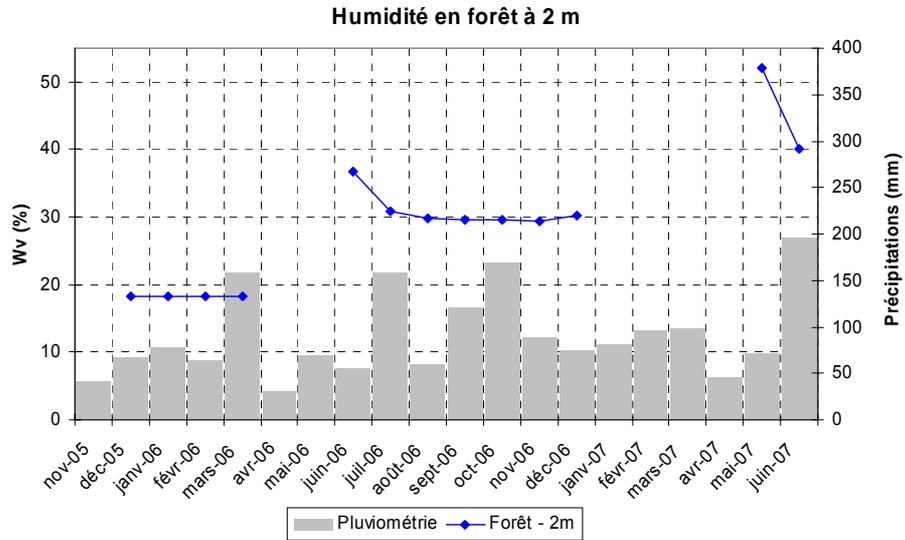


Illustration 66 - Mesures d'humidité mensualisées à 2 m en forêt et pluviométrie mensuelle sur le site du Deffend

On retrouve à 2,5 m (Illustration 67) des périodes de saturation du capteur similaires à celles observées à 1,5 et 2 m. On peut toutefois noter que la deuxième période de saturation, correspondant à l'hiver 2006-2007, se déclenche légèrement plus tôt que sur les deux capteurs précédents, dès le mois de décembre. Ceci s'explique par le fait que le sol reste plus humide durant l'été.

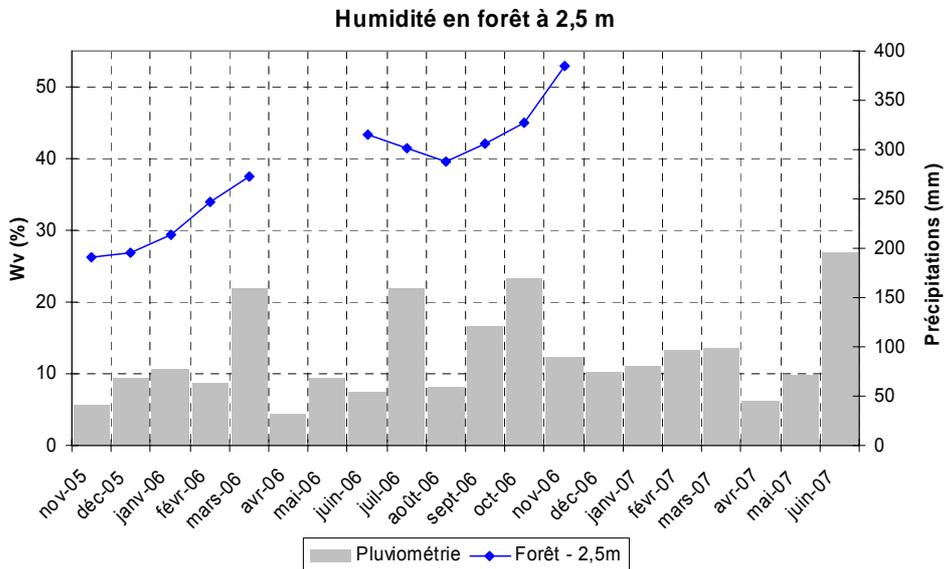


Illustration 67 - Mesures d'humidité mensualisées à 2,5 m en forêt et pluviométrie mensuelle sur le site du Deffend

Les premières mesures réalisées durant l'hiver 2005-2006 montrent une ré-humidification depuis un état relativement sec. Comme pour les deux capteurs

précédents, les précipitations de mars 2006 provoquent une saturation, les mesures ne redevenant exploitables qu'à partir du mois de juin. On observe alors, de juin à août 2006 une dessiccation progressive alors que le sol semble particulièrement humide. La reprise de l'humidification apparaît en septembre, octobre et novembre, avant une nouvelle saturation, plus durable puisque aucune nouvelle mesure fiable n'a été obtenue depuis.

Cet horizon se ré-humidifie donc avant les deux précédents, probablement en raison d'une alimentation par des écoulements préférentiels à travers les horizons sus-jacents. Les précipitations du mois d'octobre ont suffi à faire augmenter l'humidité alors que celles du mois de juillet, pourtant supérieures, mais accompagnées d'une évapotranspiration également plus élevée, n'ont nullement contribué à stopper la dessiccation.

Les observations effectuées dans le sondage carotté E2 (Mrad, 2006) montrent que ce capteur se situe à l'interface entre un horizon peu argileux (10 % d'argiles) et un horizon de limon argileux (35 % d'argiles). Il est probable que l'horizon argileux sous-jacent ralentit l'infiltration de l'eau en profondeur, et facilite une accumulation d'humidité à la base de l'horizon peu argileux. Ceci explique peut-être les rapides augmentations d'humidité observées à 2,5 m. A priori, seule une période sèche prolongée peut permettre l'évacuation de l'eau accumulée et un retour à des mesures exploitables.

A 3 m (résultats non représentés ici), les seules mesures exploitables obtenues correspondent au passage du front de dessiccation de la période estivale 2006. Un certain déphasage avec les conditions météorologiques apparaît à cette profondeur : les mesures se stabilisent à partir du mois d'août et traduisent une légère dessiccation jusqu'au mois de septembre, puis la ré-humidification s'amorce au mois d'octobre, avant une nouvelle saturation prolongée du capteur.

Aucun problème de saturation n'a en revanche été rencontré sur les capteurs implantés à 3,5 m, 4 m et 5 m de profondeur (Illustration 68).

Les mesures à 3,5 m montrent un état de dessiccation également prononcé durant l'hiver 2005-2006, puis une ré-humidification sensible de mars à mai 2006. L'état hydrique semble alors relativement stable jusqu'au mois de janvier 2007, où une nouvelle humidification, plus légère, intervient avant une nouvelle stabilisation en juin 2007. On peut noter que l'amplitude des variations de teneurs en eau à cette profondeur est très limitée (minimum d'humidité de novembre 2006 à janvier 2007, avec seulement 0,4 % de teneur en eau volumique en moins par rapport à juin 2006).

D'après les essais réalisés par le LAEGO sur un prélèvement effectué entre 3,60 et 3,76 m sur le sondage carotté E2 (Mrad et Nowamooz, 2007), les teneurs en eau mesurées à 3,5 m restent supérieures à la limite de retrait (la teneur en eau massique minimale mesurée est de l'ordre de 10 %, pour une limite de retrait de 5 %) et très inférieures à la saturation (la saturation n'ayant pu être atteinte en laboratoire malgré des valeurs de teneur en eau de l'ordre de 20 %, alors que les teneurs en eau massiques mesurées in situ ne dépassent pas 14,6 % environ).

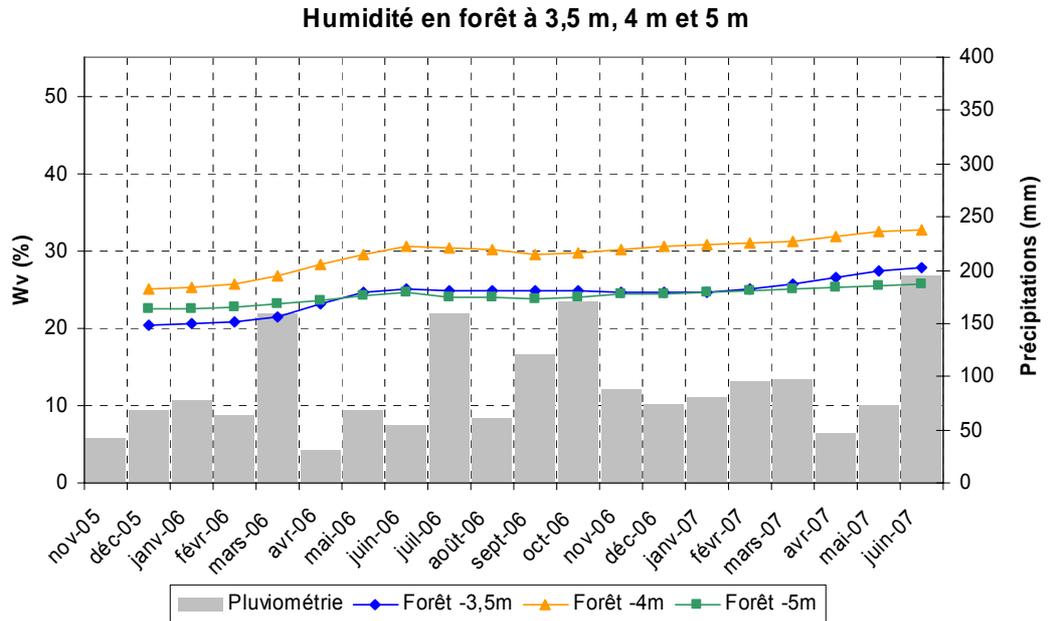


Illustration 68 - Mesures d'humidité mensualisées à 3,5 m, 4 m et 5 m en forêt et pluviométrie mensuelle sur le site du Deffend

Les variations d'humidité enregistrées à 4 m de profondeur sont similaires à celles observées à 3,5 m, bien que les amplitudes de variation observées soient légèrement supérieures. On note aussi que la phase de réhydratation après la dessiccation estivale intervient plus rapidement, dès le mois d'octobre 2006. Ceci pourrait s'expliquer par l'existence d'un niveau plus perméable à 3,5 m qui limiterait l'accumulation et transférerait la totalité de l'eau aux horizons sous-jacents, ou par une alimentation latérale préférentielle via des lentilles sableuses à 4 m de profondeur.

Les humidités obtenues peuvent être comparées aux résultats issus des essais de laboratoire effectués par le LAEGO sur le sondage carotté E2, entre 3,60 et 3,76 m. Les humidités mesurées indiquent un sol très éloigné de sa limite de retrait (la teneur en eau massique minimale mesurée étant de l'ordre de 13 %), et restant insaturé tout au long de la période d'observation (la teneur en eau massique maximale mesurée étant de l'ordre de 18,2 %).

On retrouve à 5 m des variations comparables à celles observées à 4 m, avec toutefois des amplitudes très atténuées. D'après les observations réalisées lors du sondage carotté E2, ce niveau correspond à une interface entre un horizon de limons sableux et un horizon assez fin de limons argilo-sableux (25 % d'argiles, 10 % de sables), surmontant lui-même un horizon d'argiles limoneuses (60 % d'argiles). La relative perméabilité de ce niveau, ainsi que sa profondeur, expliquent sans doute les faibles variations d'humidité qui y sont détectées et leur bonne cohérence temporelle avec celles enregistrées à 4 m.

On peut noter également, en comparant les humidités mesurées aux essais de laboratoire effectués par le LAEGO sur le sondage carotté E2 entre 5,20 et 5,75 m,

que le sol semble cette fois avoir atteint sa limite de retrait au début de la période de mesure (la limite de retrait étant égale à 13 % et les teneurs en eau massiques initiales étant de l'ordre de 12,1 %), mais qu'il reste sensiblement éloigné de l'état de saturation au mois de juin 2007 (teneur en eau à saturation estimée à 22 %, alors qu'elle est de l'ordre de 13,8 % en juin 2007).

Très peu de mesures sont disponibles à 6 m de profondeur (non représentées ici) : seule la période estivale a permis une dessiccation suffisante pour sortir de la gamme de saturation du capteur. Compte tenu de la profondeur, ce sont en réalité les mois d'août, septembre et octobre 2006 qui offrent des mesures exploitables, sachant que les seules données disponibles en août et septembre correspondent aux périodes de sortie et d'entrée de saturation, et sont peut être à ce titre faussées (on peut toutefois noter que les teneurs en eau massiques alors mesurées en été restent supérieures à 26 %, et indiquent donc un sol saturé par rapport aux résultats issus du sondage carotté entre 5,20 et 5,75 m présentés au paragraphe ci-dessus).

Grappe 2 (Prairie)

Le capteur implanté en prairie à 0,5 m n'a connu aucune période de saturation depuis son installation (Illustration 69). Le cycle annuel de dessiccation – humidification est particulièrement bien marqué et l'hiver 2005 n'apparaît pas comme particulièrement sec dans ces horizons superficiels, contrairement à ce qui avait été observé en forêt à la même époque : l'humidité mesurée en décembre 2005 n'est inférieure que de moins de 2,5 points (en teneur en eau volumique) à celle enregistrée en décembre 2006, et elle reste très supérieure aux teneurs en eau mesurées durant l'été 2006. Ceci s'explique sans doute par une amorce de ré-humidification à l'automne 2005 qui a été opérante en prairie mais pas en sous-bois du fait de l'interception par le feuillage.

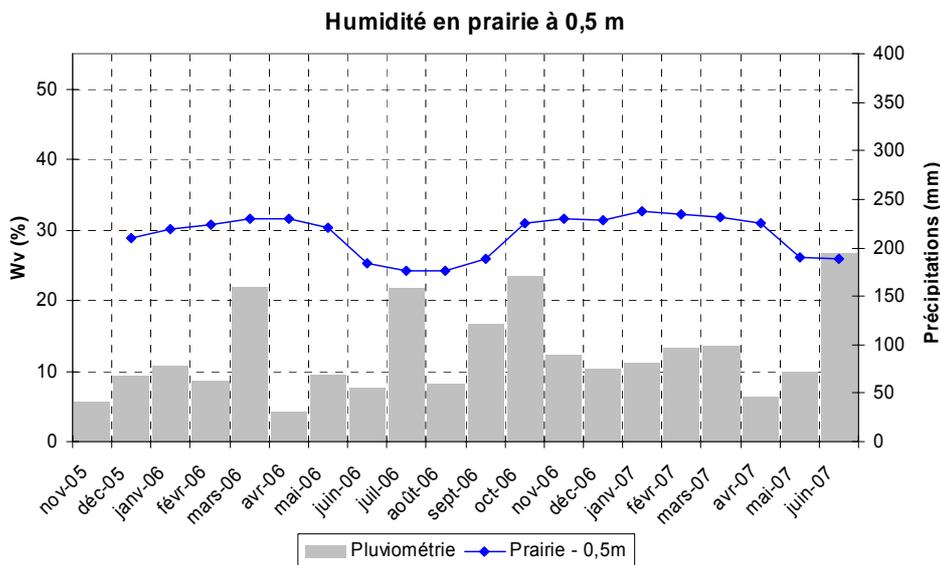


Illustration 69 - Mesures d'humidité mensualisées à 0,5 m en prairie et pluviométrie mensuelle sur le site du Deffend

Une humidification a été observée entre décembre 2005 et mars 2006. Puis une dessiccation, très prononcée au début, plus lente ensuite, a eu lieu entre mai et août 2006. La ré-humidification débute dès septembre et se stabilise en décembre avant de reprendre en janvier 2007, puis la dessiccation débute progressivement entre février et avril, où les précipitations sont d'amplitude moyenne. Les faibles précipitations du mois d'avril se traduisent dès le mois de mai 2007 par une dessiccation, stabilisée en juin. Les teneurs en eau obtenues durant l'année 2007 sont assez similaires à celles enregistrées en 2006 : les teneurs en eau volumiques maximales mesurées sont de l'ordre de 32 %, avec toutefois un léger retard en 2006 où ce maximum n'est atteint qu'en mars (contre décembre 2006 pour l'année suivante), ce qui peut être attribué à la période de sécheresse de 2005 qui a retardé la ré-humidification. Dans les deux cas, cette période d'humidité maximale se prolonge jusqu'en avril.

Les mesures d'humidité enregistrées à 1 m (Illustration 70) sont très similaires à celles obtenues à 0,5 m, à ceci près que les amplitudes des variations observées sont supérieures et que la phase de dessiccation commence plus tôt (respectivement avril 2006 et mars 2007 contre mai 2006 et mai 2007 à 0,5 m). Les différences d'amplitude dans les variations d'humidité peuvent s'expliquer par la nature lithologique des horizons considérés (Vincent *et al.*, 2006) : alors qu'on trouve à 0,5 m des limons légèrement argileux (20 % d'argiles), le capteur à 1 m se situe à l'interface entre des limons argileux (40 % d'argiles) et des limons sablo-argileux (25 % d'argiles). La plus grande perméabilité à 0,5 m peut expliquer que les variations d'humidité soient moindres par rapport à 1 m, où l'augmentation de la teneur en argile faciliterait la rétention d'eau en période humide.

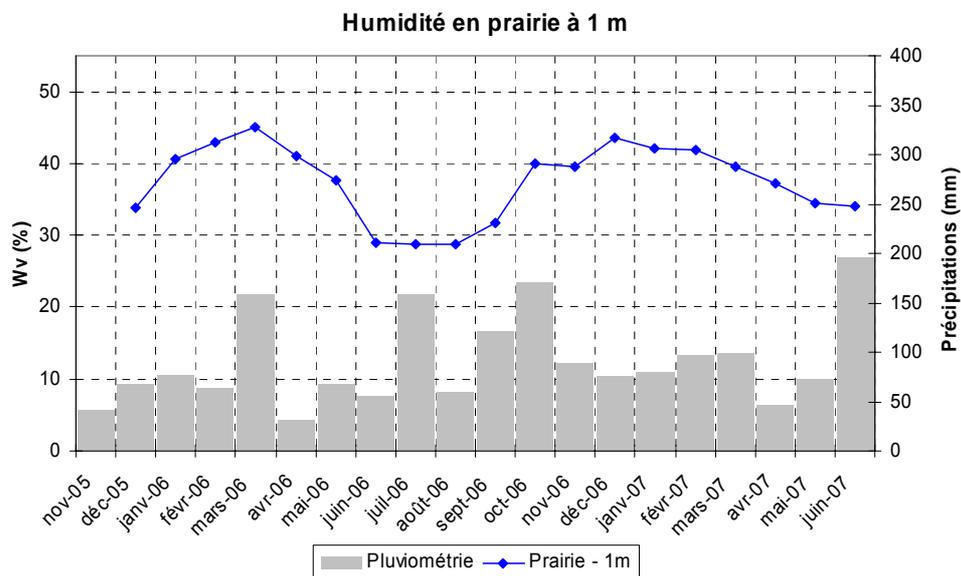


Illustration 70 - Mesures d'humidité mensualisées à 1 m en prairie et pluviométrie mensuelle sur le site du Deffend

Les mesures disponibles à 1,5 m (non représentées ici) montrent une légère dessiccation initiale pendant l'hiver 2005-2006, puis une saturation prolongée du

capteur provoquée par les plus fortes précipitations de mars 2006. Les mesures ne redeviennent exploitables qu'en période estivale, entre juillet et octobre 2006, où l'on perçoit la fin de la dessiccation et le début de la ré-humidification.

Très peu de mesures sont exploitables à 2,5 m et à 3 m de profondeur en prairie (non représentées ici) : on perçoit sur les deux premiers mois une ré-humidification qui amène les capteurs en limite de la gamme de mesure. Depuis, l'humidité semble n'être jamais redescendue suffisamment pour permettre une sortie de saturation. Les horizons concernés par ces capteurs sont argileux (respectivement 40 et 50 % d'argile). Les mesures avaient été rendues possibles au début, du fait d'un état de dessiccation exceptionnel provoqué par un automne-hiver 2005-2006 très sec, et il est donc peu probable que l'on retrouve des mesures exploitables prochainement, sauf dans l'hypothèse d'une nouvelle sécheresse prononcée.

On peut toutefois noter, d'après les essais de laboratoire effectués par le LAEGO sur le sondage carotté aux profondeurs comprises entre 1,85 et 1,93 m et entre 3,05 et 3,15 m, que ces mesures semblent montrer des sols largement saturés, même dans l'état de dessiccation particulièrement prononcé de l'hiver 2005 (les mesures à 2,5 et 3 m correspondent à des teneurs en eau massiques très supérieures à 20 %, ordre de grandeur des teneurs en eau massiques à saturation observées en laboratoire).

Les mesures obtenues à 4 m de profondeur en prairie (non représentées ici) se révèlent assez comparables à celles observées à 3,5 m, 4 m et 5 m en forêt, avec toutefois une amplitude de ré-humidification supérieure. Cependant, compte tenu des valeurs enregistrées (qui frôlent les limites de la gamme de mesure des capteurs), il subsiste un doute sur la fiabilité réelle de ces données.

6.1.5. Profils hydriques types

A partir des mesures mensualisées précédentes peuvent être déduits des profils hydriques mensuels sur l'ensemble de la période de mesure. L'illustration 71 les présente avec un pas de deux mois, afin d'en clarifier la lecture.

Ces profils mettent en évidence l'état de dessiccation très significatif de l'hiver 2005-2006, surtout en forêt où les teneurs en eau alors mesurées sont en général inférieures à celles observées au cours de l'été 2006. On constate qu'en forêt l'horizon à 1 m est particulièrement sec, car probablement très perméable. Le différentiel entre 1 m et 1,5 m paraît quant à lui dépendre de la saison : si l'on exclut l'hiver 2005-2006, il semble en effet que ce différentiel soit plus important en été qu'en automne et en hiver, ce qui pourrait être lié à l'influence des arbres. Cela restera cependant à vérifier sur une plus grande période d'observation, et en particulier au printemps.

On constate également sur les profils en forêt que l'ensemble compris entre 3,5 m et 5 m de profondeur se comporte comme un horizon assez homogène, ce qui correspond aux observations lithologiques réalisées lors de l'implantation des capteurs. Du fait du fort état de dessiccation observé en hiver 2005-2006, il est difficile d'affirmer l'existence d'un déphasage entre les humidités en surface et à ces profondeurs. Il sera là encore nécessaire de prolonger les mesures pour affiner les conclusions.

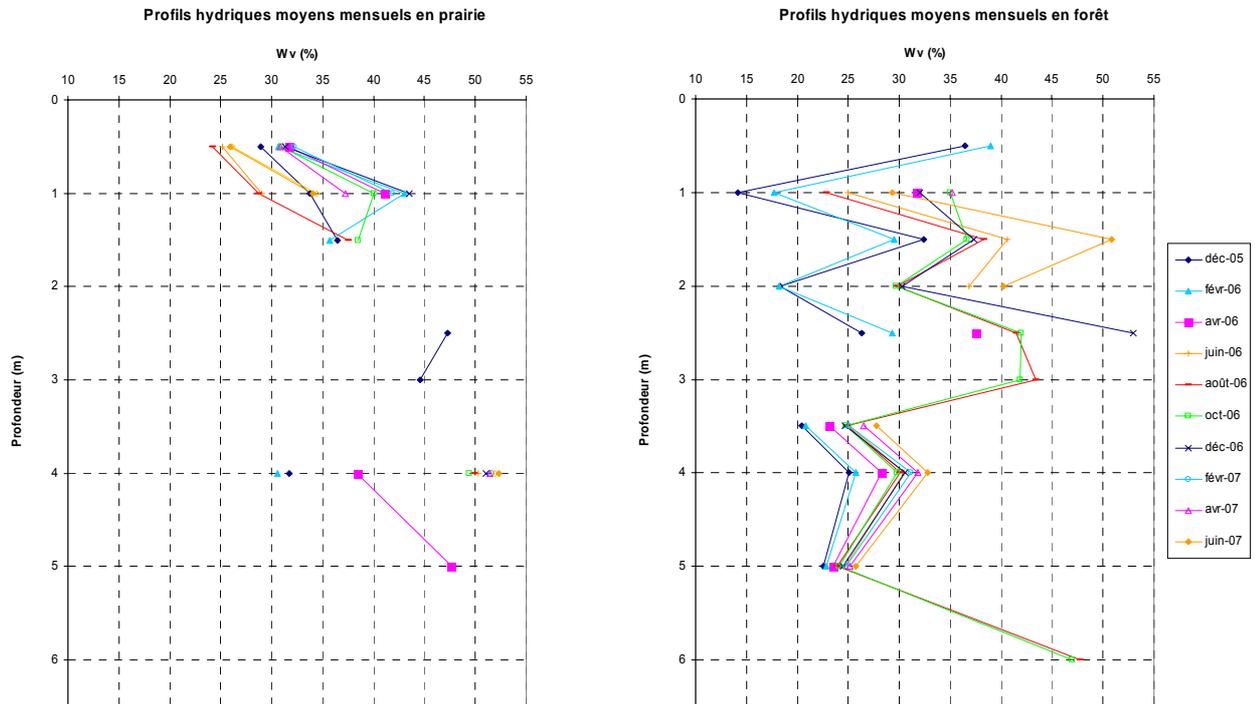


Illustration 71 – Profils hydriques mensuels sur les deux grappes de capteurs du site du Deffend

6.1.6. Mesures extensométriques

L'illustration 72 représente les déplacements verticaux enregistrés par les extensomètres installés en même temps que les capteurs Humitub.

L'absence de mesures à certaines périodes s'explique par diverses défaillances techniques : du 17 février au 24 mai 2006, le capteur mesurant les déplacements entre 7 et 0,5 m de profondeur est arrivé en bout de course (en extension) et a donc cessé ses mesures. Sur cette période, les déplacements ont été extrapolés au vu des déplacements enregistrés sur les autres capteurs. De la mi-septembre au 30 novembre 2006, les capteurs implantés à 0,5 et 1 m ont cessé tout mouvement (et dans une moindre mesure le capteur implanté à 1,5 m, à partir de fin octobre). Le démontage et le nettoyage des tiges a permis la reprise des mesures. Le blocage étant apparu durant une phase de gonflement, et compte tenu de la mécanique des capteurs, il a été supposé que la reprise des mesures ne nécessitait pas de réinitialisation (on remarque toutefois de légères incohérences le jour de l'intervention, probablement liées à de petits écarts dans la force de serrage du presse-étoupe lors du remontage).

Les phases de gonflement sont bien corrélées avec les épisodes pluvieux (Vincent *et al.*, 2006). La période de mesure permet la comparaison des deux périodes hivernales : à la mi-mars 2006 (gonflement maximal), les ordres de grandeur des déplacements mesurés étaient d'environ 10 mm près de la surface (à une profondeur de 0,1 m), de près de 13,5 mm (valeur estimée) à 0,5 m, de 7,7 mm à 1 m et de plus de 2 mm à 1,5 m de profondeur.

Après un intense retrait durant le printemps-été 2006, une nouvelle phase de gonflement a débuté entre mi-septembre et début octobre 2006. Le suivi n'a pu en être assuré que par les capteurs implantés à 0,1 et 1,5 m, du fait des problèmes mécaniques déjà évoqués. Ce gonflement s'est avéré nettement plus limité que le précédent, qui avait pourtant débuté plus tardivement (début janvier). On retrouve un maximum de gonflement à la mi-mars, comme l'année précédente, mais avec des déplacements moindres : par rapport à la profondeur de 7 m (point d'ancrage des capteurs, supposé fixe), la surface du sol se trouve 4,3 mm plus bas en 2007 qu'en 2006, 6,7 mm plus bas pour la couche à 0,5 m de profondeur, 0,5 mm plus bas seulement pour la couche à 1 m et 3,7 mm plus bas à 1,5 m de profondeur. De plus, les fortes précipitations enregistrées au mois de juin semblent ralentir les tassements enregistrés depuis avril 2007 : un fort gonflement a été mesuré en surface (0,1 m), et un gonflement limité a été détecté à 0,5 m, ce qui n'avait pas été observé durant la dessiccation de l'année 2006. Les couches profondes ne semblent cependant pas affectées par ces précipitations, aucun gonflement n'y étant observé.

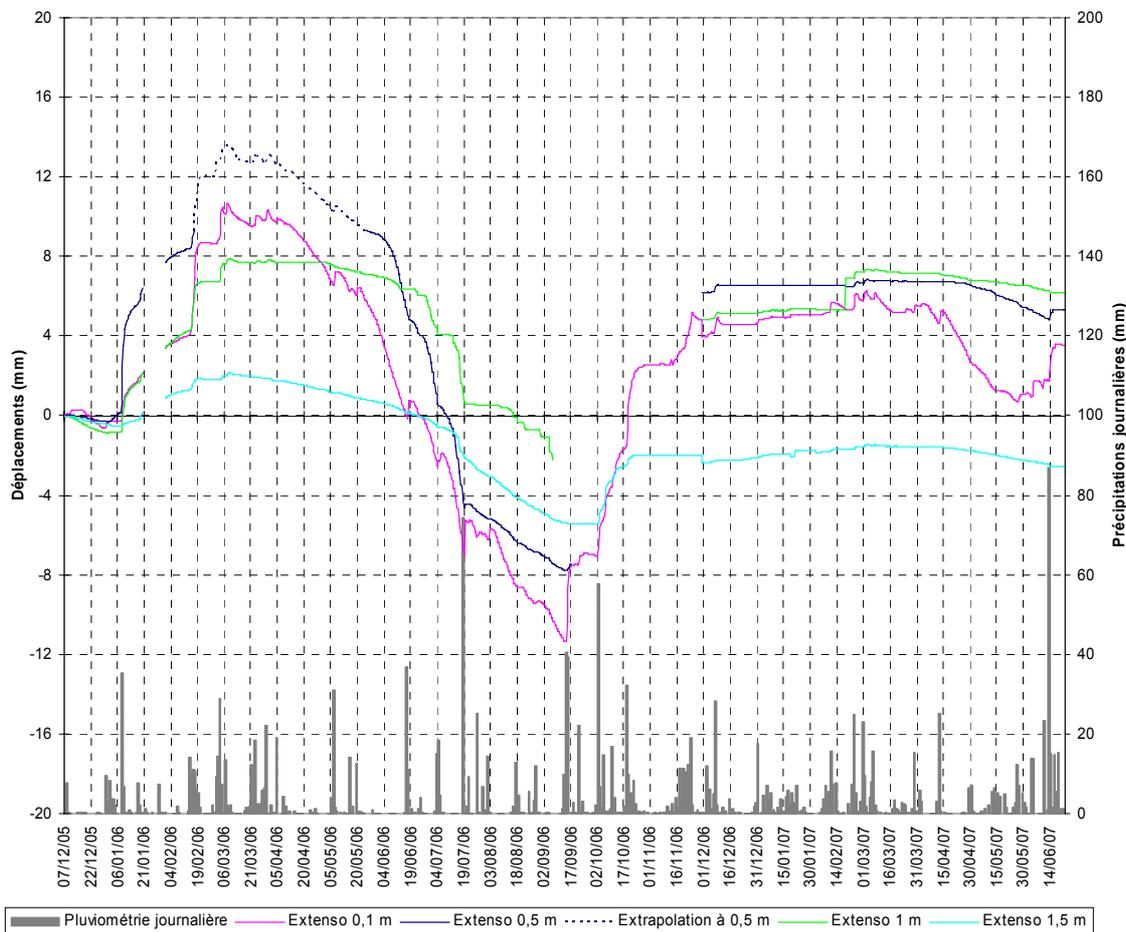


Illustration 72 – Mesures extensométriques obtenues sur le site du Deffend

La phase de tassement du sol a pu être suivie dans son intégralité au cours de l'année 2006. Elle a commencé au début du mois de mars 2006 (autour du 9 mars, immédiatement après l'épisode pluvieux du 2 au 5) et s'est achevée aux alentours du

15 septembre (voire début octobre à 1,5 m de profondeur). Le tassement observé est très progressif jusqu'au début du mois de juin, puis s'accélère nettement jusqu'à la mi-juillet et reprend ensuite un rythme d'évolution plus lent. Il est momentanément interrompu (ou simplement freiné pour les capteurs les plus profonds) à l'occasion des épisodes pluvieux enregistrés au cours de cette période. Certaines de ces pluies printanières et estivales se traduisent par une reprise brève du gonflement en surface, visible uniquement à une profondeur de 0,1 m (à partir de 0,5 m, ces pluies ne provoquent qu'un arrêt temporaire du tassement mais pas de gonflement).

L'amplitude maximale du tassement est enregistrée sur le capteur le plus superficiel (profondeur 0,1 m) et atteint 21,9 mm (dont 15,9 mm enregistrés en 3 mois, entre le 19 avril et le 19 juillet, alors que le tassement observé au cœur de l'été entre le 1^{er} août et le 15 septembre ne dépasse pas 5,3 mm). Cette amplitude est presque aussi élevée à 0,5 m de profondeur où elle est estimée à 20,3 mm sur la même période. A 1 m de profondeur, le blocage temporaire du capteur ne permet pas d'évaluer correctement l'amplitude maximale du tassement mais celle-ci dépasse en tout état de cause 10 mm. A une profondeur de 1,5 m enfin, l'amplitude maximale de la phase de retrait est de 7,6 mm, ce qui reste significatif.

Afin de visualiser plus précisément le comportement du sol selon la profondeur, on reporte les mesures extensométriques à des épaisseurs de couches par la différence entre deux capteurs successifs. Les couches pour lesquelles des mesures peuvent être obtenues sont donc 0,1 à 0,5 m, 0,5 à 1 m, 1 à 1,5 m, 1,5 à 7 m, et toutes les combinaisons entre ces couches. Compte tenu des perturbations dans la disponibilité des mesures, il a été choisi de se limiter pour l'instant à la couche comprise entre 0,1 et 1,5 m, pour laquelle il n'y a pas eu d'interruption de mesure (par blocage en limite de course ou grippage du système de mesure). L'illustration 73 représente ainsi les variations au cours du temps de l'épaisseur de cette couche comprise entre 0,1 et 1,5 m de profondeur.

Ces variations d'épaisseur semblent particulièrement bien corrélées aux précipitations enregistrées, les principales phases de gonflement correspondant à des épisodes pluvieux intenses. On peut également percevoir l'influence du cumul des précipitations puisque, alors que certaines phases de gonflement ne sont provoquées que par une seule journée très pluvieuse (cas du 19 juillet 2006 ou du 14 juin 2007, par exemple), de nombreux « pics » de gonflement correspondent plutôt à une série de plusieurs jours de pluie (du 15 au 24 février 2006 par exemple).

Si l'on exprime, à partir de ce graphique, l'évolution de l'épaisseur de la couche observée en termes de déformations calculées à partir de l'épaisseur initiale de la couche instrumentée (soit 1,4 m), l'amplitude maximale du tassement enregistré entre le 9 mars et le 15 septembre 2006 correspond à une déformation verticale de 1,2 % environ (soit une déformation moyenne de 0,2 % par mois). L'amplitude maximale de la phase de gonflement qui a suivi et qui s'étend du 15 septembre au 25 novembre 2006 correspond à une déformation verticale d'environ 0,93 % (nettement plus rapide donc que la phase de retrait précédente). Les déformations de cette tranche de sol sont ensuite restées quasi stables jusque début avril 2007 alors qu'en 2006 la phase de gonflement avait été nettement plus tardive puisqu'enregistrée principalement de fin

décembre 2005 à début mars 2006 et la courbe montrant l'évolution des déformations au cours du temps ne présentait pas de palier comme en 2007.

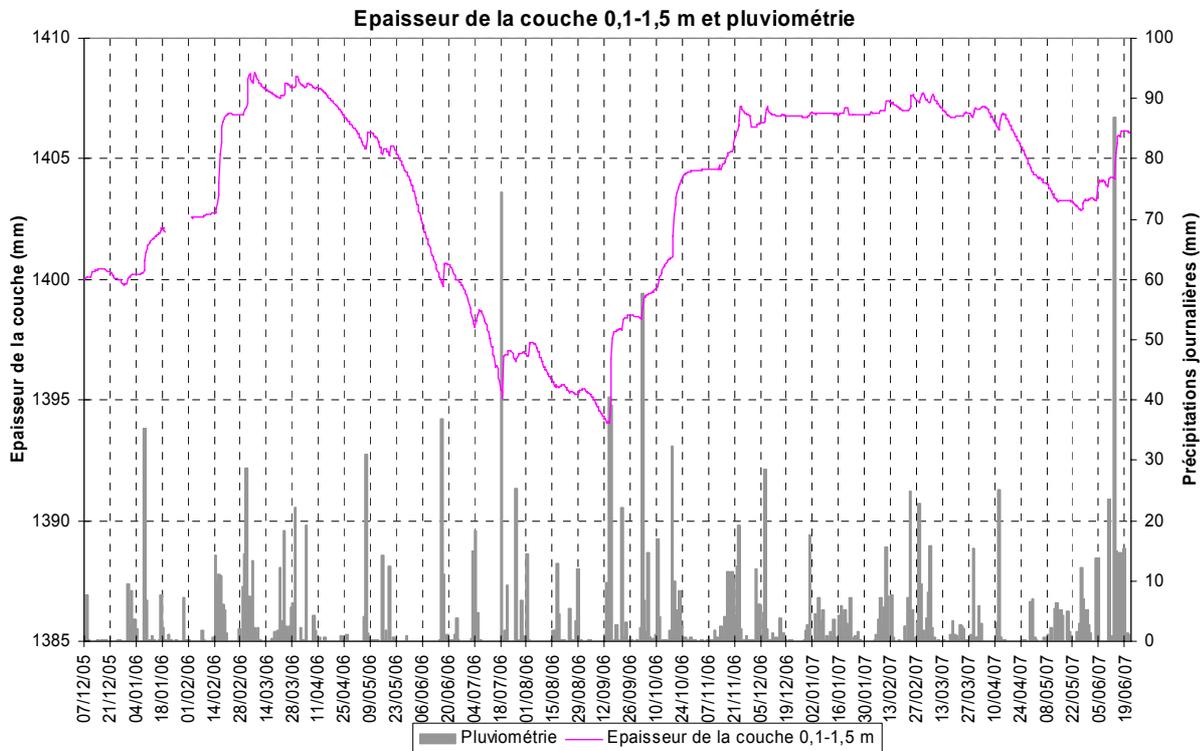


Illustration 73 – Épaisseur de la couche 0,1 à 1,5 m et pluviométrie journalière sur le site du Deffend

6.2. PROPAGATION DU FRONT DE DESSICCATION

La propagation en profondeur du front de dessiccation a été estimée par deux méthodes à partir des données d'humidité mensualisées présentées précédemment. La première approche consiste à suivre dans le temps les variations mensuelles d'humidité et la seconde se base sur l'évolution de la teneur en eau par rapport à sa valeur moyenne annuelle. Il faut cependant garder à l'esprit que dans les deux cas, les résultats présentés ne correspondent qu'à des estimations établies à partir des deux grappes de capteurs car le nombre de valeurs disponibles à ce jour reste limité (du fait de la durée d'observation effectivement réalisée mais aussi car certaines données ne sont pas exploitables du fait des saturations ou pannes des capteurs).

6.2.1. Première approche : variations mensuelles de l'humidité

Dans cette approche, la position du front de dessiccation à un instant donné (au pas de temps mensuel) est supposée coïncider avec la profondeur maximale de sol où la teneur en eau est en phase de diminution sensible à cet instant. Un capteur est ainsi considéré comme étant situé au dessus du front de dessiccation si la diminution

mensuelle d'humidité qu'il enregistre est supérieure à 1 % de sa valeur au mois précédent. L'estimation de la profondeur du front de dessiccation par cette méthode conduit à la courbe présentée sur l'illustration 74.

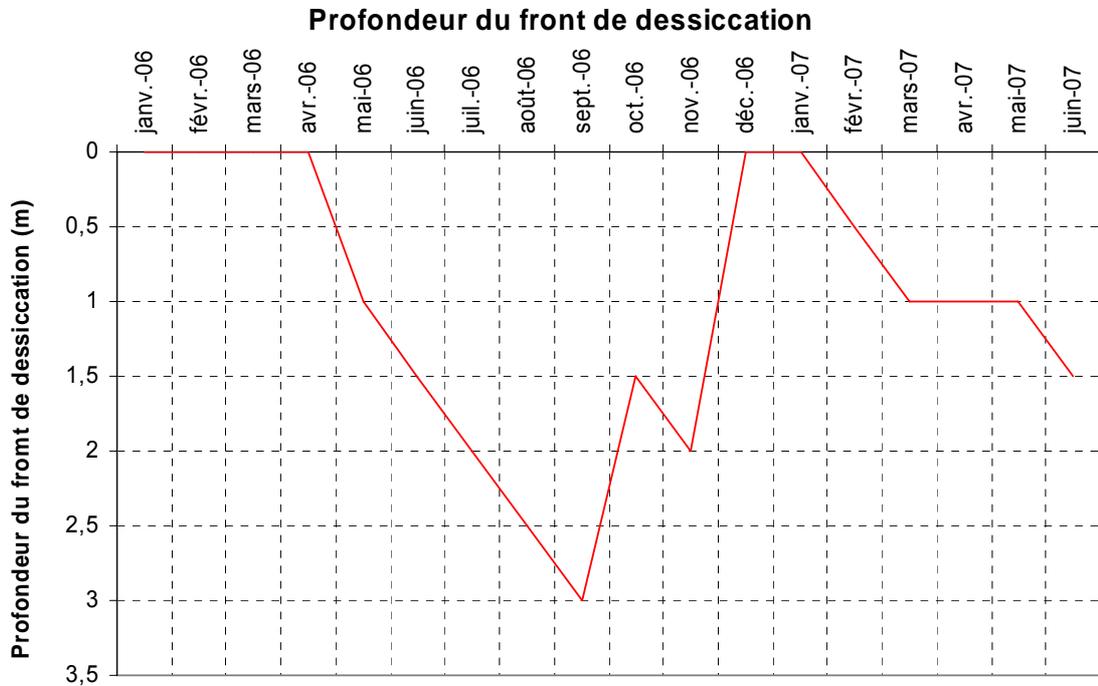


Illustration 74 – Évolution temporelle de la profondeur estimée du front de dessiccation sur le site du Deffend

En 2006, le phénomène de dessiccation du sol apparaît au mois de mai jusqu'à 1 m de profondeur, puis se propage régulièrement jusqu'à atteindre 3 m de profondeur en septembre 2006. Il commence alors à remonter, et seuls les horizons plus superficiels continuent à être soumis à cette dessiccation progressive. Il ne disparaît qu'en décembre 2006 et janvier 2007, pour revenir plus doucement en février 2007. On peut finalement noter qu'en juin 2007, tout comme en juin 2006, tous les horizons superficiels jusqu'à 1,5 m de profondeur sont soumis à ce phénomène de dessiccation.

Cette approche ne permet cependant pas de visualiser un phénomène détecté lors des deux hivers d'observation : alors qu'en surface le sol a commencé à se ré-humidifier sous l'effet des précipitations (d'où une profondeur du front de dessiccation nulle), une dessiccation résiduelle subsiste entre 1 m et 1,5 m de profondeur.

Cette approche présente également l'inconvénient de ne prendre en compte que la notion de variation de l'état hydrique du sol, sans refléter pour autant l'état hydrique réel du sol. Ainsi, par exemple, alors que toutes les données montrent un sol très sec au début de l'hiver 2005-2006, le front de dessiccation n'apparaît pas du fait de la ré-humidification en cours depuis la surface à cette période de l'année. Inversement, au début de l'année 2007, le front de dessiccation apparaît très tôt, alors qu'en réalité le sol est partout plus humide que pendant l'hiver 2005-2006.

6.2.2. Deuxième approche : état hydrique du sol comparé à son état moyen

Afin de caractériser l'état hydrique du sol, il est proposé ici de comparer à chaque instant l'humidité mesurée par rapport à l'humidité moyenne de la tranche de sol en question. On considère ainsi, toujours avec un pas de temps mensuel, que chaque capteur se trouve au dessus du front de dessiccation si l'humidité qu'il mesure est supérieure à la moyenne observée à cette profondeur. Cette moyenne ne pouvant pour l'instant être calculée que sur les 18 mois d'observation disponibles, il va de soi que sa valeur ne peut être considérée que comme indicative et devra être affinée ultérieurement sur la base de mesures effectuées sur une plus longue période. A ce stade, les moyennes ainsi estimées peuvent être peu représentatives compte tenu des singularités propres à la période d'observation actuellement disponible (et notamment d'un état initial particulièrement sec lors de l'installation des capteurs). En prolongeant la durée d'instrumentation, il devrait être possible de mieux quantifier l'état hydrique moyen du sol, ce qui justifiera de graduer plus finement les classes d'humidité du sol. L'illustration 75 représente les profils hydriques moyens retenus en forêt et en prairie pour cette méthode, lesquels n'ont pas non plus été encore calés avec les quelques profils hydriques réalisés ponctuellement au cours de l'installation et depuis lors.

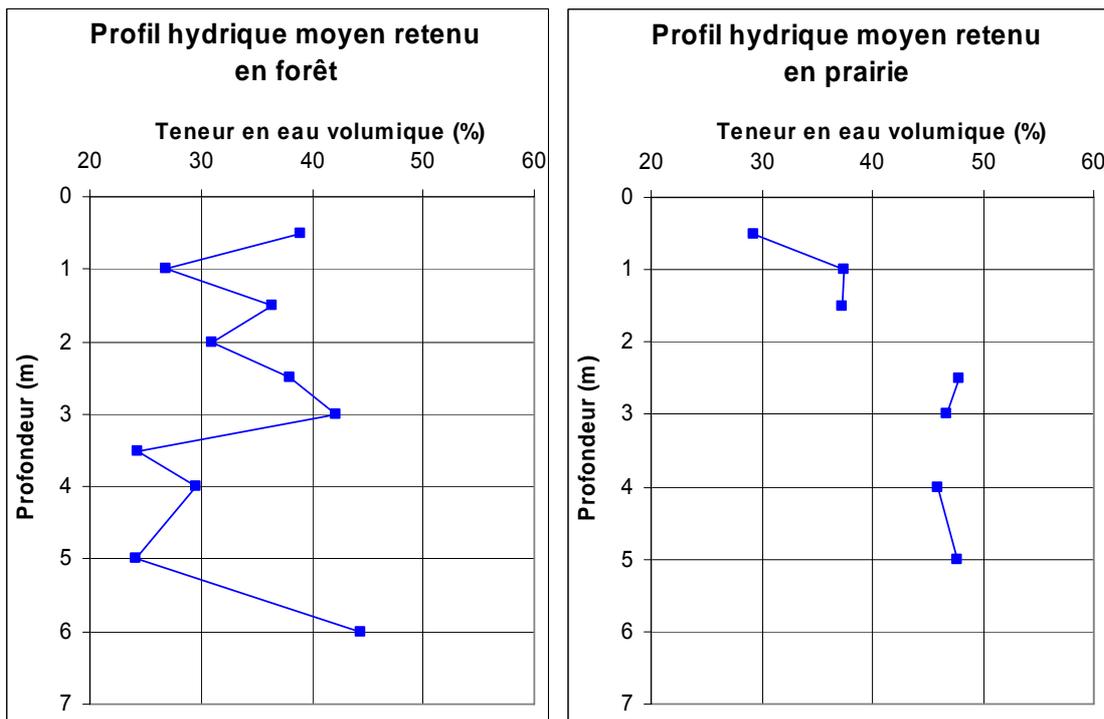


Illustration 75 – Profils hydriques moyens retenus pour chaque grappe de capteurs du Deffend

L'illustration 76 représente l'humidité mesurée mensuellement sur chaque capteur par rapport à la valeur moyenne retenue pour ce capteur. Les plages rouges représentent un état de dessiccation (teneur en eau inférieure à la moyenne), alors que les plages bleues désignent un sol plus humide que la moyenne. Les plages blanches traduisent quant à elles l'absence de valeurs exploitables.

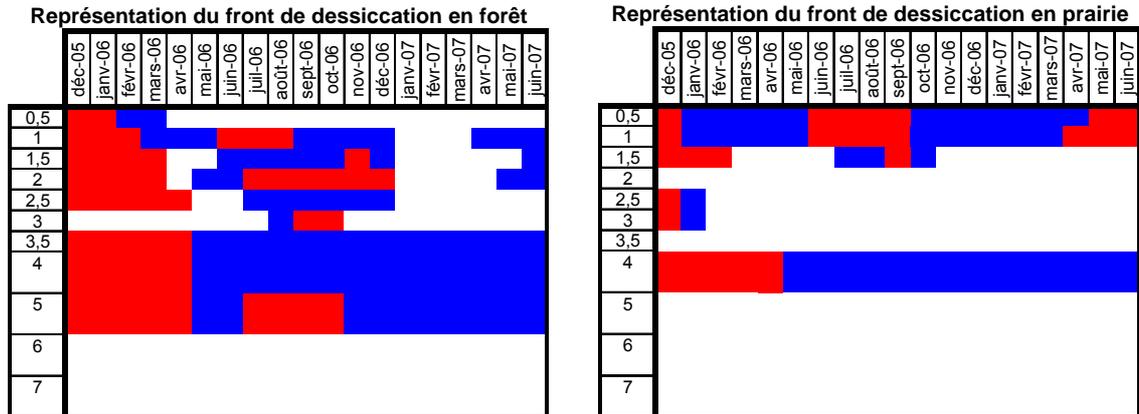


Illustration 76 – Etat hydrique mesuré par chaque capteur comparé aux profils hydriques moyens obtenus sur le site du Deffend

Ces graphiques sont pour l'instant peu exploitables compte tenu de la faible représentativité des moyennes utilisées. Ils mettent toutefois en évidence un certain nombre de phénomènes : l'état de dessiccation très significatif du début de la période de mesure apparaît nettement sur les deux grappes de capteurs, et tout particulièrement en forêt où la ré-humidification a été plus tardive. Celle-ci se fait manifestement par l'approfondissement progressif d'un front d'humidité depuis la surface dès le début de l'année 2006.

On voit également nettement la dessiccation en surface durant la période estivale, en particulier en prairie, entre juin et septembre. Sur la grappe située en forêt, on visualise également une dessiccation autour de 2 m de profondeur, légèrement en retard sur celle observée plus en surface, et se prolongeant après la ré-humidification des horizons plus superficiels.

6.3. CORRELATIONS ENTRE LES MESURES DE TENEUR EN EAU ET DE DEFORMATIONS

6.3.1. Mensualisation des mesures extensométriques

Comme pour les mesures d'humidité, les mesures extensométriques ont été mensualisées afin d'en faciliter la lisibilité. Pour cela, il a été choisi d'attribuer à chaque mois la valeur de la mesure en fin de mois, afin de pouvoir effectuer un bilan par rapport à la pluviométrie mensuelle.

Les résultats sont présentés sur le graphique de l'illustration 77 : il n'apparaît pas de corrélation simple entre l'évolution des mouvements du sol et la pluviométrie mensuelle.

L'exploitation de ces résultats passe ensuite par une conversion en termes de variation de l'épaisseur de couches, obtenue par différence entre les mesures issues des différents extensomètres à une même date.

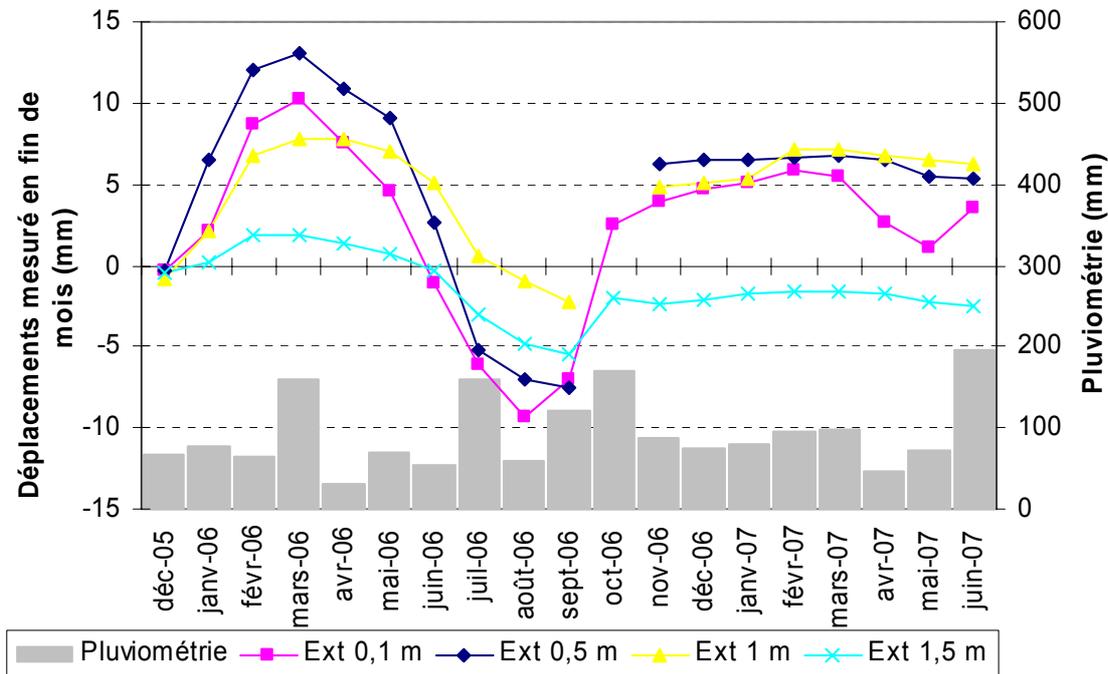


Illustration 77 – Mesures extensométriques mensualisées sur le site du Deffend

6.3.2. Corrélations entre les déformations mesurées et l'humidité

Les mesures extensométriques ont permis le calcul, mois par mois, de l'épaisseur de la couche comprise entre 0,1 et 1,5 m, ainsi que de la déformation, c'est-à-dire de la variation relative d'épaisseur de cette couche par rapport à son épaisseur initiale (le 7 décembre 2005). Le graphique de l'illustration 78 superpose, pour la tranche de sol comprise entre 0,5 et 1 m de profondeur en prairie, la déformation du sol en fin de mois avec l'humidité du mois précédent, obtenue en faisant la moyenne des valeurs enregistrées à 0,5 m et à 1 m. Cette superposition montre une étroite corrélation entre les deux grandeurs ainsi comparées qui évoluent de manière semblable dans le temps.

Une autre approche consiste à suivre l'évolution des déformations de la couche comprise entre 0,1 et 1,5 m non plus par rapport à la situation initiale (qui est singulière) mais en définissant un taux de déformation qui correspond à la variation de l'épaisseur de la tranche de sol au cours du mois écoulé, rapportée à l'épaisseur de cette couche en fin de mois précédent. C'est cette grandeur qui est présentée sur le graphique de l'illustration 79, comparée cette fois aux variations relatives de l'humidité moyennée entre 0,5 et 1 m (variation exprimée en % et rapportée à l'humidité moyenne du mois précédent). Cette seconde représentation donne a priori une image plus réaliste de l'évolution des déformations relatives du sol en fonction de sa teneur en eau et montre une relation très étroite entre ces deux grandeurs. Les mouvements de retrait (taux de déformation négatif) correspondent bien aux périodes de baisse d'humidité (variation relative d'humidité négative) et le gonflement coïncide avec les périodes d'humidification. De plus, les extrema de déformation et de variation d'humidité sont quasi simultanés (sauf en janvier – février 2006).

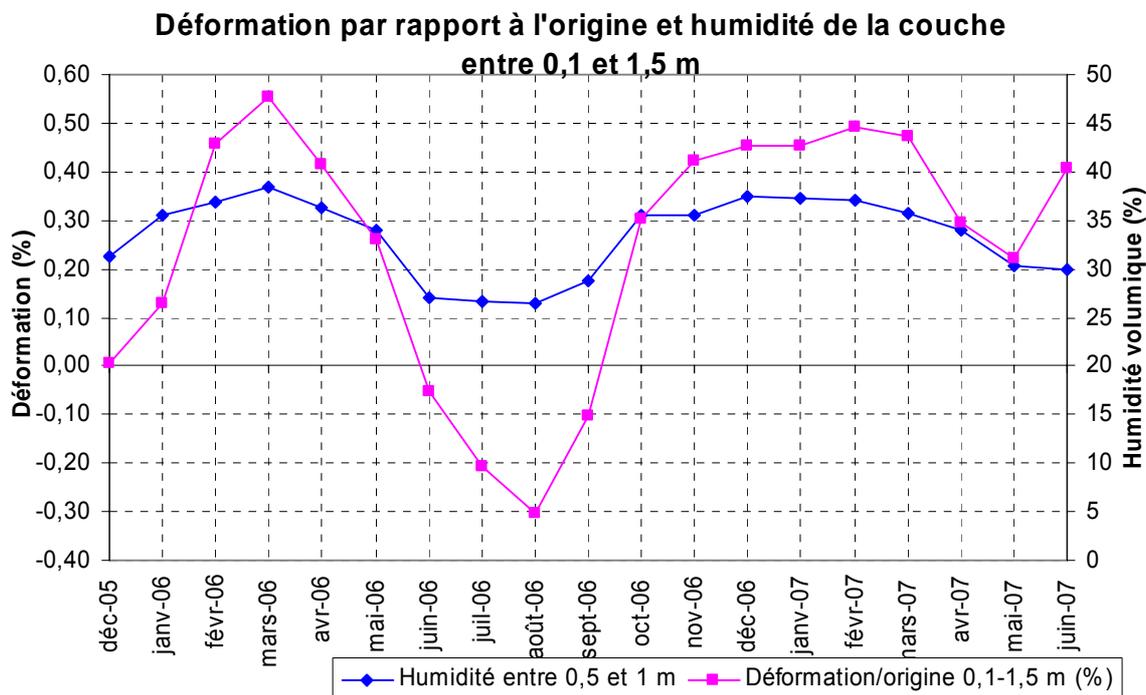


Illustration 78 – Déformation de la couche comprise entre 0,1 et 1,5 m et humidité volumique moyenne entre 0,5 et 1 m sur le site du Deffend (données mensualisées)

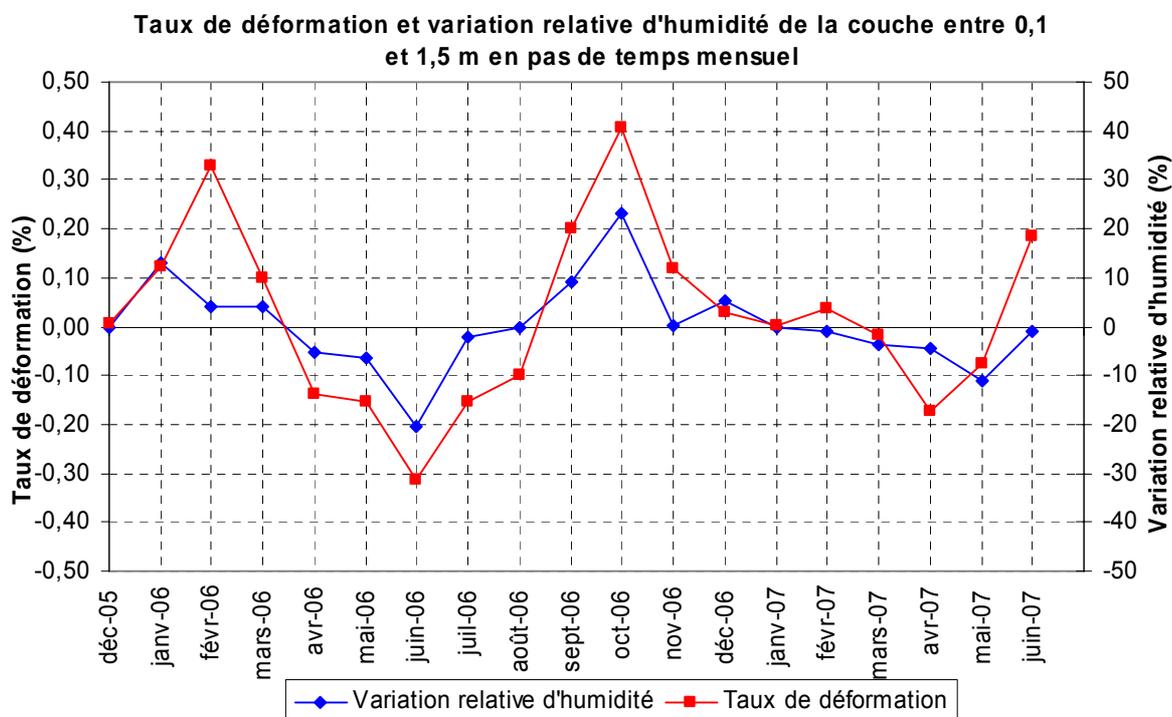


Illustration 79 – Taux de déformation et variations relatives d'humidité volumique de la couche 0,1 à 1,5 m sur le site du Deffend au pas de temps mensuel

6.3.3. Corrélations entre les déformations mesurées et la pluviométrie

La synchronisation observée entre les déplacements verticaux du sol mesurés par les extensomètres et l'état d'humidité du sol, lui-même étroitement dépendant de la succession des épisodes pluvieux antérieurs laisse penser qu'il est envisageable d'établir une relation simple entre ces deux facteurs. Le tracé de la déformation de la couche comprise entre 0,1 et 1,5 m en fonction de différents paramètres empiriques évalués à partir des données pluviométriques montre de fait une évolution assez régulière des déplacements mesurés en fonction des précipitations enregistrées sur le site. L'illustration 80 présente par exemple l'évolution du taux de déformation en fonction d'un paramètre correspondant à la somme des précipitations des trois mois précédents, moyennant la pondération arbitraire suivante :

$$P_{mois\ n} + \frac{P_{mois\ (n-1)}}{2} + \frac{P_{mois\ (n-2)}}{3}$$

Corrélations pluviométrie - taux de déformation de la couche 0,1-1,5 m

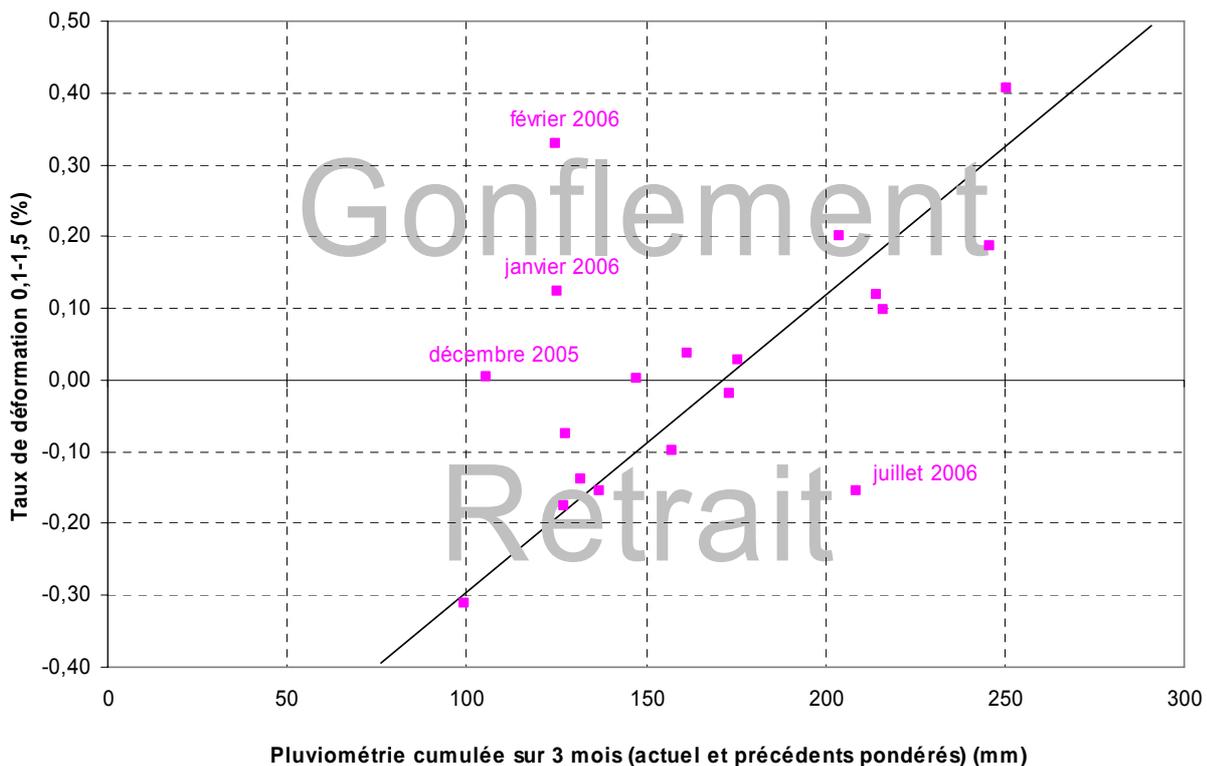


Illustration 80 – Taux de déformation de la couche 0,1-1,5 m en fonction du cumul des précipitations pondérées sur trois mois sur le site du Deffend

La relation entre les déformations enregistrées (tant sous forme de tassement que de gonflement) pour la couche 0,1-1,5 m, et les précipitations observées au cours de la période précédente semble quasi linéaire au vu de ce graphique, seuls quelques points s'écartant sensiblement de la droite tracée sur le graphique.

Ces points plus éloignés correspondent d'une part à l'hiver 2005-2006 (décembre 2005, janvier et février 2006) pour les points situés plus haut que la droite de tendance, et au mois de juillet 2006 pour le point situé en dessous.

Le décalage des points de l'hiver 2005-2006 pourrait s'expliquer par l'état hydrique du sol : le sol était très sec à cette époque et l'évapotranspiration a été faible du fait d'un ensoleillement et d'un état végétatif réduits à cette période de l'année. Les précipitations au cours de cette période, bien que relativement limitées, ont fortement contribué à la réhydratation des sols et donc au gonflement enregistré par les extensomètres. Ceci pourrait expliquer que ces trois points correspondent à un gonflement, alors que la droite prédirait plutôt un retrait pour un niveau de précipitations aussi faible au cours de la période précédente.

Concernant le mois de juillet 2006, l'anomalie peut s'expliquer par l'important orage du 19 juillet 2006 (74,4 mm en un jour) qui, bien qu'il ait provoqué un léger gonflement, a eu une influence limitée sur les tassements du fait de l'évapotranspiration (particulièrement forte à cette période de l'année), du ruissellement (probablement important car le sol est durci du fait de la dessiccation précédente) et de la faiblesse des précipitations pendant le reste de la période.

Une meilleure corrélation peut donc probablement être obtenue en intégrant, en plus de la pluviométrie, la notion d'évapotranspiration et l'état hydrique du sol (qui est toutefois en partie pris en compte par l'effet du cumul des précipitations sur trois mois).

7. Simulation des variations de teneur en eau sur les sites expérimentaux de Poitiers et Mormoiron et étude paramétrique

Les premiers travaux de modélisation avaient été effectués pour le site expérimental de Mormoiron (Vaucluse) avec un couvert herbeux utilisant des paramètres par défaut du modèle MACRO (Vincent *et al.*, 2006). Ces premières simulations ont mis en évidence la capacité du modèle MACRO à simuler de manière satisfaisante les transferts d'eau dans les sols argileux. Bien que le couvert végétal simulé était une herbe rase, les variations de teneur en eau des horizons étudiés ont permis de mettre en évidence une dessiccation en profondeur du sol avec des effets cumulatifs se prolongeant sur plusieurs années lors des périodes récentes de sécheresse. Les taux d'humidité les plus bas ont été simulés pour les périodes 1989-91 et 1997-99, années où de nombreux sinistres ont été enregistrés dans le Vaucluse. L'année 2003, caractérisée par un été chaud et sec précédé et suivi de périodes relativement humides, ne se distingue pas particulièrement lors des simulations sur le site de Mormoiron. Cette année là ne semble d'ailleurs pas se caractériser par une sinistralité particulièrement forte dans le Vaucluse, contrairement à d'autres régions françaises.

Les travaux de cette seconde phase ont d'abord consisté à simuler les variations de teneurs en eau dans le sol du Deffend, le second site suivi par le BRGM près de Poitiers (Vincent *et al.*, 2006). Des valeurs plus conformes aux résultats expérimentaux du sol ont par ailleurs été attribuées aux paramètres du sol. Une étude de l'influence des différents paramètres des couverts végétaux a ensuite été entreprise pour optimiser les paramètres à utiliser pour simuler l'action d'un arbre sur la variation de teneur en eau. La connaissance de l'influence des paramètres gouvernant l'action du couvert végétal a permis de réaliser une série de simulations avec différents couverts végétaux sur les deux sites expérimentaux. Les premiers résultats de simulation obtenus sont tout à fait encourageants à ce stade.

7.1. EVOLUTION DANS LA SIMULATION

Cette première partie vise à expliciter les évolutions de la simulation pour les sites du Deffend (Vienne) et de Mormoiron (Vaucluse).

7.1.1. Données pour le site du Deffend

Propriétés du sol

La série de reconnaissances géologiques déjà réalisée sur le site préalablement et au cours de la mise en place des instruments de surveillance n'avait pas permis de rendre compte des particularités des horizons les plus superficiels (de 0 à 1 m) sur le site du Deffend. Les amplitudes et les cinétiques des phénomènes de séchage/humidification dans les horizons superficiels étant un des facteurs clé du phénomène retrait-

gonflement des sols argileux, une fosse pédologique a été ouverte sur le site du Deffend pour mieux déterminer les propriétés des horizons du sol. L'ouverture de cette fosse a permis de déterminer les épaisseurs et la composition des horizons pédologiques. Cinq horizons ont été déterminés entre 0 et 1 m de profondeur (Illustration 81).

	Profondeur (cm)	Argiles (%)	Limons (%)	Sables (%)
Horizon 1	0-10	21	27	52
Horizon 2	10-30	35	30	35
Horizon 3	30-42	50	25	25
Horizon 4	42-80	66	10	24
Horizon 5	80-100	60	11	29

Illustration 81 – Résultats des analyses granulométriques des échantillons prélevés dans la fosse pédologique du Deffend

Les résultats des analyses granulométriques ont permis l'estimation des propriétés de rétention des différents horizons à l'aide de fonctions de pédotransfert HYPRES (Wösten et al, 1999). Ces fonctions permettent d'obtenir une courbe de rétention (Van Genuchten, 1980) pour les horizons identifiés. Des organismes partenaires ont effectué des mesures de rétention sur des horizons plus profonds (1,86 m et 3,05 m). Les courbes de rétention ont été calculées à partir de ces points de mesure (Illustration 82) et ont permis une modélisation des variations de teneurs en eau dans des horizons allant jusqu'à une profondeur de 3,15 mètres.

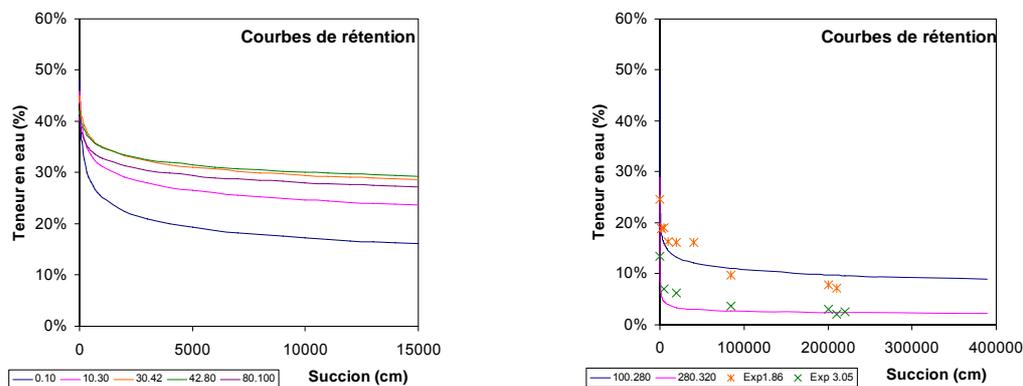


Illustration 82 - Courbes de rétention obtenues à partir de fonction de pédotransfert et de valeurs mesurées in situ sur le site du Deffend

Les paramètres de sol du modèle MACRO sont pour la plupart reliés entre eux par la courbe de rétention et la courbe de conductivité hydraulique. La description des transferts d'eau dans le sol se base sur la considération de deux domaines d'écoulement, les micropores et les macropores. La limite entre ces deux domaines est définie par trois paramètres hydrologiques :

- CTEN, potentiel caractéristique correspondant à la saturation de la microporosité du sol et à une macroporosité vide d'eau : au delà de ce potentiel, la macroporosité du sol devient active du point de vue du transport de l'eau et des solutés ;
- KSM, conductivité de la microporosité à saturation ;
- XMPOR, la teneur en eau à la frontière entre les micropores et les macropores.

CTEN étant un paramètre non calculable par des fonctions de pédotransfert, les valeurs pour ce paramètre ont été évaluées par jugement d'expert. Les valeurs des deux autres paramètres ont pu être obtenues à partir de la valeur de CTEN et de la courbe de rétention. D'autres équations de pédotransfert ont été utilisées pour estimer certains paramètres de sol ne découlant pas de la courbe de rétention, comme la porosité totale. L'opération a été répétée pour chaque horizon.

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 observées sur le terrain tandis que les profondeurs des horizons profonds, non directement accessibles par les observations effectuées lors de l'ouverture de la fosse pédologique, ont été estimées sur la base des forages déjà effectués

Aucune simulation n'a été réalisée pour des profondeurs supérieures à 3,15 mètres car les variations d'humidité à ces profondeurs sont généralement limitées et les racines des couverts végétaux sélectionnés atteignent rarement de telles profondeurs.

Données climatiques

Les données climatiques utilisées pour le site du Deffend sont celles issues de la station Météo-France de Poitiers-Biard qui bénéficie d'une acquisition en continu depuis 1949. Cette station a été supposée représentative du site du Deffend de par sa proximité géographique (8 km environ) et topographique avec le site étudié, même si des écarts significatifs ont été notés entre les deux stations de mesure, sans qu'il soit possible d'en expliquer totalement l'origine jusqu'à présent.

Couverts végétaux

Les mêmes paramètres de couverts végétaux que ceux utilisés pour Mormoiron ont été appliqués au site du Deffend. Les couverts végétaux sont une herbe rase, un buisson et un arbre.

7.1.2. Données complémentaires pour le site de Mormoiron

Propriétés du sol

La courbe de rétention des sols est un élément primordial de la modélisation des variations des taux d'humidité par MACRO car des paramètres importants de la simulation sont calculés à partir de cette courbe (voir §7.1.1). La courbe de rétention de l'horizon le plus profond (45 cm – 415 cm) a été améliorée en ayant recourt à des

valeurs expérimentales mesurées par le LMSSMat sur des échantillons prélevés entre 90 cm et 415 cm (Illustration 83). Une étude menée sur une série de sols a montré que l'utilisation des fonctions de pédotransfert HYPRES (Wösten et al, 1999) fournissait globalement de meilleurs résultats que les fonctions 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. Les courbes de rétention des deux premiers horizons ont ainsi été recalculées (Illustration 83).

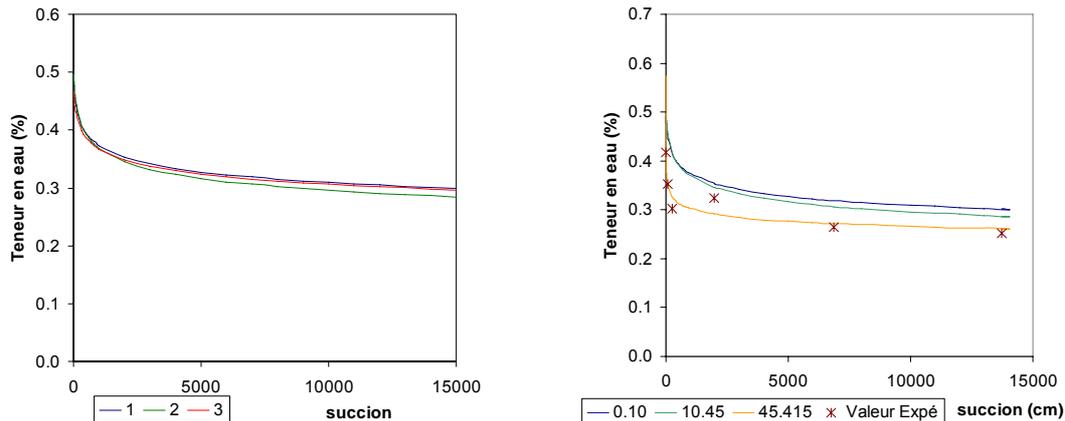


Illustration 83 - Courbes de rétention obtenues à partir de valeurs mesurées in situ et de fonctions de pédotransfert

Données climatiques

Le modèle MACRO nécessite des valeurs de températures minimales et maximales ainsi que les chroniques de pluie et d'évapotranspiration. Le pas de temps journalier a été retenu pour l'ensemble des simulations. Les simulations des taux d'humidité ont été réalisées au pas de temps journalier à partir du 01/01/1964, date d'acquisition des premières données validées pour la station Météo-France de Carpentras et point de départ des simulations pour le site de Mormoiron. Les simulations s'achèvent au 28/01/2007, date des dernières données transmises à ce jour par Météo-France. La durée totale de modélisation est donc de 44 ans.

7.2. INFLUENCE DES PARAMETRES VEGETATIFS SUR LA MODELISATION

Une grande variété de paramètres permet de contrôler le développement des couverts végétaux dans MACRO. Les valeurs de ces paramètres sont fixées pour certaines dates par l'utilisateur et le modèle interpole les valeurs intermédiaires. Les paramètres végétatifs de développement racinaire et du couvert sont l'objet d'une certaine incertitude. Il a ainsi paru intéressant d'étudier l'influence de ces paramètres sur les variations de teneur en eau calculées. Les paramètres qui ont été étudiés sont :

- l'indice foliaire ou LAI (Leaf Area Index) qui caractérise le rayonnement intercepté par l'appareil photosynthétiquement actif (organes chlorophylliens). Il mesure la surface de feuille par unité de surface au sol (exprimée en m^2/m^2) ;

- la profondeur des racines actives qui caractérise la profondeur à laquelle l'arbre aspire l'eau et les nutriments. En règle générale, cette profondeur augmente en été car les couches les plus superficielles s'assèchent petit à petit (Illustration 84). Ce paramètre n'indique pas la profondeur physique des racines mais seulement la profondeur de l'activité des racines ;

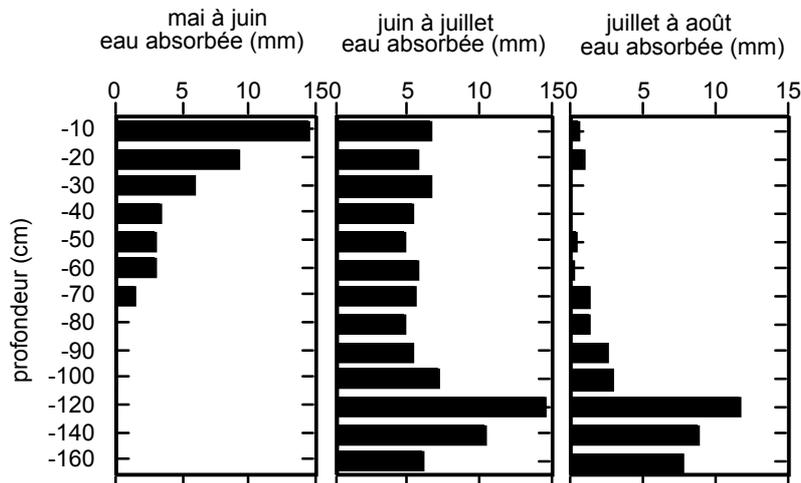


Illustration 84 - Répartition des prélèvements d'eau le long d'un profil de sol sous frêne au cours d'un dessèchement estival (d'après Bréda et al., 2002)

- le pourcentage d'eau disponible utilisée avant qu'une réduction de transpiration n'apparaisse chez l'arbre. Il est traduit par le paramètre WATEN dans le modèle MACRO. C'est une valeur seuil qui caractérise la capacité de l'arbre à résister à la sécheresse. Si un pourcentage d'eau supérieur est utilisé, alors il n'y a plus assez d'eau disponible pour l'arbre et la transpiration diminue. Les arbres adaptés à la sécheresse ont une transpiration diminuée seulement pour un pourcentage élevé, évalué à environ 80 % (FOCUS, 2001) ;
- les dates de début et fin de pousse qui définissent la période durant laquelle l'arbre aspire de l'eau pour assurer sa croissance. Le modèle MACRO permet aussi d'exprimer des dates de pousse minimum et de pousse maximum ce qui permet de décrire au mieux le cycle de développement végétatif. Pour chacune de ces dates, l'utilisateur doit définir des LAI et des profondeurs de racines actives. Avant le début de pousse et après la fin de pousse, ces valeurs sont par définition égales à 0.

7.2.1. Influence de l'indice foliaire et de la profondeur des racines

L'influence de l'indice foliaire (LAI) et celle des profondeurs des racines actives ont été étudiées en croisant trois indices foliaires avec trois profondeurs. Les indices foliaires retenus sont respectivement de 2,5, 5 et 7,5, valeurs considérées comme réalistes. Les profondeurs maximales des racines simulées sont respectivement de 1 m, 2 m et 3 m. Les dates de reprise de croissance, de récolte et de fin d'activité végétative utilisées pour cette série de simulations sont celles généralement observées pour les oliviers (Illustration 85) dans le sud de la France.

Epoque	Tiges et feuilles	Fleurs et olives
mars, avril	faible pousse	> grossissement des grappes florales
mi-mai à mi-juin	forte pousse	> floraison puis nouaison
juillet	pousse	> grossissement du fruit puis durcissement du noyau à la mi-juillet
août	pousse	> grossissement du fruit - début de la lipogénèse (apparition de l'huile dans les olives.)
septembre	faible pousse	> grossissement du fruit - récolte des olives vertes des variétés Lucques et Salonenque
octobre	très faible pousse	> grossissement du fruit - récolte des olives vertes de la variété Picholine.
début novembre	arrêt de la pousse	> véraison - récolte des olives à huile de variétés précoces .
mi-novembre à janvier	arrêt de la pousse	> maturité - récolte des olives à huile de la plupart des variétés françaises.

Illustration 85 - Évolution de l'activité de pousse d'un olivier dans le sud de la France (d'après AFIDOL, 2007)

Lorsque la pousse est considérée comme nulle par les spécialistes, l'indice foliaire et la profondeur des racines ont été fixés à zéro dans le modèle. A l'opposé, l'indice foliaire et la profondeur des racines ont été fixés à leurs valeurs maximales lorsque la pousse est considérée comme forte. Le modèle MACRO permet de fixer des valeurs intermédiaires pour les paramètres végétatifs. Cette valeur intermédiaire a été fixée à deux tiers de la valeur maximum pour l'indice foliaire et la moitié de la valeur maximale pour la profondeur des racines. Le modèle MACRO interpole l'évolution de l'indice foliaire et de la profondeur des racines entre les valeurs fixées (Illustration 86).

L'influence de l'évolution de l'indice foliaire et de la profondeur des racines a été étudiée sur le sol de Mormoiron à trois profondeurs : 50 cm, 1 m et 3 m.

Les résultats de teneur en eau ont été exprimés en degré de saturation car les teneurs en eau ne permettent pas de comparer différents horizons de granulométries contrastées. Un degré de saturation nul indique que le sol a atteint son point de flétrissement permanent alors qu'une valeur de 100 % signifie que les sols ont atteint la valeur de capacité au champ. Les valeurs supérieures à 100 % signifient que la capacité au champ est dépassée et que l'eau du sol circule alors par les macropores.

A 50 cm de profondeur (Illustration 87), les variations de teneur en eau sont rapides et la saturation passe de 100 % à 0 % presque tous les ans. Le degré de saturation en eau de l'horizon est plus faible de manière générale lorsque l'indice foliaire est plus élevé, ce qui confirme l'influence de la végétation arborée sur la dessiccation du sol. Les différences sont surtout sensibles en début et en fin d'hiver. Le degré de saturation est plus faible aussi lorsque la profondeur maximale des racines augmente de 1 m à 2 m. En revanche, le fait de passer d'une profondeur d'enracinement maximal de 2 m à 3 m change peu le résultat. L'évolution des degrés de saturation ne fait pas apparaître, à cette profondeur d'observation, des situations exceptionnelles lors des périodes de forte sinistralité, et ceci quelle que soit la combinaison de l'indice foliaire et de la profondeur d'enracinement.

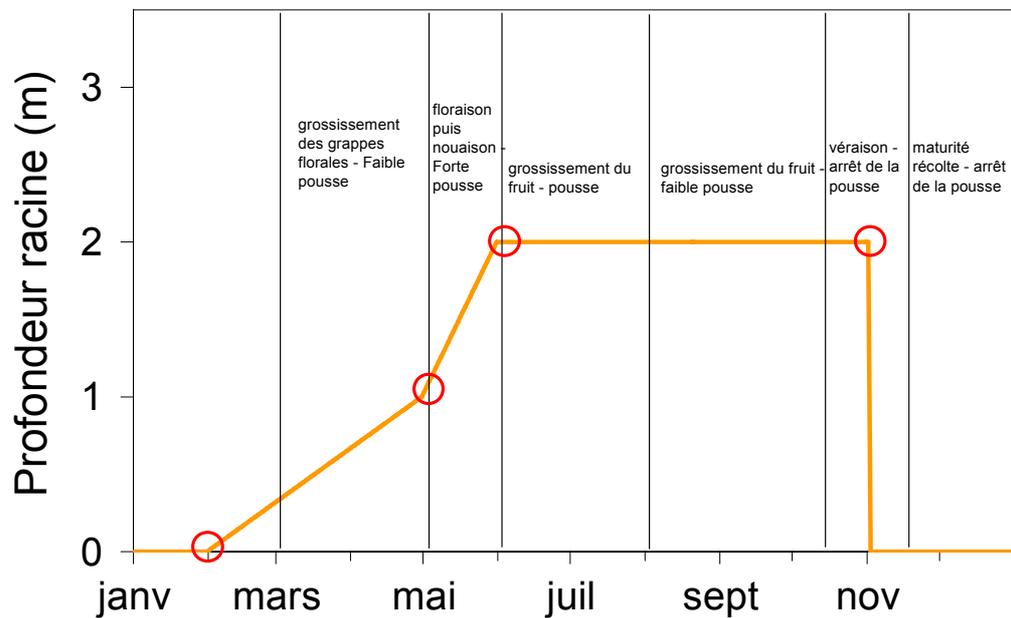
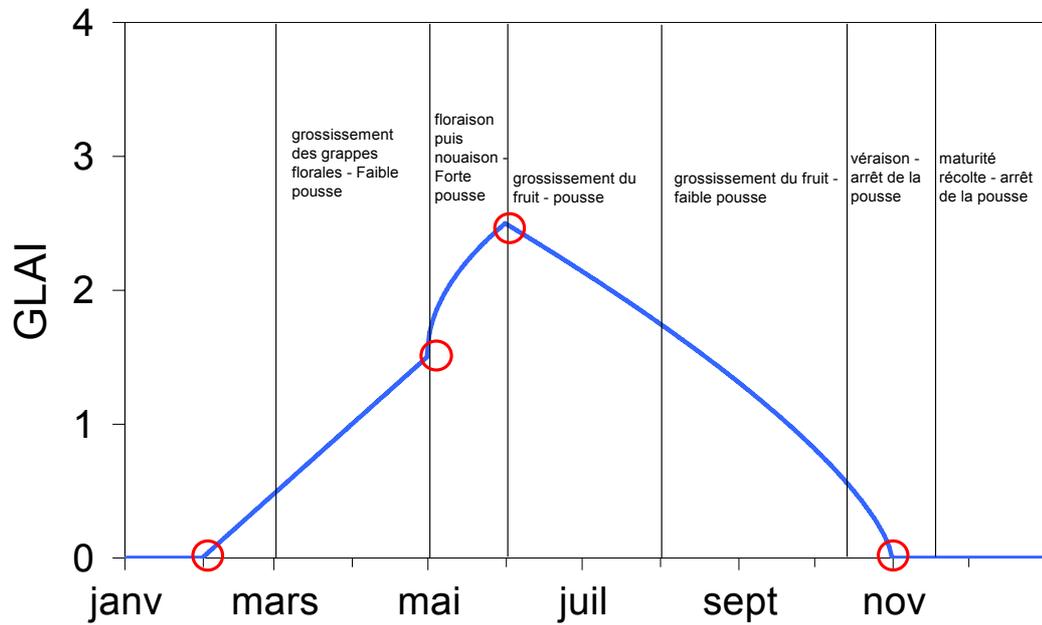


Illustration 86 - Evolution de l'indice foliaire (max 2,5) et de la profondeur des racines actives (max. 2 m). Les points cerclés de rouge (o) sont imposés par l'utilisateur, le reste des courbes est interpolé par MACRO

A 1 m de profondeur (Illustration 88), les variations de teneur en eau sont également annuelles. La saturation de l'horizon passe de 100 % à 0 % presque tous les ans sauf pour les simulations avec des racines d'une profondeur maximum de 1 m. Ceci indique que pour simuler une variation importante de teneur en eau à 1 m de profondeur, les racines du couvert végétal pris en compte doivent être supérieures à 1 m. La différence entre des racines d'une profondeur de 2 m et des racines d'une profondeur de 3 m est peu marquée pour cette profondeur d'observation. Les variations du degré de saturation en fonction des indices foliaires sont également peu importantes. La teneur en eau est plus faible pour des indices foliaires plus élevés mais la variation ne dépasse pas quelque pour-cent même lors du passage d'un indice foliaire 2,5 à un indice foliaire 7,5. Les différences entre indices foliaires sont donc atténuées en profondeur. Au-delà des variations annuelles, une évolution pluriannuelle de teneur en eau est observable. Pendant certaines années le degré de saturation ne remonte pas et reste proche du point de flétrissement. Ces années où le degré de saturation reste faible correspondent aux périodes où les dégâts au bâti ont été nombreux, au vu du nombre d'arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle.

A 3 m de profondeur (Illustration 89), les variations annuelles ont été lissées et ne sont parfois plus discernables. Le point de flétrissement n'est jamais atteint et le degré de saturation descend rarement sous les 60 % pour des racines de 2 m. Le degré de saturation ne descend pas sous les 80 % pour les simulations avec des racines actives de 1 m de profondeur. Les degrés de saturation sont en revanche toujours proches de 0 pour des racines de 3 m de profondeur. Ceci montre une influence très atténuée en dessous d'une certaine profondeur. Les variations annuelles ne donnent lieu qu'à de petits pics lors des périodes particulièrement humides comme la période 1994-1997. Le nombre et le niveau de ces pics sont plus importants pour les indices foliaires les plus faibles. Généralement, plus l'indice foliaire est faible, moins l'évapotranspiration est marquée et donc plus la proportion de pluie infiltrante est importante. Les variations interannuelles du degré de saturation visibles à 1 m de profondeur sont encore discernables et correspondent aux années de forte sinistralité observée.

Ces résultats montrent qu'une profondeur d'observation des variations de teneur en eau de 1 m permet de bien mettre en évidence les variations du degré de saturation pour un arbre ayant des racines allant de 1 m à 3 m. L'étude des variations des degrés de saturation à des profondeurs inférieures (50 cm) est plus difficile car les variations annuelles masquent la visualisation des phénomènes interannuels. A des profondeurs plus importantes, l'étude des variations devient impossible car l'évolution des degrés de saturation est trop amortie. Une cohérence entre la profondeur d'étude et la profondeur maximale des racines de l'arbre étudié doit être respectée car si la zone d'étude est trop profonde par rapport à la zone d'activité des racines, la variation du degré de saturation est amortie. Les variations de l'indice foliaire n'ont été prépondérantes dans aucune des combinaisons simulées. L'indice foliaire ne semble pas être un paramètre déterminant de l'évolution des teneurs en eau dans le sol.

Une étude de sensibilité a également été conduite sur la valeur du pourcentage d'eau disponible utilisée avant qu'une réduction de transpiration n'apparaisse chez l'arbre (paramètre WATEN dans MACRO). Cette étude a montré que ce paramètre avait peu d'influence sur les variations de teneurs en eau aux profondeurs étudiées.

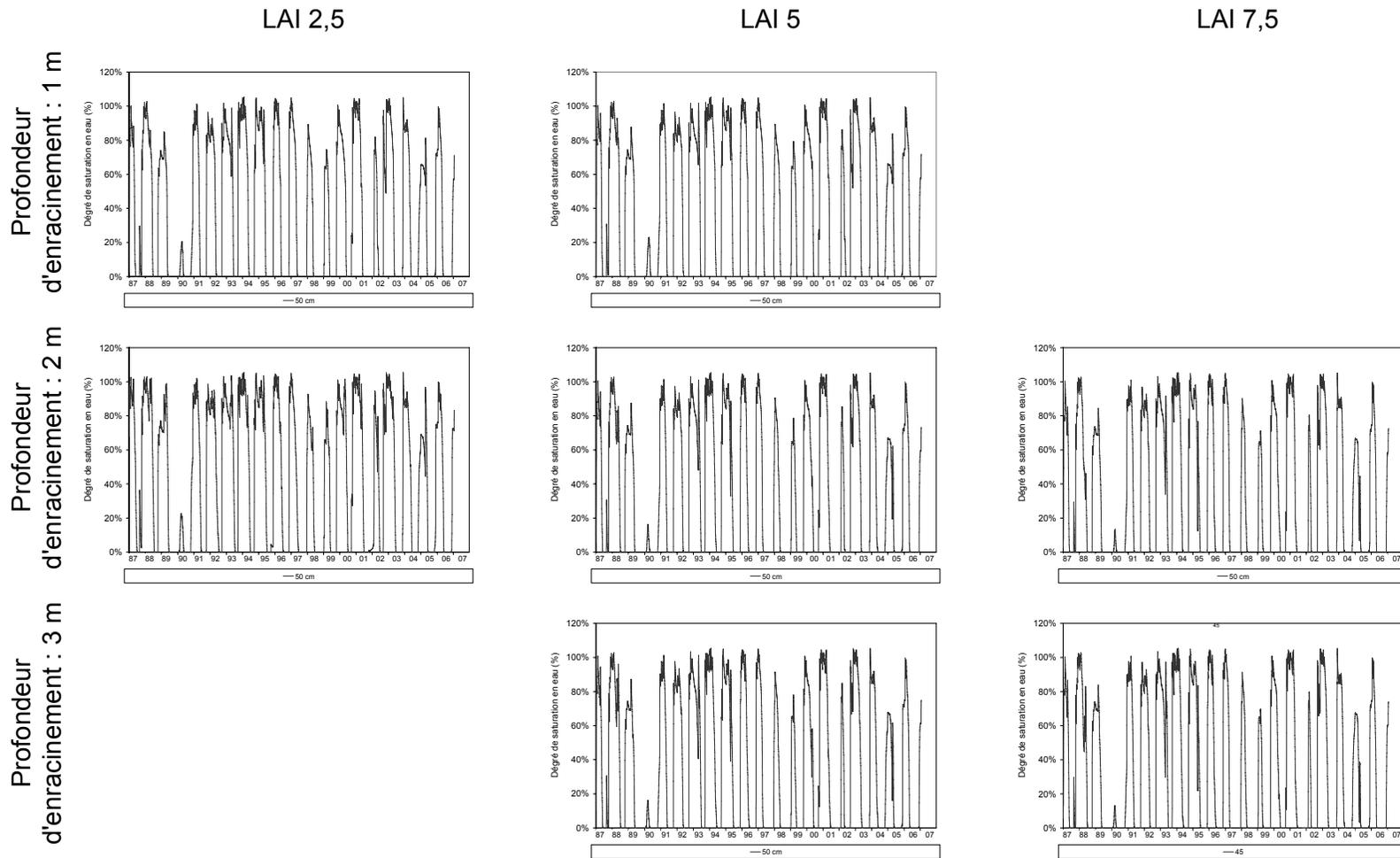


Illustration 87 - Variations du degré de saturation à 50 cm de profondeur (sol de Mormoiron)

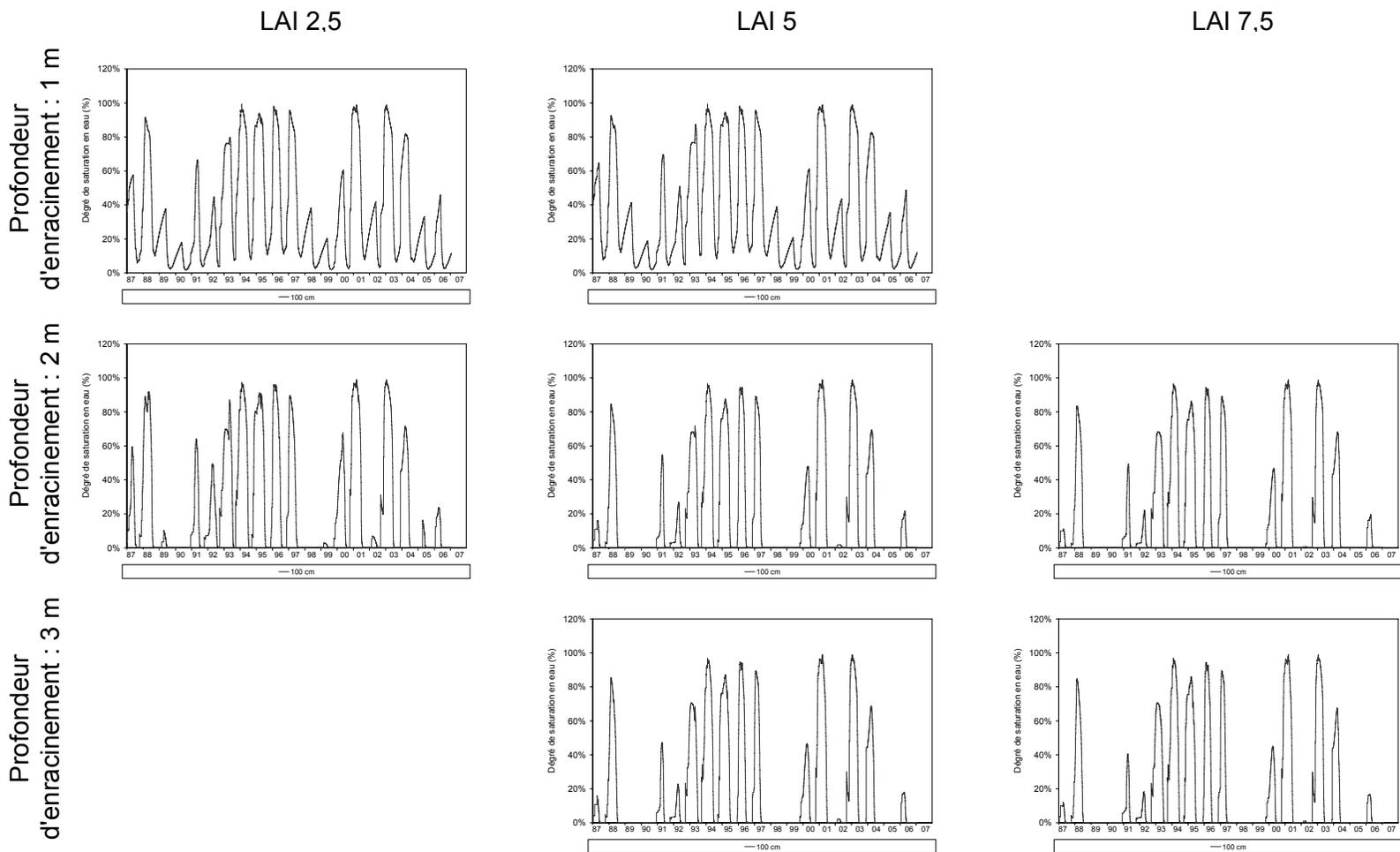


Illustration 88 - Variations du degré de saturation à 1 m de profondeur (sol de Mormoiron)

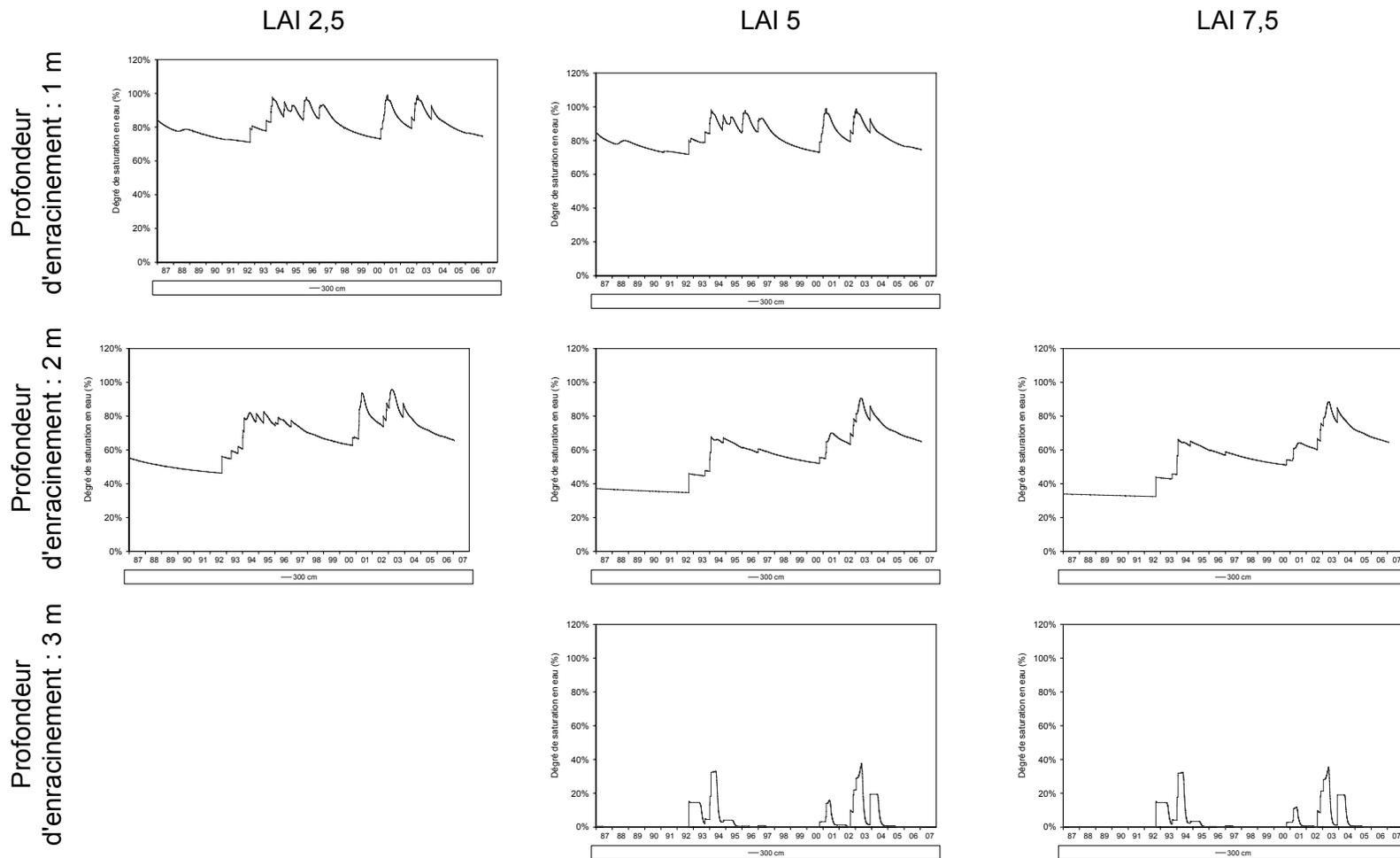


Illustration 89 - Variations du degré de saturation à 3 m de profondeur (sol de Mormoiron)

Une zone d'observation située à 1 m de profondeur semble offrir un bon compromis pour étudier l'influence des pluies en surface sans que l'influence des variations annuelles ne soit trop amoindrie. Les arbres étudiés dans le reste du document auront des profondeurs d'enracinement de 2 m pour rester en cohérence avec la zone d'étude choisie (1 m). L'indice foliaire maximal égal à 5 préconisé par le groupe de travail FOCUS (FOCUS, 2000) peut être conservé car ce paramètre n'a pas une influence très prononcée sur les simulations du modèle MACRO. Le pourcentage d'eau disponible utilisée avant qu'une réduction de transpiration n'apparaisse chez l'arbre a été réduit de 80 % à 60 %. Bien que 80 % soit la valeur préconisée par le groupe de travail FOCUS pour les arbres du type olivier, 60 % est une valeur plus communément observée en France (communications personnelles).

7.2.2. Influence du cycle végétatif des arbres

Les premières simulations ont été réalisées sur la base d'un arbre méditerranéen de type olivier. Une autre paramétrisation simulant un arbre de type plus océanique a été conduite pour permettre une comparaison entre les cycles de végétation. Le cycle de l'olivier qui s'étend de février à novembre a été appelé "cycle long" tandis que le cycle de l'autre arbre qui va de mi-mars à mi-octobre a été appelé "cycle court" et peut être adapté à un cerisier ou un pommier (Illustration 90).

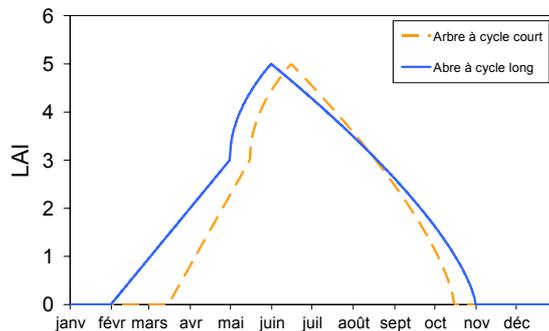


Illustration 90 - Différence d'évolution du LAI entre un arbre à "cycle long" et un arbre à "cycle court"

Les deux arbres simulés ont des LAI maximum de 5 et des profondeurs maximales de racines actives de 2 m. Les variations de teneurs en eau ont été traduites en variations de degré de saturation (Illustration 91).

A 1 m de profondeur, le point de flétrissement est plus souvent atteint pour l'arbre à "cycle long". Des pics de variations visibles sur la simulation de l'arbre à "cycle court" ne sont pas visibles sur l'arbre à "cycle long", lors des années 1989 et 2005 par exemple. La présence d'un arbre à cycle long se traduit par des niveaux de saturation du sol plus faible et des périodes d'assèchement plus fréquentes et plus longues qu'en présence d'un arbre à cycle court.

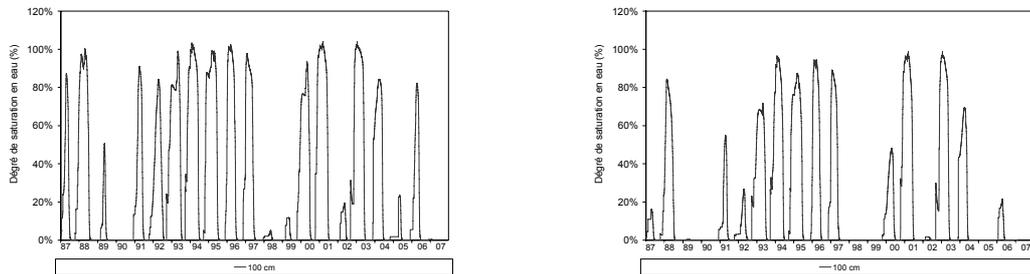


Illustration 91 - Variations du degré de saturation à 100 cm de profondeur pour un arbre à "cycle court" (à gauche) et un arbre à "cycle long" (à droite)

Ces résultats indiquent que les dates de début de pousse, de récolte et de fin de pousse sont importantes pour les simulations car des variations dans ces dates conduisent à de fortes variations des degrés de saturation à 1 m de profondeur pour des arbres ayant des caractéristiques équivalentes.

7.2.3. Influence des types de couvert végétal

Plusieurs types de couvert végétal ont été considérés. Le premier consiste en une couverture herbeuse d'une dizaine de centimètres de hauteur, le second représente un couvert arbustif de type framboisier et les derniers correspondent à différents types d'arbres : un olivier, un chêne et un arbre à cycle plus court de type fruitier (comme le pommier ou le cerisier).

Pour toutes ces configurations de couvert végétal, les paramètres du sol ont été conservés et seuls les paramètres ayant trait à la végétation ont été modifiés, l'objet de cette étude paramétrique étant d'évaluer l'influence sur la teneur en eau du sol de variétés présentant des physiologies différentes.

Les trois types d'arbres pris en compte (l'olivier, le chêne et le pommier) présentent ainsi des caractéristiques d'absorption d'eau différentes. MACRO étant un modèle à vocation agricole, les paramètres utilisés pour la simulation du développement d'arbres et d'arbustes correspondent généralement à ceux d'espèces fruitières. L'olivier est un arbre fruitier implanté en zone méridionale tandis que le pommier est un arbre fruitier cultivé dans les zones à climat tempéré humide. Le chêne n'a pas de vocation fruitière.

Le développement de l'herbe étant différent de celui des autres couverts végétaux, le couvert herbeux dispose d'un module spécial de gestion dans le modèle MACRO. L'herbe est considérée comme ne présentant pas de repos végétatif, pas de maximum de végétation, ni de date de récolte. Sa transpiration dépend uniquement de l'ETP tout au long de l'année. L'herbe reçoit donc une valeur constante à la fois pour l'indice foliaire (valeur égale à 5) et pour la profondeur des racines actives, à savoir 0,5 m.

Les paramètres MACRO qui ont servi pour la simulation de l'action d'un framboisier sur l'humidité du sol de Mormoiron proviennent de nouveau des travaux FOCUS. Le groupe de travail considère que le framboisier est en repos végétatif du 10 octobre au

31 mars. Son maximum d'activité est supposé se produire le 31 mai. Au 1er avril, la profondeur des racines actives est de 0,90 m, cette profondeur augmentant jusqu' à un maximum de 1 m à partir du 31 mai. Selon le groupe FOCUS, le framboisier possède une résistance moyenne au manque d'eau puisqu'il peut avoir une respiration normale pour des pourcentages d'eau extraits des micropores allant jusqu'à 65 %. Le groupe FOCUS estime que l'arbuste a un enracinement profond, ce qui signifie que 60 % des racines se situent dans les premiers 25 cm du sol.

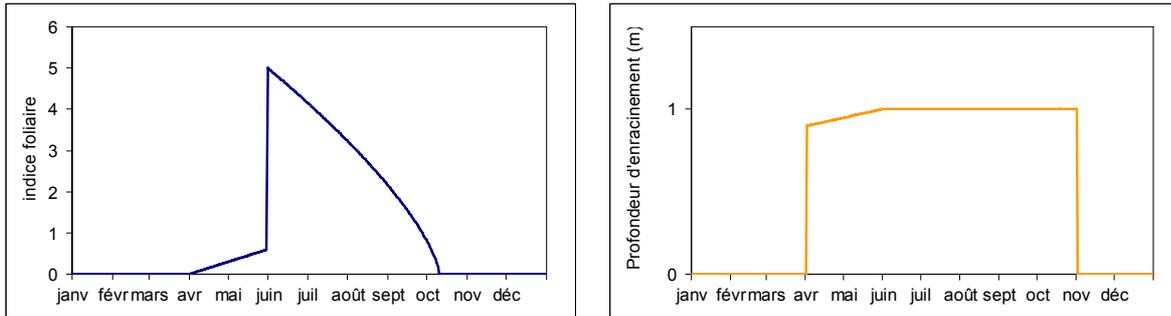


Illustration 92 - Evolution de l'indice foliaire (maximum 5) et de la profondeur des racines actives (maximum 1 m) pour un framboisier.

Certains des paramètres MACRO utilisés pour la modélisation de l'influence de l'olivier ne proviennent pas du groupe de travail européen FOCUS (FOCUS, 2000) qui considère qu'il n'existe pas de repos végétatif pour l'olivier. Or ceci n'est pas vérifié en France. Les travaux de modélisation se sont basés sur les dates de début et de fin de pousse observés dans le Sud de la France (Illustration 93). L'indice foliaire maximum est de 3 et l'indice foliaire minimum est de 2. Les racines actives ont une profondeur maximale de 2 m et une profondeur minimale de 1 m. Le reste des paramètres est issu des données du groupe de travail. Le groupe FOCUS estime que l'olivier présente un « enracinement profond » ce qui signifie que 60 % des racines se situent dans les premiers 50 cm du profil de sol. Le groupe FOCUS considère que l'olivier peut continuer sa respiration normalement tant que 65 % de l'eau contenue dans les micropores du sol n'a pas été extraite.

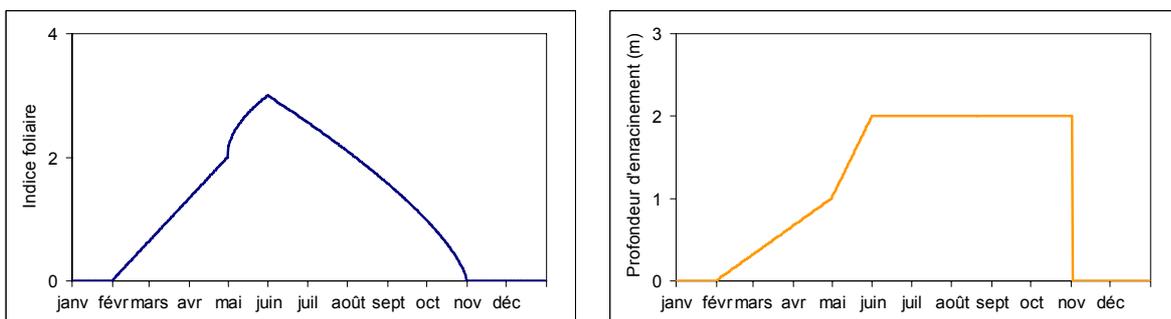


Illustration 93 - Evolution de l'indice foliaire (maximum 3) et de la profondeur des racines actives (maximum 2 m) pour un olivier.

Les paramètres sélectionnés pour le chêne sont issus de données provenant de la littérature (Bréda et al, 1995 ; Granier et al, 1999) et résultent pour la plupart de mesures réalisées *in situ* en peuplement de chênes. L'indice foliaire maximum est égal à 5. Entre le 25 novembre et le 15 avril, le chêne est supposé en repos végétatif. Au 15 avril, la profondeur des racines actives augmente jusqu' à atteindre un maximum de 2 m aux alentours du 1^{er} mai. L'allure des courbes de l'évolution du LAI et de la profondeur des racines est donc différente de celle de l'olivier (Illustration 94).

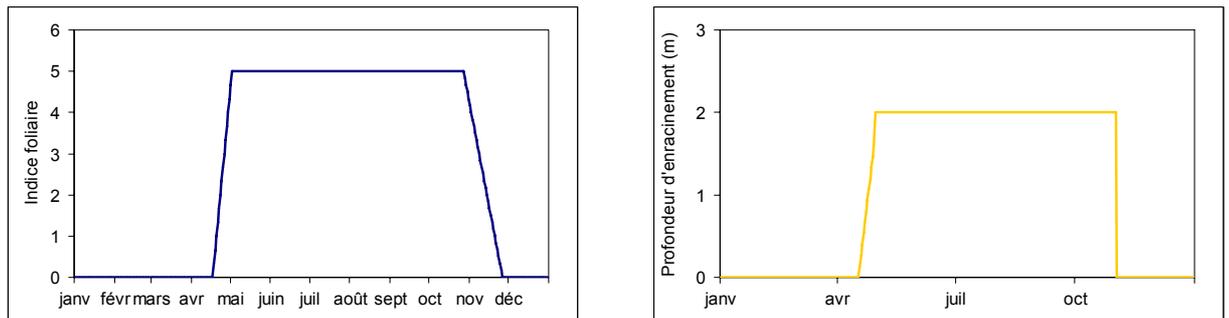


Illustration 94 - Evolution de l'indice foliaire (maximum 5) et de la profondeur des racines actives (maximum 2 m) pour un chêne.

Les paramètres MACRO qui ont servi pour la simulation de l'effet d'un pommier sur la teneur en eau du sol de Mormoiron sont issus du rapport réalisé par le groupe de travail FOCUS (FOCUS, 2000), qui considère que l'activité du pommier commence le 1^{er} avril et finit le 1^{er} octobre avec un maximum d'activité le 31 mai. Entre le 1^{er} octobre et le 1^{er} avril, le pommier est supposé en repos végétatif. Au 1^{er} avril, la profondeur des racines actives est de 1 m et cette profondeur augmente jusqu'à un maximum de 1,5 m atteint vers le 31 mai. Le groupe FOCUS estime que l'arbre a un « enracinement profond » ce qui signifie que 60 % des racines se situent dans les premiers 50 cm du profil de sol. Le groupe FOCUS considère que le pommier peut continuer sa respiration normalement, tant que 65 % de l'eau contenue dans les micropores du sol n'a pas été extrait.

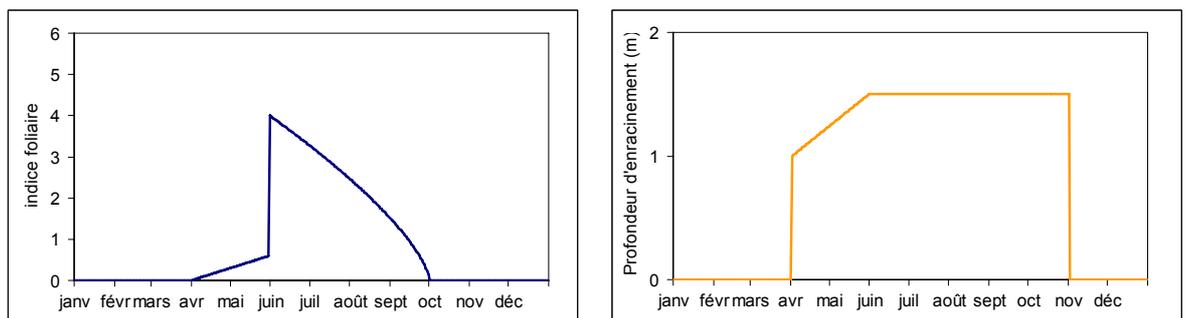


Illustration 95 - Evolution de l'indice foliaire (maximum 5) et de la profondeur des racines actives (maximum 2 m) pour un pommier.

L'illustration 96 résume l'ensemble des données relatives aux couverts végétaux qui ont été utilisés dans les simulations.

	Herbe	Framboisier	Chêne	Pommier	Olivier
Indice foliaire max	5	0.01	5	0.01	2
Indice foliaire min		4	5	4	3
Racines actives max	0.5	0.9	2	1	1
Racines actives min		1	2	1.5	2
Début activité*		91	107	91	31
Maximum d'activité*		151	122	151	151
Fin d'activité*		283	330	274	334
Pourcentage de racines dans les premiers 25% du sol	67%	60%	67%	60%	67%
Pourcentage avant réduction de la transpiration	60%	65%	60%	65%	65%

* jour julien

Illustration 96 - Principaux paramètres du développement des cinq couverts végétaux étudiés

Les profondeurs racinaires des trois couverts végétaux étudiés ont une influence forte sur les teneurs en eau simulées dans le sol. Dans tous les cas de figure, il existe une corrélation entre les périodes où le degré de saturation à 1 m de profondeur est particulièrement faible et les périodes de forte sinistralité (identifiées à partir du nombre de communes du Vaucluse reconnues simultanément en état de catastrophe naturelle sécheresse) (Illustration 97).

A 1 m de profondeur, l'action de l'herbe est limitée par comparaison avec celle des autres couverts végétaux étudiés car sa profondeur maximale d'enracinement est de 50 cm seulement. Les variations interannuelles du degré de saturation atteignent néanmoins 50 %.

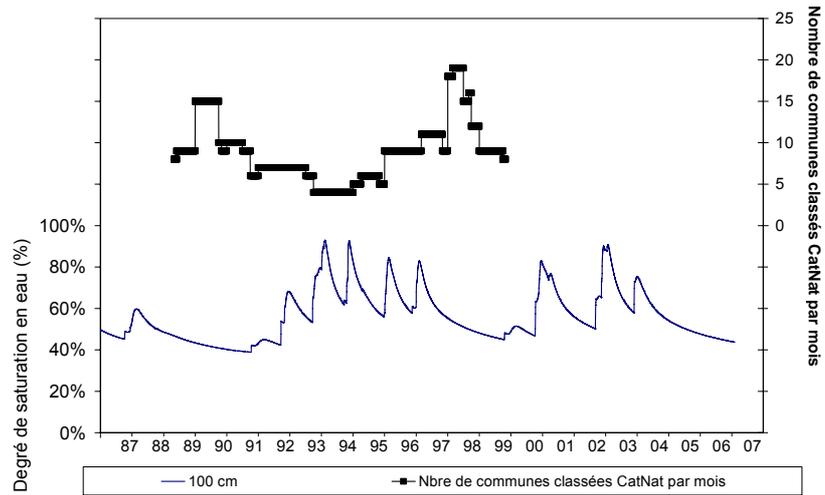
Les variations du degré de saturation à 1 m pour le framboisier sont annuelles mais une saturation nulle est rarement atteinte.

Bien que les cycles de l'indice foliaire et de la profondeur d'enracinement pour le chêne et l'olivier soient très différents, les variations induites dans l'humidité du sol semblent assez similaires : on observe de longues périodes durant lesquelles la saturation est nulle.

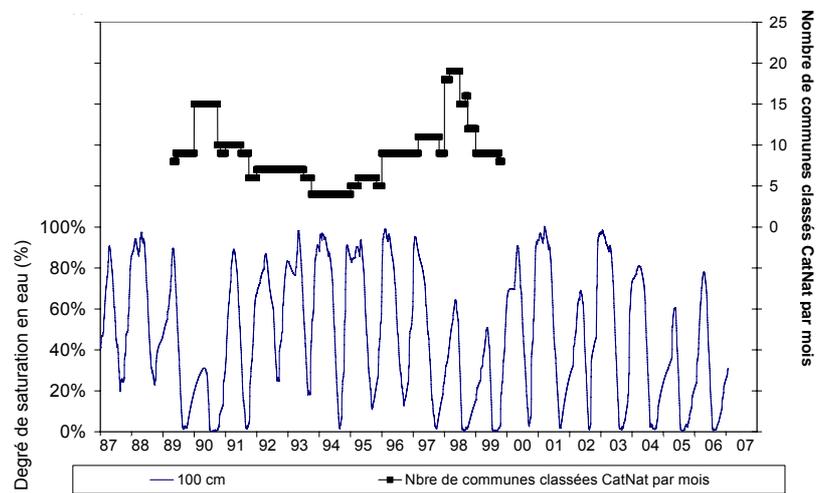
Le pommier, qui partage de nombreux paramètres avec le framboisier, présente des variations du degré de saturation assez comparables. Bien que les racines du pommier

atteignent dans la simulation 50 cm de plus que celle du framboisier, les différences de teneur en eau sont assez faibles.

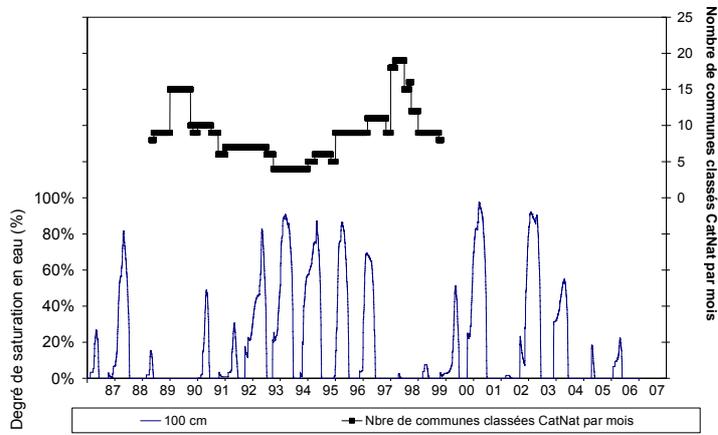
Couvert herbeux :



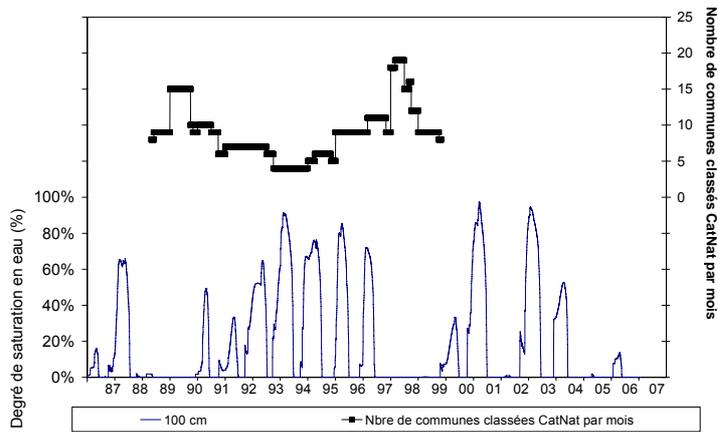
Arbuste (framboisier) :



Arbre de type chêne :



Arbre de type olivier :



Arbre de type pommier :

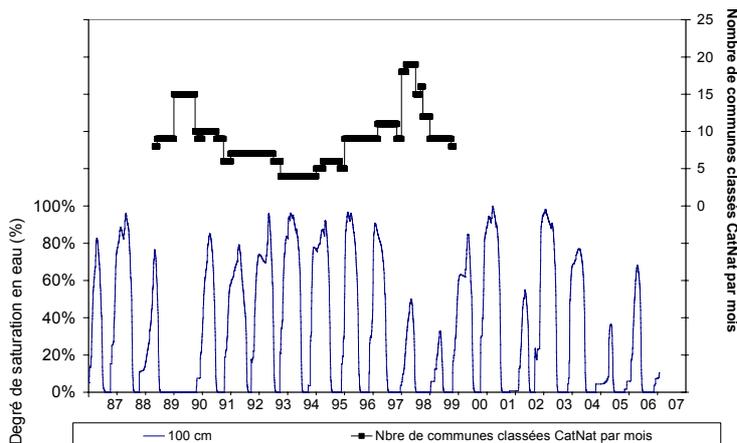


Illustration 97 - Variations du degré de saturation à 100 cm de profondeur pour cinq couverts végétaux sur le site de Mormoiron

L'étude de la variation du degré de saturation pour les trois couverts végétaux permet de réaliser une comparaison entre des valeurs mesurées et les valeurs simulées pour les différents couverts. L'ouverture d'une fosse pédologique à Mormoiron, en novembre 2005, a permis de recueillir des échantillons sur lesquels ont été déterminés les taux d'humidité. Ces valeurs mesurées ont été comparées aux valeurs modélisées par MACRO à la même date pour les trois couverts (Illustration 98). Les valeurs pour les couverts herbacés et arbustifs sont plus représentatives que les valeurs obtenues pour le couvert arboré car ces couverts se rapprochent davantage de la couverture végétale arbustive présente sur le site de Mormoiron.

Horizon	Profondeur de mesure (cm)	Humidité volumique mesurée* (%)	Humidité volumique (%) simulée pour :		
			l'herbe	le framboisier	l'olivier
1	≈5	59,9	41	45	43
2	≈27	39,0	43	48	44
3	≈67	43,5	34	27	26

* valeur massique mesurée traduite en teneur en eau volumique

Illustration 98 - Comparaison entre les taux d'humidité mesurés à Mormoiron et les taux d'humidité calculés par le modèle MACRO (16 novembre 2005)

Les prédictions du modèle apparaissent significativement différentes des valeurs mesurées dans tous les horizons. Le taux d'humidité volumique de 60 % du premier horizon est exceptionnel et est probablement dû à l'abondance de matière organique sur quelques centimètres d'épaisseur à la surface du sol. De plus, les précipitations qui se sont produites juste avant l'ouverture de la fosse ont fortement humidifié la couche la plus superficielle (0–10 cm), sans que ceci puisse être intégré dans les résultats de la modélisation. En ce qui concerne les deux horizons les plus profonds, les prédictions du modèle sont plus proches mais restent néanmoins éloignées des valeurs mesurées. De nouveaux calages sont donc encore nécessaires pour tenter d'améliorer la représentativité du modèle.

7.2.4. Influence des climats et des sols

Les caractéristiques du chêne décrit dans le paragraphe précédent (§ 7.2.3) ont été appliquées aux deux sites de Mormoiron et du Deffend. Les profils de variation des teneurs en eau sont clairement différents entre les deux sites étudiés. Une baisse générale des teneurs en eau au Deffend est observable durant les années de forte sinistralité même si ces baisses ne sont pas aussi significatives qu'à Mormoiron (Illustration 99). Les années où les dégâts ont été particulièrement importants au Deffend sont 1990 et 2003 et dans une moindre mesure 1998. Contrairement au site de Mormoiron, les simulations faites à 3 mètres semblent plus faciles à interpréter et plus en accord avec les années de forte sinistralité.

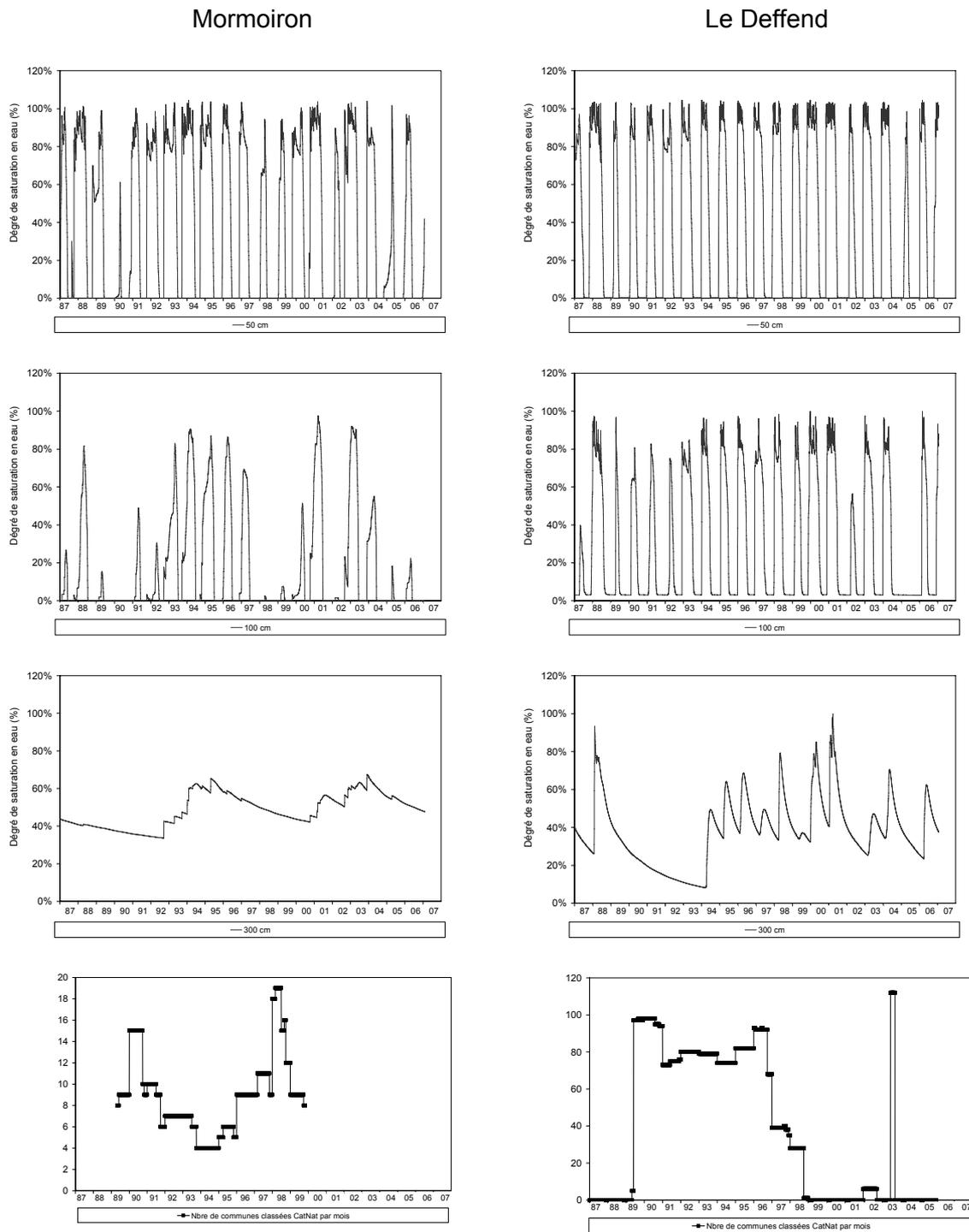


Illustration 99 - Variations du degré de saturation à 50 cm, 1 m et 3 m de profondeur pour le chêne sur les sites de Mormoiron et de Poitiers et comparaison avec le nombre d'arrêtés CatNat sur les départements

7.3. COMPARAISON AVEC LES RESULTATS OBTENUS *IN SITU*

Cette partie présente une comparaison entre les teneurs en eau mesurées *in situ* et celles calculées par MACRO pour différents types de couverts végétaux sur les sites du Deffend et Mormoiron. Cette comparaison porte sur les valeurs moyennes mensuelles obtenues à différentes profondeurs comprises entre 0,5 m et 2 m.

7.3.1. Site de Mormoiron

La comparaison porte sur les résultats MACRO obtenus avec différents couverts végétaux et les mesures enregistrées sur le site de Mormoiron par les deux cannes pour les profondeurs 0,5 m, 1 m et 2 m et, pour la canne 2 uniquement, à 1,5 m de profondeur. A cette dernière profondeur, les résultats sont présentés pour information et ne seront pas commentés, puisqu'ils sont incomplets. Pour rappel, la canne 1 est placée à proximité d'un orme de 4 à 5 m de hauteur, tandis que la canne 2 est placée sous un couvert de type herbeux.

Simulation d'un couvert arboré de type olivier sous MACRO

Les caractéristiques de l'olivier prises en compte dans MACRO sont celles présentées par l'illustration 96. L'illustration 100 présente les résultats obtenus par Macro sur le site de Mormoiron pour un olivier, ainsi que les mesures effectuées *in situ*.

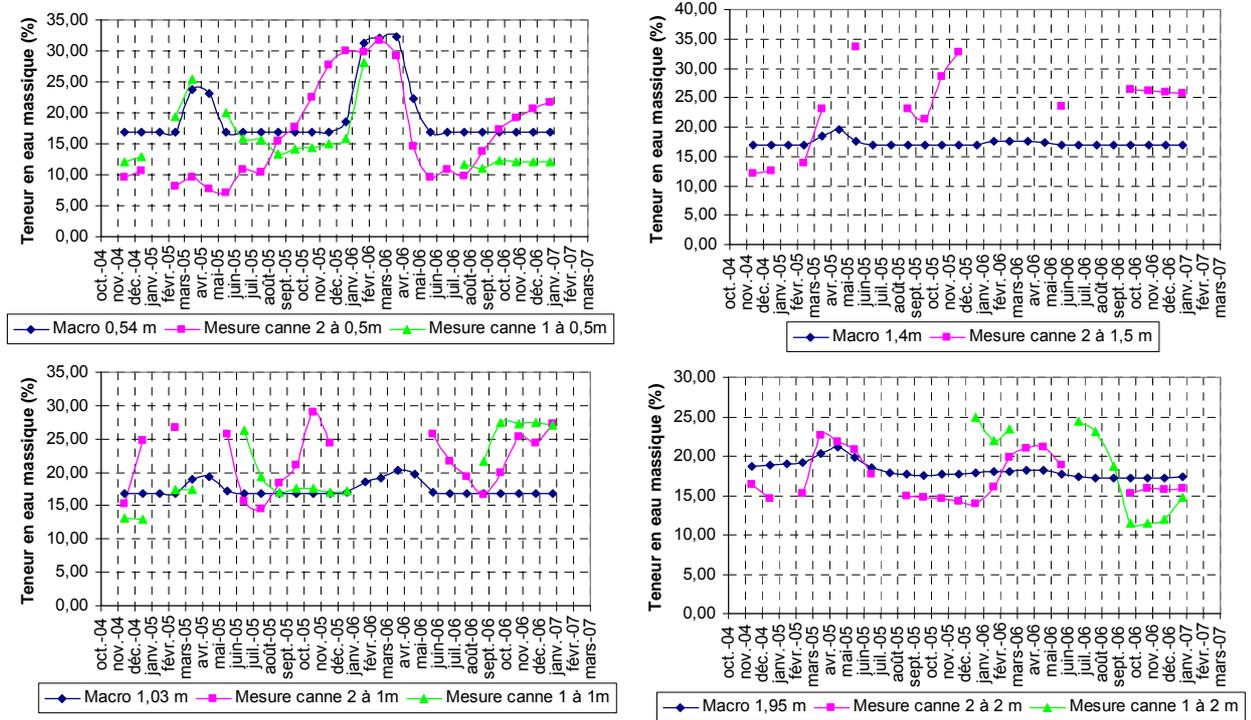


Illustration 100 - Résultats obtenus par Macro sur le site de Mormoiron pour un olivier et mesures *in situ*

L'illustration 100 montre que pour les profondeurs de 0,5 m et 1 m, les résultats MACRO donnent des valeurs très proches des valeurs effectivement mesurées *in situ* au niveau de la canne 1 située à proximité de l'orme. En effet, les deux pics observés en mars-avril 2005 et de janvier à avril 2006 sont bien respectés, de même que leur amplitude respective.

A partir de cette date et jusqu'en juillet 2006, aucune mesure n'a pu être enregistrée sur cette canne 1 à 0,5 m et 1 m de profondeur. A la reprise des mesures, en juillet 2006, les valeurs mesurées à 0,5 m de profondeur par la canne 1 sont plus faibles qu'auparavant (autour de 10-11 % au lieu de 14-15 %) ce qui est peut être dû au débroussaillage effectué en mai-juin 2006 et qui aurait comme conséquence à 0,5 m de profondeur, une plus grande évaporation.

A 1 m de profondeur, les résultats obtenus par MACRO ne coïncident plus avec les valeurs enregistrées par la canne 1 à partir de juillet 2006 ; en effet, celles-ci sont plus fortes qu'auparavant (entre 22 et 27 % à la place de 17 %), ce qui est peut être lié au débroussaillage qui a eu comme conséquence un arrêt de l'absorption racinaire et donc une augmentation de l'humidité à 1 m de profondeur.

Ensuite, la comparaison des résultats MACRO avec les mesures réalisées sous un couvert herbeux (canne 2) à 0,5 m de profondeur montre que la valeur de la teneur en eau en période estivale est largement inférieure sous couvert herbeux, ce qui irait dans le sens d'une plus grande évaporation sous couvert herbeux que sous couvert arboré à cette profondeur. De plus, l'augmentation de la teneur en eau au cours de l'hiver 2006 dure beaucoup plus longtemps que sous couvert herbeux, ce qui laisse envisager une forte interception de l'eau par le feuillage en hiver.

A 2 m de profondeur, les mesures enregistrées par la canne 1 fluctuent davantage que celles modélisées par MACRO. Les valeurs ne sont donc pas comparables. Toutefois, l'observation des mesures obtenues avec la canne 2 sous couvert herbeux montre que, bien que l'amplitude des variations de la teneur en eau au cours de l'année soit plus importante que celle modélisée, les faibles variations calculées avec MACRO apparaissent bien au même moment que celles mesurées *in situ*.

Simulation d'un couvert arbustif de type framboisier sous MACRO

Les caractéristiques du framboisier prises en compte dans MACRO sont celles présentées par l'illustration 96. L'illustration 101 présente les résultats obtenus par Macro sur le site de Mormoiron pour un framboisier, ainsi que les mesures *in situ*.

A 0,5 m, les résultats de la modélisation avec MACRO sous couvert arbustif sont quasiment identiques à ceux obtenus sous couvert arboré. En revanche, à 1 m de profondeur, les teneurs en eau modélisées sont plus importantes qu'avec l'olivier : les racines actives ont une profondeur moindre dans le cas du framboisier que pour l'olivier. Pour ce type d'arbuste, les modélisations MACRO concordent davantage avec les valeurs mesurées sous couvert herbeux. A 2 m de profondeur, les valeurs modélisées sont largement surestimées par rapport à la teneur en eau mesurée par la canne 2.

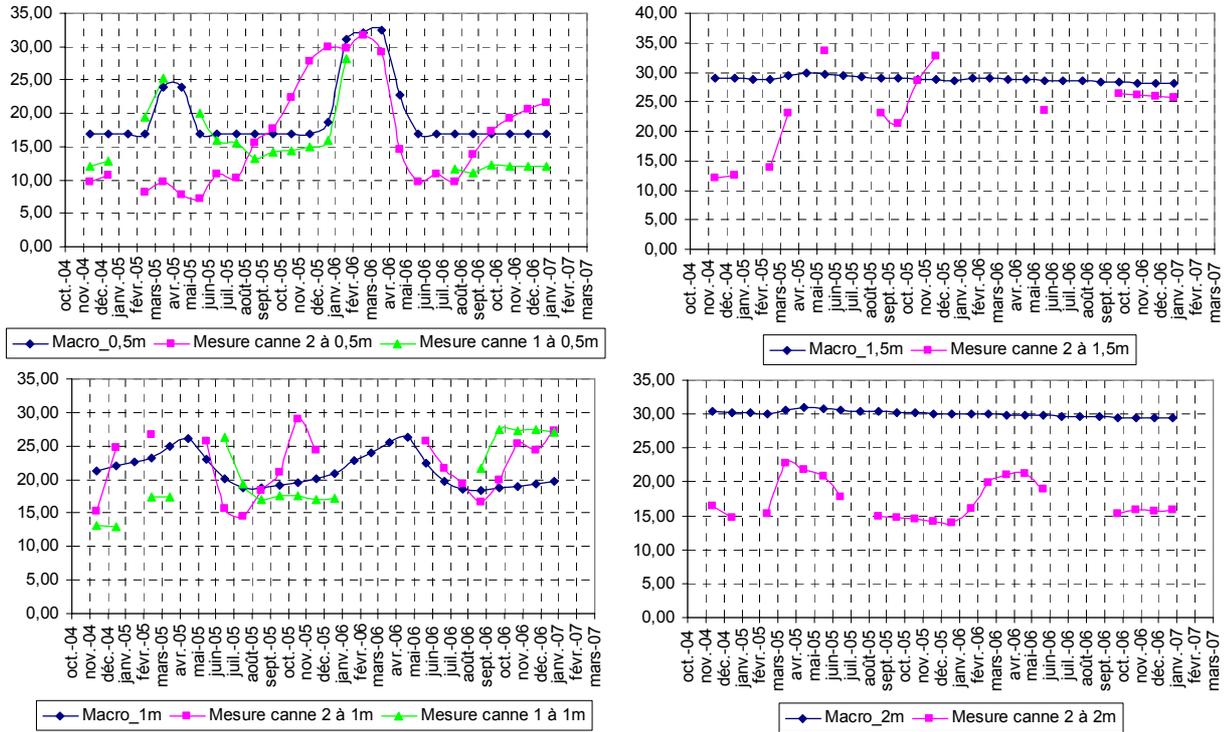


Illustration 101 - Résultats obtenus par Macro sur le site de Mormoiron pour un framboisier et mesures in situ

Simulation d'un couvert herbeux avec MACRO

Les caractéristiques du couvert herbeux prises en compte dans MACRO sont celles déterminées par le groupe FOCUS et présentées par l'illustration 96. L'illustration 102 présente les résultats obtenus par MACRO sur le site de Mormoiron pour un couvert herbeux, ainsi que les mesures *in situ*.

Quelle que soit la profondeur considérée, les mesures modélisées en prenant l'hypothèse d'un couvert herbeux, sont largement surestimées par rapport aux mesures enregistrées *in situ*, y compris pour les valeurs correspondant à la canne 2 sous couvert herbeux. Pour ce type de couvert, l'évapotranspiration en climat méditerranéen semble largement sous estimée par MACRO.

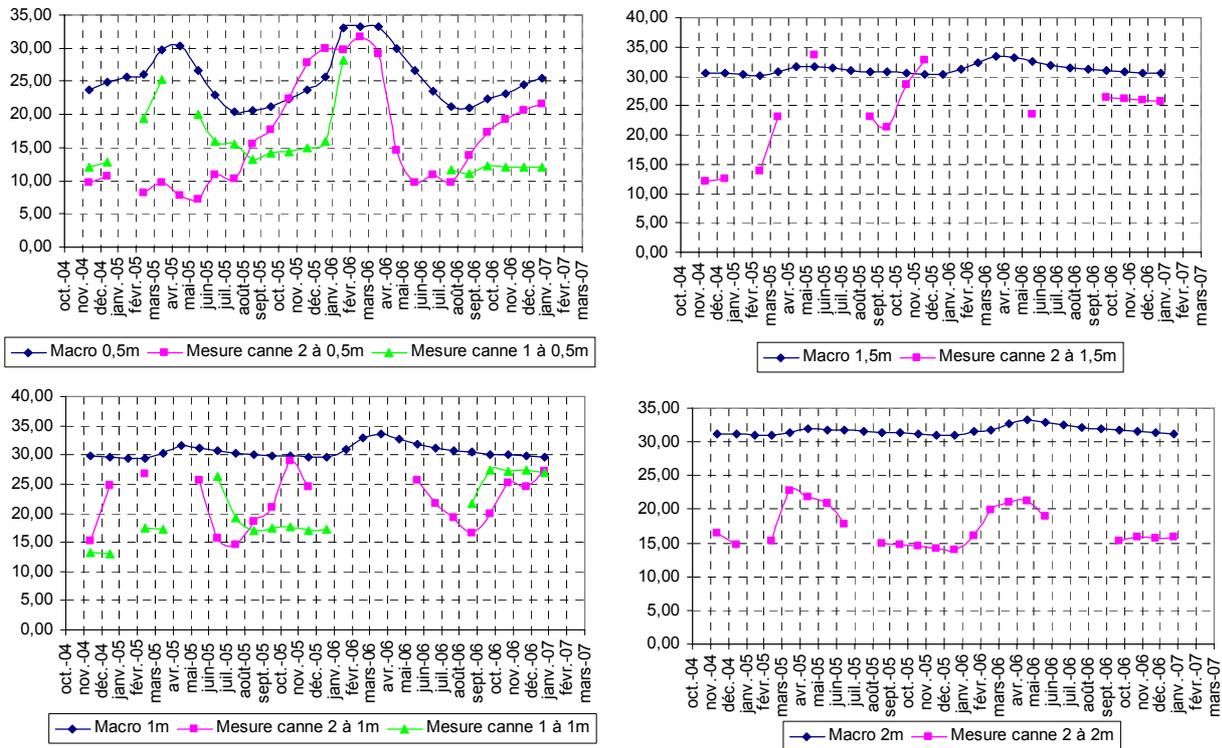


Illustration 102 - Résultats obtenus par Macro sur le site de Mormoiron pour un couvert herbeux et mesures *in situ*

7.3.2. Site du Deffend

Simulation d'un couvert arboré de type chêne sous MACRO

Le comportement de l'arbre a été modélisé suivant les résultats de Bréda et al. (1995) (Illustration 96). Les résultats obtenus sont comparés aux mesures réalisées en forêt.

La modélisation par Macro des teneurs en eau à 0,54 m à 0,54 m sur le site du Deffend en présence d'un chêne s'avère assez satisfaisante (Illustration 103) : bien que peu de données en forêt soient disponibles à 0,5 m, on observe que sur les premiers mois de mesure, l'humidité calculée est du même ordre de grandeur que celle mesurée. Les variations indiquées par Macro sont de plus assez bien corrélées avec celles observées en prairie.

A 1 m (Illustration 104), les corrélations entre Macro et les mesures *in situ* en forêt semblent moins bonnes : l'état particulièrement sec au début de la période de mesure n'apparaît pas avec le modèle, ce qui explique qu'on n'y voit pas transparaître de ré-humidification aussi importante que par les mesures *in situ*. On peut noter cependant que la ré-humidification mesurée à partir de janvier 2006 est très similaire à celle obtenue par Macro. En revanche, celle qui est détectée à la fois en forêt et en prairie en septembre et octobre 2006 n'apparaît pas du tout sur les résultats du modèle, alors que la réhumidification de décembre 2006 semble amplifiée par Macro, probablement

en raison d'un trop grand poids accordé aux précipitations antérieures (septembre et octobre 2006).

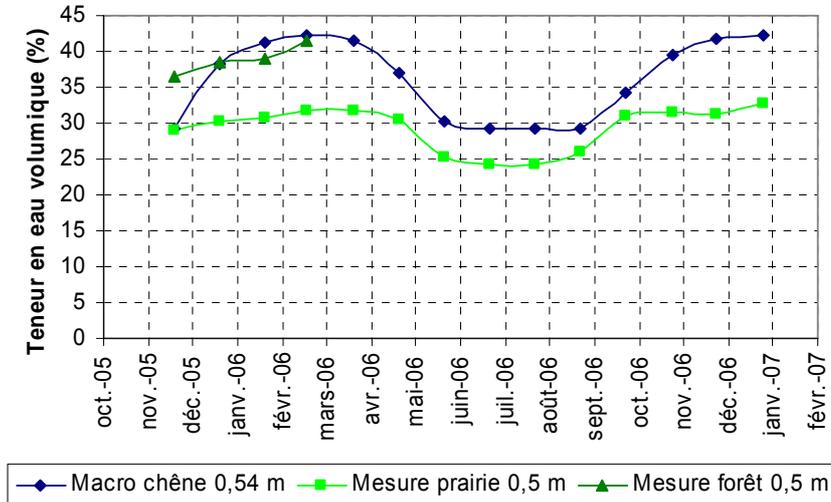


Illustration 103 – Résultats obtenus à 0,54 m par Macro sur le site du Deffend pour un chêne et mesures in situ à 0,5 m

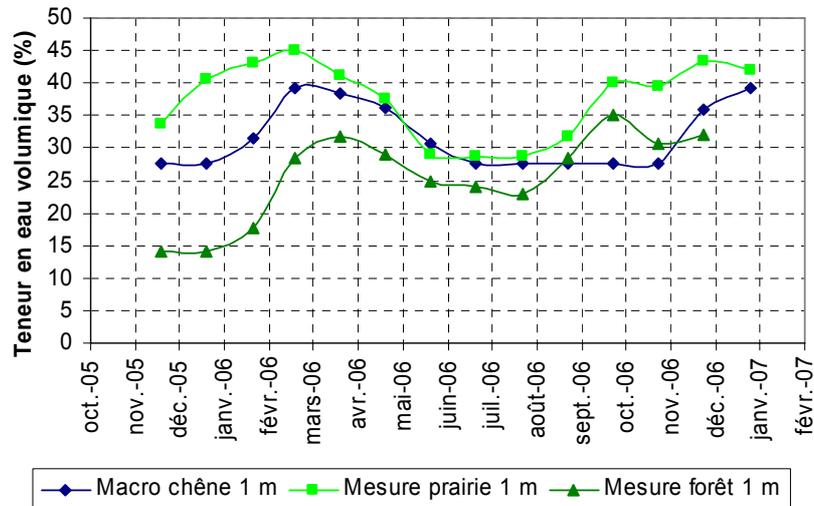


Illustration 104 – Résultats obtenus à 1 m par Macro sur le site du Deffend pour un chêne et mesures in situ à 1 m

A une profondeur de 1,4 m (Illustration 105), il semble que Macro ait tendance à sous-estimer les teneurs en eau volumiques, les résultats issus des mesures *in situ* semblant montrer un sol plus humide que ce qui ressort de la modélisation. On peut noter de plus qu'après la ré-humidification de mars 2006 et la dessiccation estivale qui suit, Macro indique des humidités à peine supérieures à l'été-automne 2006 qu'en hiver 2005-2006, alors que les mesures *in situ* indiquent une augmentation des teneurs en eau volumiques de 5 à 10 points entre l'hiver 2005-2006 et l'été-automne 2006. Les

phases d'humidification, particulièrement rapides sur ce niveau d'après Macro, présentent quant à elles une bonne simultanéité entre les mesures et le modèle : au mois de mars 2006, par exemple, les seules mesures valides correspondent au début du mois, une importante saturation du capteur intervenant très rapidement, alors que Macro indique une brutale ré-humidification sur ce mois. On retrouve le même phénomène à l'hiver 2006, où la saturation du capteur s'accompagne d'une importante ré-humidification d'après Macro.

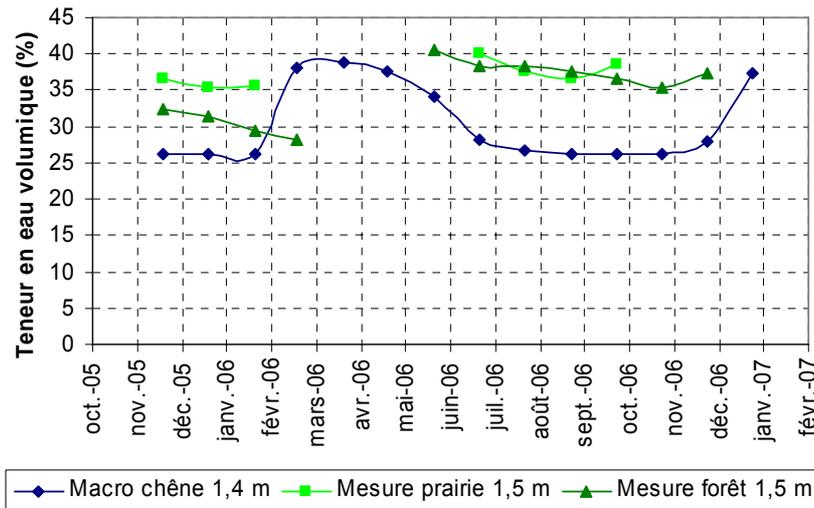


Illustration 105 – Résultats obtenus à 1,4 m par Macro sur le site du Deffend pour un chêne et mesures *in situ* à 1,4 m

A 1,9 m (Illustration 106), les résultats issus de Macro sont très intéressants, puisque malgré une humidité initiale très supérieure aux observations *in situ* à 2 m, on observe tout de même une humidité significativement plus élevée à l'automne 2006, et alors sensiblement équivalente à celles mesurées *in situ*. Ceci confirme le caractère humide de l'année 2006 par rapport à l'année 2005, bien que l'état de dessiccation calculé par Macro à l'hiver 2005 soit sous-estimé.

A 2,5 m (Illustration 107), Macro indique peu de variations de l'humidité : la teneur en eau est stable et significativement inférieure à celle obtenue *in situ* durant les quatre premiers mois, puis une légère humidification intervient en mars 2006 avant une très légère et lente dessiccation, qui maintient toutefois un état légèrement plus humide qu'à l'hiver 2005-2006. Les mesures *in situ* présentent quant à elles des variations plus conséquentes : aucun état stable ne se distingue : la ré-humidification intervient très tôt, sur un sol beaucoup plus sec que ce qu'annonce Macro, pour atteindre un degré d'humidité supérieur à celui calculé avec Macro à l'été 2006. Une ré-humidification rapide intervient de plus dès le mois d'octobre 2006, alors que les résultats modélisés reflètent un état hydrique stable à cette période.

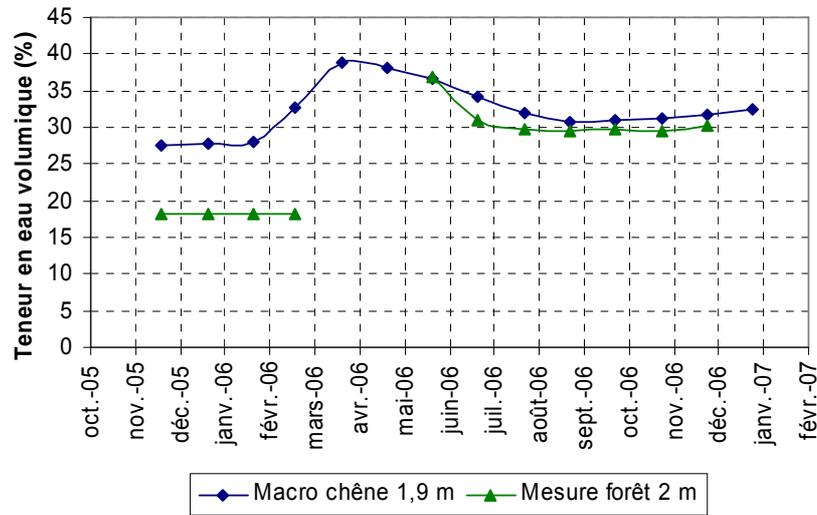


Illustration 106 – Résultats obtenus à 1,9 m par Macro sur le site du Deffend pour un chêne et mesures in situ à 2 m

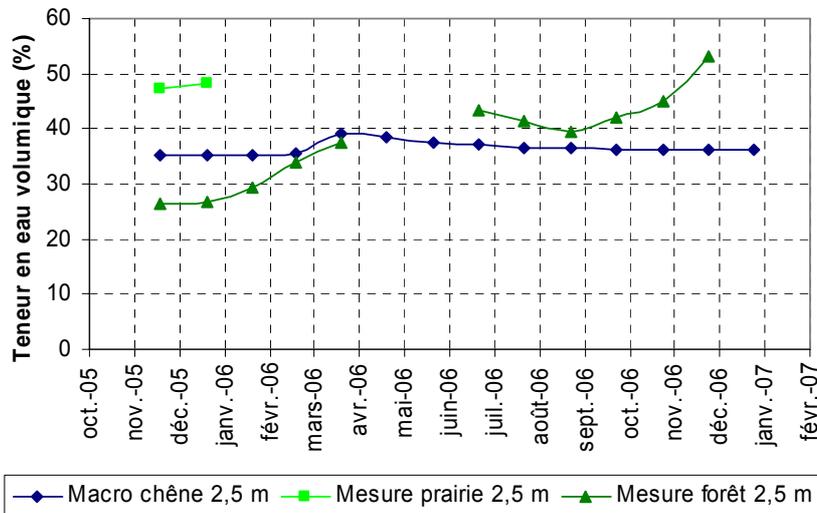


Illustration 107 – Résultats obtenus à 2,5 m par Macro sur le site du Deffend pour un chêne et mesures in situ à 2,5 m

A 2,8 m (Illustration 108), l'humidité issue de Macro est très proche de celle obtenue à 2,5 m. Peu de mesures *in situ* sont cependant disponibles à 3 m, sauf en fin d'été – début d'automne 2006, où les teneurs en eau volumiques mesurées sont légèrement supérieures à celles calculées avec Macro.

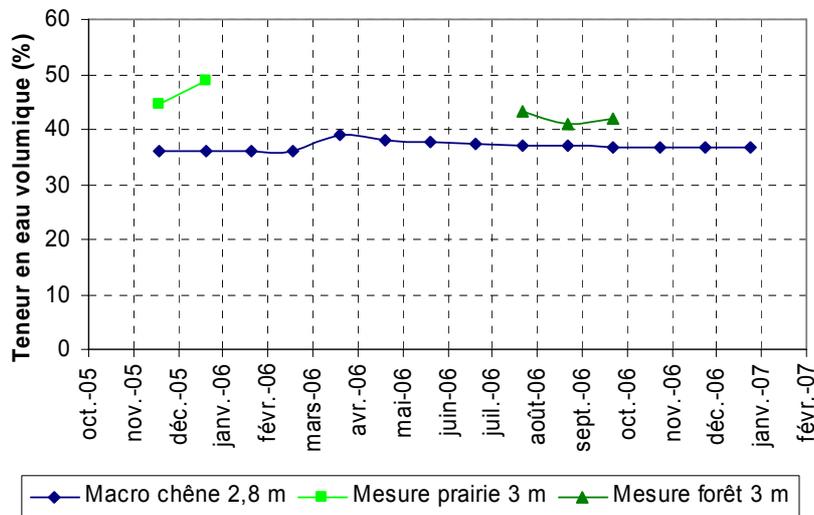


Illustration 108 – Résultats obtenus à 2,8 m par Macro sur le site du Deffend pour un chêne et mesures *in situ* à 3 m

A 3,2 m, cependant (Illustration 109), on peut noter que la ré-humidification modélisée avec Macro est très supérieure à celles calculées pour les horizons supérieurs (2,5 m et 2,8 m. La comparaison avec les mesures *in situ* à 3,5 m en forêt montre néanmoins que les humidités modélisées avant (décembre 2005-janvier 2006) et après (décembre 2006-janvier 2007) cette phase de ré-humidification printanière sont quasi-identiques à celles réellement observées *in situ*.

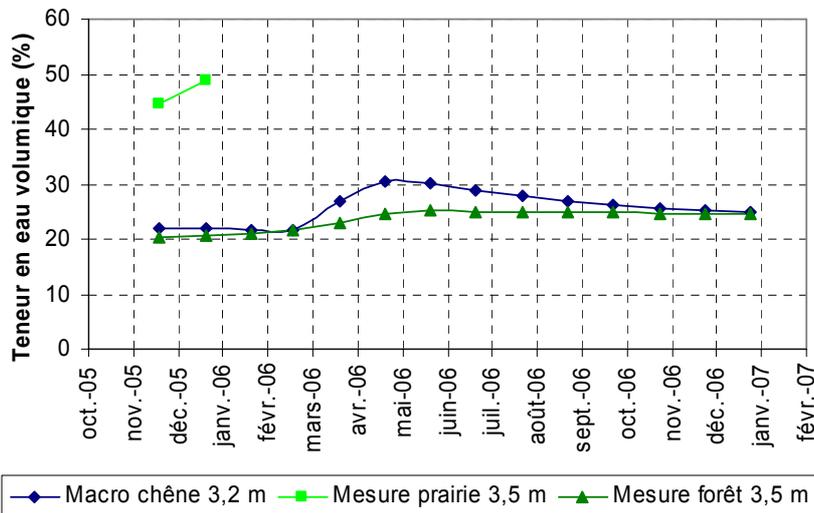


Illustration 109 – Résultats obtenus à 3,2 m par Macro sur le site du Deffend pour un chêne et mesures *in situ* à 3,5 m

Simulation d'un couvert herbeux avec MACRO

Les résultats issus des simulations de Macro dans le cas d'une couverture herbeuse sont à comparer aux mesures *in situ* effectuées en prairie, pour lesquelles cependant seuls les horizons les plus superficiels fournissent des résultats exploitables.

Les modélisations réalisées avec Macro pour un couvert herbeux à 0,54 m de profondeur (Illustration 110) aboutissent à des valeurs sensiblement supérieures à celles mesurées *in situ* en prairie à 0,5 m de profondeur, ce qui reflète peut être une sous-estimation de l'évapotranspiration, comme cela a déjà été évoqué dans le cas d'un olivier en climat méditerranéen. Les deux courbes suivent cependant des fluctuations temporelles très similaires.

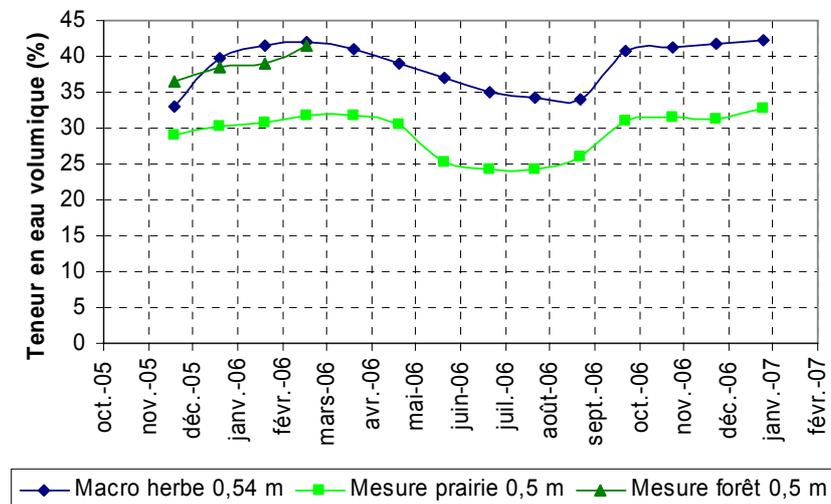


Illustration 110 – Résultats obtenus à 0,54 m par Macro sur le site du Deffend pour un couvert herbeux et mesures *in situ* à 0,5 m

A 1 m (Illustration 111), les phases de dessiccation et de ré-humidification semblent tout aussi bien corrélées, à part pour la dessiccation mesurée au mois de novembre 2006 (sur les deux grappes) et qui n'apparaît pour aucune configuration du modèle. Les ordres de grandeur des humidités calculées avec Macro ou mesurées *in situ* sont cette fois plus cohérents, bien que les amplitudes de variations enregistrées par les capteurs soient plus importantes que celles obtenues par le modèle.

A 1,4 m (Illustration 112), les résultats issus de Macro sont cohérents avec les mesures *in situ*, tant en termes d'ordre de grandeur de l'humidité volumique qu'en termes de phases de dessiccation et de ré-humidification (la teneur en eau de février 2006 étant sous-estimée du fait de la saturation du capteur à partir du 19 février).

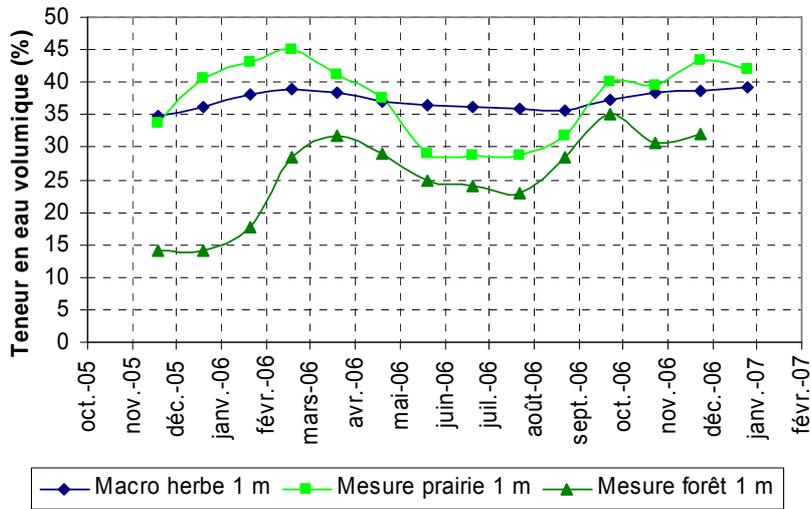


Illustration 111 – Résultats obtenus à 1 m par Macro sur le site du Deffend pour un couvert herbeux et mesures in situ à 1 m

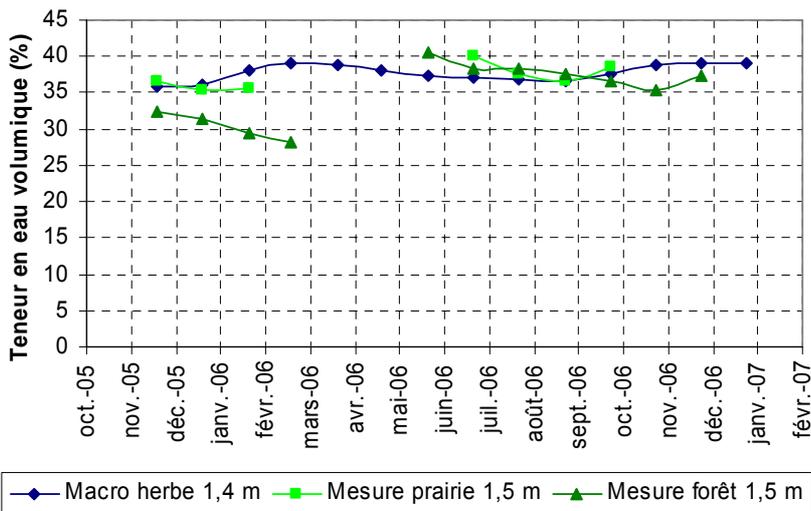


Illustration 112 – Résultats obtenus à 1,4 m par Macro sur le site du Deffend pour un couvert herbeux et mesures in situ à 1,5 m

Au-delà de 1,5 m, les mesures *in situ* ne sont plus valides, hormis pour les deux premiers mois, où les teneurs en eau volumiques obtenues sont alors toujours supérieures aux résultats annoncés par Macro (de 8 à 20 points d'écart).

7.4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'utilisation du modèle de transfert MACRO a permis de simuler l'évolution des taux d'humidité sur deux sites présentant des caractéristiques contrastées. Les résultats

des simulations semblent en accord avec les observations effectuées sur le terrain, même si des calages complémentaires restent à réaliser. Les années marquées par une forte sinistralité imputée au phénomène de retrait-gonflement des sols argileux (1989-91 et 1997-99) se singularisent sur les simulations des deux sites.

Les variations typiques de teneurs en eau sont particulièrement visibles à 1 m de profondeur pour le site de Mormoiron tandis qu'une simulation à une profondeur de 3 m semble plus adéquate pour le site du Deffend. Cette variation est certainement due à l'organisation différente des horizons argileux dans ces deux sites.

Le modèle produit d'ores et déjà des simulations de bonne qualité et il reste envisageable d'en améliorer les résultats. Pour cela, il sera nécessaire de se procurer des données d'entrée plus précises, en particulier pour caractériser le cycle végétatif et les profondeurs des racines actives à différentes périodes de l'année pour plusieurs types de couverts végétaux représentatifs, ainsi qu'en procédant à de nouvelles calibrations du modèle par comparaison avec les données expérimentales actuellement en cours d'acquisition sur les sites.

Les résultats des modélisations déjà réalisées sont par ailleurs tout à fait encourageants vis-à-vis de la définition en cours d'un indice de dessiccation exceptionnelle du sol en profondeur, lequel pourrait être facilement mis en relation avec les périodes de sinistralité observées au cours des dernières années. La comparaison des résultats des modélisations avec les mesures *in situ* obtenue pour différents climats, sous différents couverts herbeux et à différentes profondeurs ont d'ailleurs montré la capacité de MACRO à simuler des variations de teneurs en eau cohérentes avec les teneurs en eau mesurées et leur évolution en terme de séchage – humidification et en particulier en site arboré dans un climat méditerranéen pour de faibles profondeurs et pour des couverts arborés et herbeux dans un climat océanique.

Conclusions

Cette deuxième partie de l'étude fait suite à une première phase, qui avait consisté en une revue bibliographique, destinée à synthétiser l'état des connaissances en la matière, puis en la mise en œuvre d'un programme d'instrumentation sur deux sites distincts, l'un en climat méditerranéen, l'autre en climat océanique à semi-continentale. Cette première phase avait ainsi permis, outre le travail de synthèse bibliographique, d'identifier les deux sites expérimentaux, l'un à Mormoiron (Vaucluse), l'autre à Mignaloux-Beauvoir au lieu-dit Le Deffend (Vienne), de mettre en place le matériel d'instrumentation et de procéder aux premières acquisitions et interprétations. Elle avait fait l'objet de la remise d'un premier rapport de synthèse daté de mai 2006⁴.

Afin de poursuivre les investigations, il a été décidé de lancer une seconde phase d'étude, pour une période de seize mois, financée à 60 % par la Sous-Direction de la Prévention des Risques Majeurs du MEDAD, le solde étant apporté par la dotation de service public du BRGM allouée par le Ministère de la Recherche. Cette deuxième phase avait pour objectif de poursuivre l'acquisition des données pendant un cycle hydrologique complet, d'assurer la maintenance des installations de mesure, d'acquérir les données de base (climatologiques, géologiques et géotechniques) nécessaires à l'interprétation des mesures, de procéder à des corrélations régulières entre teneurs en eau du sol (mesurée en laboratoire sur la base de prélèvements d'échantillons) et permittivité (mesurée par les capteurs *in situ*). De plus, elle devait conduire à établir une corrélation entre les données d'entrée climatologiques (pluie, évaporation) et les teneurs en eau dans le sol, à élaborer des outils de modélisation calés sur les observations des sites expérimentaux et permettant de rendre compte des mécanismes de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement en fonction des conditions climatiques, des caractéristiques du sol et de l'environnement immédiat (rôle des arbres en particulier), et enfin, de commencer à procéder à des études paramétriques, à partir de ces outils de modélisation pour déterminer l'influence réciproque des différents paramètres en cause.

L'acquisition des mesures s'est poursuivie quasi sans interruption tout au long de cette période de seize mois, ce qui a permis d'accumuler des séries de mesures expérimentales, depuis décembre 2004 pour les plus anciennes, qui sont précieuses pour caler les travaux de modélisation menés en parallèle. Plusieurs défaillances techniques ont été enregistrées au cours de cette période d'acquisition, dont la perte d'un capteur d'humidité en forêt à 0,5 m de profondeur sur le site du Deffend, ainsi que le blocage temporaire de plusieurs capteurs extensométriques sur le même site, soit par grippage mécanique soit par atteinte de la limite maximale d'extension (dans les deux cas il a été remédié à ces blocages dans un délai raisonnable). Par ailleurs, les travaux de calibration des capteurs Humitub se poursuivent en laboratoire, avec la

⁴ Rapport BRGM/RP-54567-FR intitulé « Suivi de l'évolution en profondeur de la dessiccation des sols argileux en période de déficit hydrique – Rapport final de phase 1 », mai 2006

collaboration du CERMES, pour préciser les limites d'utilisation de ce matériel dans les sols argileux, notamment au delà d'un certain niveau de teneur en eau, ainsi que lors des phases de retrait entraînant une perte de contact entre les électrodes de mesure et le sol. Néanmoins, les différentes observations menées à ce stade confirment que les indications fournies par ces capteurs sont largement exploitables, au moins en dehors des périodes de forte humidité, et donnent des indications fiables sur l'évolution en continu des teneurs en eau dans les sols.

La poursuite du travail d'interprétation de ces données expérimentales a montré en particulier tout l'intérêt de raisonner à un pas de temps mensuel qui permet de s'affranchir des variations singulières de la teneur en eau en globalisant l'analyse. Avec un tel pas de temps, les corrélations entre les données météorologiques locales et l'évolution des teneurs en eau, au moins jusqu'à 1 m de profondeur, est relativement étroite même si le travail réalisé à ce jour n'a pas encore permis d'identifier des indicateurs simples permettant de relier ces deux grandeurs. Au-delà de cette profondeur, d'autres phénomènes, liés notamment à des circulations temporaires d'eau à la faveur de lentilles plus perméables, interfèrent manifestement et se traduisent par un décalage temporel entre les variations d'humidité du sol et les conditions climatiques de surface.

Les observations effectuées à ce jour confirment en tout cas que les transferts hydriques dans un sol argileux, même relativement homogène, sont fortement influencés par des variations lithologiques localisées et se révèlent beaucoup plus complexes que les transferts de chaleur (pour lesquels un simple modèle de diffusivité thermique rend bien compte des mesures expérimentales). Enfin, les mesures effectuées sur le site du Deffend en sous-bois mettent clairement en évidence le rôle d'un couvert végétal continu sur la dessiccation du sol en profondeur, la phase de ré-humidification après une période sèche étant retardée par rapport à un couvert herbacé. Ceci est particulièrement visible sur le début de la période d'observation, où les mesures mettent en évidence un état de dessiccation inhabituel dans le sol : la ré-humidification apparaît durant l'hiver 2005-2006 en forêt, alors qu'elle semble déjà bien avancée en prairie, probablement en raison de l'absence d'interception des précipitations par le feuillage. Les mesures réalisées ensuite en 2006 et 2007 montrent des variations saisonnières finalement plus modestes. Le front de dessiccation, estimé à Mormoiron à partir des mesures d'humidité disponibles, présente une propagation atteignant au moins 2,50 m de profondeur en été, mais pouvant dépasser les 3,5 m lors d'un été particulièrement sec tel que celui de 2005.

Les mesures disponibles à ce jour montrent par ailleurs une excellente corrélation entre les mouvements verticaux du sol, au moins en surface et jusqu'à quelques dizaines de centimètres de profondeur, et les conditions météorologiques ainsi que l'humidité induite dans la tranche de sol concernée. Les phénomènes de gonflement consécutifs aux épisodes pluvieux s'avèrent particulièrement rapides et ont atteint 13 mm en deux mois à une profondeur de 0,5 m au Deffend en janvier-février 2005, avec des vitesses instantanées de plusieurs mm par jour. La phase de retrait a pu être suivie dans son intégralité sur le site du Deffend entre le 9 mars et le 15 septembre 2006 où l'on a enregistré un tassement cumulé de 21,9 mm à 0,1 m de profondeur, s'atténuant progressivement en profondeur mais atteignant encore 7,6 mm à 1,5 m. Ce

retrait est plus progressif que le gonflement et est stoppé périodiquement lors de la survenance d'épisodes pluvieux (avec même des pics de gonflement en surface). Au pas de temps mensuel, une amorce de corrélation entre les déformations du sol et leur état hydrique (voire l'historique des précipitations observées au cours des mois précédents) paraît désormais envisageable. Sur le site de Mormoiron, les chroniques de déplacements sont encore trop courtes mais la même corrélation apparaît d'ores et déjà entre les déformations du sol et son état d'humidité.

L'utilisation du modèle de transfert MACRO a permis de simuler l'évolution des taux d'humidité sur deux sites présentant des caractéristiques contrastées. Les résultats des simulations semblent en accord avec les observations faites sur le terrain, même si des calages complémentaires restent à effectuer. Les années marquées par une forte sinistralité imputée au phénomène de retrait-gonflement des sols argileux (1989-91 et 1997-99) se distinguent sur les simulations des deux sites. Les variations typiques de teneurs en eau sont particulièrement visibles à 1 m de profondeur pour le site de Mormoiron tandis qu'une simulation à une profondeur de 3 m semble plus adéquate pour le site du Deffend. Cette variation est certainement due à l'organisation différente des horizons argileux dans ces deux sites.

Le modèle produit déjà des simulations de bonne qualité et il reste envisageable d'en améliorer les résultats. Pour cela, il sera nécessaire de se procurer des données d'entrée plus précises, en particulier pour caractériser le cycle végétatif et les profondeurs des racines actives à différentes périodes de l'année pour plusieurs types de couverts végétaux représentatifs, ainsi qu'en procédant à de nouvelles calibrations du modèle par comparaison avec les données expérimentales actuellement en cours d'acquisition sur les sites. Les résultats des modélisations déjà réalisées sont par ailleurs tout à fait encourageants vis-à-vis de la définition en cours d'un indice de dessiccation exceptionnelle du sol en profondeur et des premières comparaisons des résultats du modèle avec les valeurs mesurées *in situ* à un pas de temps mensuel.

Cette deuxième étape du projet de recherche a donc atteint la plupart de ses objectifs et est très encourageante, même si elle est encore limitée par l'étendue des données disponibles. Elle sera poursuivie par une troisième phase qui devra permettre l'acquisition des mesures jusqu'à fin 2008 afin de couvrir, sur chacun des deux sites instrumentés, une durée minimale d'observation de trois ans, indispensable pour suivre des situations hydrologiques variées et pour engranger les données expérimentales qui permettront d'extrapoler, par modélisation, ces observations à d'autres types de configurations. Un second objectif sera de poursuivre les investigations pour pallier les défauts inhérents au type de capteurs capacitifs mis en place (difficultés de calibration en terrain très argileux, saturation rapide des capteurs au-delà d'une certaine teneur en eau, défaut de contact avec le sol lors des phases de retrait intense). Un troisième objectif consistera à mettre en place de nouveaux extensomètres en forage de manière à quantifier d'une part le rayon d'influence des arbres et d'autre part l'incidence d'une protection anti-évaporation de type géomembrane, souvent préconisée comme mesure constructive préventive.

Bibliographie

Bréda N., Granier A., Barataud F., Moyne C. (1995) - Soil water dynamics in an oak strand. Soil moisture, water potentials and water uptake by roots. *Plant and Soil*, 172, pp. 17-27

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.

Gaudu J.C., Mathieu J.M., Fumamel J.C., Bruckler L., Chanzy A., Bertuzzi P., Stengel P., Guennelon R. (1993) – Mesure de l'humidité des sols par une méthode capacitive : analyse des facteurs influençant la mesure, *Agronomie*, 13, pp. 57-73

Granier A., Bréda N., Biron P., 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

Hemmati S. (2006) – Étude des mécanismes de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux. Rapport d'avancement de 1^{ère} année, 94 p.

Jarvis N. J., Larsson P.-E., Fogg P. et Carter A. D. (1995) – Validation of the dual-porosity model MACRO for assessing pesticide fate and mobility in soils. In : *Pesticide movement to water*, A. Walker et al. ed., pp. 161-170. BCPC monograph 62. The British Crop Protection Council, Farnham, Surrey, UK

Larsbo M. et Jarvis N. J. (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.

Mantho A. (2005) – Échanges sol – atmosphère : application à la sécheresse. *Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées*, 250 p.

Martin M. (2007) – Mesure de l'humidité d'un sol – Étalonnage d'une sonde capacitive. Rapport de stage scientifique de 1^{ère} année à l'École Nationale des Ponts et Chaussées, stage réalisé au CERMES du 23 avril au 13 juillet 2007, 84 p., 8 ann.

Mrad M. (2006) - Géologie du site du Deffend. Rapport du projet RGCU retrait-gonflement des argiles. Rapport LAEGO, 24 p.

Mrad M., Nowamooz H. (2007) – Essais de laboratoire pour la caractérisation hydromécanique des sols sensibles au retrait-gonflement (sols du Deffend et de Champenoux). Rapport LAEGO-ENSG LG.MM.ANR.PSI.RPRE.07.0267.A, 46 p., 1 ann.

Rosnoblet J. (2002) - Dynamique du bilan hydrique parcellaire au sein de l'espace rural, et conséquences sur les transferts hydrologiques. Thèse de doctorat de l'Institut National Agronomique de Paris-Grignon, 145 p. + ann.

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., 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.

Vincent M., Bouchut J., Fleureau J.-M. (LMSSMat), Masrouri F. (LAEGO), Oppenheim E. (CEBTP-Solen), Heck J.-V. (CSTB), Ruaux N. (CSTB), Le Roy S., Dubus I., Surdyk N. (2006) - Étude des mécanismes de déclenchement du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux et de ses interactions avec le bâti – rapport final. *BRGM/RP-54862-FR*, 378 p., 308 ill.

Williams G. P., Gold L. W. (1977) - Les températures du sol. Digest de la construction au Canada - CBD-180-F (Conseil National de Recherches Canada - Institut de recherche en construction)

Annexe 1

Liste chronologique des interventions de maintenance réalisées sur le site de Mormoiron depuis l'installation

Cette annexe présente, dans l'ordre chronologique, toutes les interventions liées à l'instrumentation depuis début 2004 ou à des prélèvements ou observations des sols.

02 septembre 2004 :

Réalisation d'un sondage carotté (SC2) à 7 m de profondeur et prélèvement d'échantillons non remaniés.

01 au 03 décembre 2004 :

Installation de l'instrumentation sur le site : 2 sondages à la tarière motorisée (ST1 près de l'arbre et ST2 en prairie, avec prélèvements tous les 50 cm) permettant l'implantation des 2 cannes de mesure de la teneur en eau du sol de 12 points chacune et d'un pluviomètre.

26 janvier 2005 :

Installation du modem IrisCom et vidange manuelle sur site des premières mesures.

22 février 2005 :

L'impossibilité de se connecter à la station via l'IrisCom (communication GSM) a nécessité une intervention afin de remplacer la batterie et un fusible de type triac. Ceci s'est cependant révélé insuffisant, puisque les mesures n'ont pas repris au remplacement de la batterie. Plusieurs éléments de la station ont donc été démontés pour les tester en laboratoire (centrale d'acquisition Osiris et modem)

7 mars 2005 :

Le 7 mars 2005, l'ensemble du matériel a été remonté (centrale d'acquisition Osiris avec nouvelle carte d'alimentation, batterie, système GSM IrisCom). Les essais de connexion à distance ont cependant montré la persistance de la panne. Une fosse (Fos1) a également été creusée manuellement sur la parcelle voisine jusqu'à une profondeur de 50 cm pour le prélèvement d'échantillons partiellement remaniés.

10 mars 2005 :

Le 10 mars 2005, une nouvelle intervention a permis de détecter et corriger un dysfonctionnement au niveau de la carte d'alimentation de la station Osiris. Le

chargement des données enregistrées montre au final une interruption entre le 26 janvier et le 10 mars 2005.

4 avril 2005 :

Le 4 avril 2005, une intervention sur site a été nécessaire pour remplacer la batterie d'alimentation, dont la tension était tombée à moins de 9 V. Une reprogrammation de la centrale Osiris a également été nécessaire pour une bonne reprise des mesures (le pas de temps des mesures a alors été passé à 4 heures). C'est ce qui explique l'absence de mesures entre le 1^{er} avril et le 8 avril 2005 (un problème sur la date de réveil de la station a été généré par la modification du pas de temps de mesure, et n'a été constaté et réparé que lors du téléchargement suivant).

18 mai 2005 :

Suite à une impossibilité de connexion par le système GSM le 13 mai 2005, une intervention a été décidée afin de remédier au problème. Malgré une tension de batterie correcte, l'alimentation a été remplacée, ce qui a eu pour conséquence immédiate une reprise des acquisitions. Les observations des mesures disponibles montrent que l'arrêt des acquisitions par le système coïncide avec le remplacement de la batterie par la mairie le 2 mai 2005. Il est donc probable que ce remplacement ait eu lieu pendant que la centrale Osiris était en cours d'acquisition, ce qui a eu pour effet un blocage de la station. Ceci explique l'absence de mesures entre le 2 et le 18 mai 2005.

Cette intervention a également été l'occasion de remplacer les cosses mâles d'alimentation de l'Osiris par des cosses à effacement afin d'éviter tout risque de court-circuit lors des interventions (les cosses à effacement permettant la protection des électrodes par une gaine plastique lors du débranchement).

4 juillet 2005 :

Cette intervention avait pour objectifs principaux d'une part le prélèvement d'échantillons intacts sur le site (fosse Fos2, creusée à la pelle mécanique jusqu'à une profondeur de 2 m), et d'autre part le scellement des têtes de canne Humitub au mortier. Cette intervention en période estivale a été l'occasion d'observer la dessiccation des sols : de nombreuses fentes de retrait étaient présentes sur le site, dont les plus grandes pouvaient atteindre 5 cm de large pour environ 23 cm de profondeur. De même, autour des cannes, un espace annulaire de quelques millimètres de large est apparu et permet un mouvement de la canne, ce qui traduit probablement un mauvais contact des électrodes avec le sol. Ces espaces ont été comblés par du sable, puis refermés par de l'argile. Des scellements au mortier ont ensuite été réalisés autour des têtes de canne, à la place des simples protections plastiques initiales.

28 juillet 2005 :

L'objet de cette intervention était de tester, en parallèle des capteurs Humitub, une sonde TDR, implantée de manière provisoire à 50 cm de profondeur dans le terrain. L'opération s'est cependant avérée impossible de par la dureté du sol en période estivale : un forage à la tarière à main a bien été réalisé, mais l'implantation de la sonde TDR s'est avérée impossible sans risque de dégradation des 2 pointes faisant office d'électrodes et qui doivent être fichées dans le sol sur toute leur longueur. Lors de cette intervention, les acquisitions ont été interrompues du 28 juillet à 12h00 au 29 juillet à 6h00.



Figure 1 – Implantation de la sonde TDR à Mormoiron

31 août 2005 :

Le capteur implanté à 6 m sur la canne 2 n'ayant jamais fonctionné correctement, il a été décidé de le débrancher afin de libérer une voie de mesure pour implanter un capteur étalon à 0,5 m de profondeur. Ce capteur étalon est resté sur le site jusqu'au 16 octobre 2005, mais les résultats obtenus se sont révélés inexploitable, aucune variation significative du signal de sortie n'ayant pu être enregistrée.



Figure 2 – Implantation du capteur Humitub étalon à Mormoiron

10 novembre 2005 :

Le 10 novembre 2005 a été implanté sur le site expérimental un panneau solaire destiné à s'affranchir des remplacements réguliers de batterie effectués par la mairie. L'implantation de ce panneau solaire s'est accompagnée de l'installation d'une nouvelle armoire électrique, qui contient désormais deux batteries d'alimentation (contre une seule initialement), directement alimentée en journée par le panneau solaire. Cette opération s'est révélée un succès, puisque aucune panne liée à l'alimentation du système n'a été déplorée depuis.



Figure 3 – Panneau solaire à proximité de l'armoire électrique principale et de la canne 2

16 novembre 2005 :

Ouverture d'une fosse pédologique (Fos3) à 0,9 m de profondeur afin de caractériser les horizons de surface pour affiner la modélisation, et sondages à la tarière manuelle (ST1 et ST2) à des profondeurs respectives de 1 m et 0,4 m.

01 février 2006 :

Ouverture d'une fosse (Fos4) à la pelle mécanique, à 1,85 m de profondeur, pour le prélèvement d'échantillons intacts (dont 2 caisses d'une centaine de kg chacune) et remaniés.

29 mars 2006 :

Certains dysfonctionnements observés sur la canne 1 (en particulier l'absence de mesures de température, le signal renvoyé étant constamment égal à 4 mA) ont été initialement imputés à une dégradation du multiplexeur associé. Il a donc été décidé de tenter un remplacement de ce multiplexeur pour remédier à ces problèmes. Le câblage de la canne 1 a donc été scrupuleusement noté et étiqueté, puis le multiplexeur a été remplacé. Les mesures effectuées ensuite ont montré des signaux différents de 4 mA sur les voies de température, mais une perte des mesures sur les voies d'humidité associées (1,5 m, 5 m, 7 m), où le signal obtenu traduisait plutôt une saturation des capteurs. Il faut cependant noter que toutes ces observations reflètent en réalité un problème qui n'a été clairement identifié que par la suite (voir intervention du 31 mai 2007).

5 avril 2006 :

Suite à la perte des mesures sur les voies d'humidité, un nouveau remplacement du multiplexeur de la canne 1 a eu lieu le 5 avril 2006. Ce remplacement s'étant soldé par un échec (plus aucune mesure valide sur la canne 1), les deux multiplexeurs précédemment montés ont été remis en place, sans plus de succès (impossibilité d'obtenir la moindre mesure sur la canne 1). Il apparaît donc que le montage de multiplexeur a provoqué une dégradation d'un autre composant du système.

Cette intervention a également été l'occasion d'ouvrir une nouvelle fenêtre d'interrogation sur l'IrisCom (système GSM) afin de faciliter le suivi de la station et les éventuels repérages de dysfonctionnements. La dessiccation du sol a également permis l'observation de nombreuses fentes de retrait autour des cannes, cependant plus réduites à proximité immédiate des cannes, où l'épaisseur d'argile est moindre, puisque le scellement de la tête de canne n'est recouvert que d'une dizaine de centimètres d'argiles.



Figure 4 – Figures de dessiccation autour de la tête de la canne 2

12 mai 2006 :

Afin d'identifier l'origine de la panne provoquée par l'intervention précédente, l'ensemble des capteurs d'humidité et de température de la canne 1 ont été testés en manuel : les capteurs sont alimentés directement par une batterie via une alimentation stabilisée à 24 V et un boîtier de connexion, et le résultat est lu en sortie par un multimètre 50 000 points. L'ensemble des capteurs semblait fonctionner par ce mode d'interrogation, ce qui montre que le multiplexeur ne les a pas détériorés. Le lancement d'une interrogation par l'Osiris a également permis de vérifier que le multiplexeur de la canne 1 était correctement alimenté (on retrouve la tension de la batterie en entrée du multiplexeur), mais que par contre l'alimentation ne fonctionnait pas au niveau des capteurs.

13 juin 2006 :

A l'occasion du prélèvement d'échantillons remaniés à proximité de la fosse Fos4 destinés au CERMES, dans le cadre du projet ARGIC, un nouveau remplacement du multiplexeur de la canne 1 a été tenté, sans plus de succès que précédemment.

Cette intervention a également donné lieu à plusieurs observations sur le site : la mairie a fait débroussailler la parcelle (initialement couverte de végétation arbustive) entre le 12 mai et le 13 juin. De plus, la dessiccation du sol est telle que les scellements des têtes de canne (réalisés le 4 juillet 2005) ne sont plus solidaires du sol, et l'on peut de nouveau voir bouger les cannes dans le forage.



Figure 5 – Vue panoramique de la parcelle instrumentée après débroussaillage

6 juillet 2006 :

Devant les échecs successifs dans le remplacement du multiplexeur de la canne 1 pour résoudre la panne apparue le 5 avril, il a été décidé de remplacer le multiplexeur de la canne 2, situé en amont de celui de la canne 1 (l'alimentation et les signaux de commande arrivent du multiplexeur de la canne 2 à celui de la canne 1). A cet effet, un multiplexeur neuf a été acheté, mais le remplacement du multiplexeur de la canne 2 n'a cependant pas pu être mené à son terme du fait de l'installation d'un nid de guêpes dans l'armoire électrique. Le nid a été détruit, et l'installation remise dans son état d'origine.

Lors de cette intervention, le scellement de la tête de la canne 1 a été dégagé et repris. Le creusement de l'argile autour du mortier s'est cependant révélé difficile, du fait de l'état de dessiccation de cette dernière.



Figure 6 – Dégagement et reprise du scellement de la tête de la canne 1

10 juillet 2006 :

Lors de cette intervention, le multiplexeur de la canne 2 a pu être remplacé. Le résultat s'est avéré concluant, puisque les acquisitions manuelles réalisées le jour même et les téléchargements des jours suivants montrent un retour à la situation d'origine (pas de mesure fiable sur les voies de température, et mesures sur les voies d'humidité). La panne se traduit donc par une absence de mesures sur la canne 1 entre le 5 avril 2006 et le 10 juillet 2006.

Le scellement de la tête de la canne 2 a été partiellement repris pour bloquer tout mouvement dans l'espace annulaire libéré par le retrait de l'argile. La présence de nouveaux nids de guêpes a été constatée sous le panneau solaire, d'une part, et dans l'armoire électrique de ce dernier d'autre part.

19 et 20 décembre 2006 et 9 janvier 2007 :

L'objet de ces interventions consistait en l'installation de 3 extensomètres destinés à mesurer les tassements verticaux à des profondeurs respectives de 0,2 m, de 0,5 m et de 1 m (projet ARGIC).

3 sondages ont été réalisés à 6 m à la tarière motorisée, avec pour l'un des prélèvements rapprochés (tous les 25 cm ou 50 cm), et pour les deux autres des prélèvements uniquement en surface.

Les trois extensomètres présentent chacun une course de 10 cm, et ils ont été initialement positionnés à mi-course, ce qui a conduit à l'ajout d'une cale de prolongement de 9 cm à l'extrémité de l'extensomètre implanté à 0,5 m, suite à un défaut d'installation.



Figure 7 - Capteur extensométrique installé à 0,5 m à Mormoiron équipé de sa cale de prolongement

Cette installation a occasionné un certain nombre de modifications dans les branchements des multiplexeurs : les extensomètres étant implantés à proximité de la canne 2, le multiplexeur à 8 voies associé devait être placé dans l'armoire principale. Ceci a nécessité de l'intercaler dans le circuit entre celui de la canne 2 (16 voies) et celui de la canne 1 (16 voies). Le multiplexeur de la canne 2 est donc désormais en amont de celui des extensomètres, lui-même en amont de celui de la canne 1. Ceci se traduit dans les réglages de l'Osiris par la présence d'une ligne fictive, les seuls multiplexeurs reconnus étant les multiplexeurs à 16 voies. On peut noter également que le capteur débranché pour le branchement de la sonde étalon le 31 août (humidité à 6 m de la canne 2) a été rebranché sur le nouveau multiplexeur, mais que les mesures obtenues traduisent une saturation durable, et sont donc identiques à celles obtenues avant sa déconnexion.



Figure 8 – Configuration des voies lors de l'installation des extensomètres



Figure 9 - Aperçu d'une partie du site (canne 2, armoire électrique principale, panneau solaire, pluviomètre, extensomètres)

31 mai 2007 :

L'observation des mesures obtenues sur la canne 1 a mis en évidence un certain nombre de problèmes : il s'avère que les mesures d'humidité réalisées à 1,5 m, 5 m et 7 m (c'est-à-dire sur les sondes Humitub équipés d'un capteur de température) correspondent en réalité à des mesures de température : on observe des courbes sinusoïdales de période annuelle, dont l'amplitude décroît avec la profondeur, tout en s'accompagnant d'un déphasage. La bonne adéquation de ces mesures avec les résultats issus de l'équation de la chaleur (propagation des températures dans le sol) a jeté un doute sur les paramètres mesurés, d'autant qu'entre le 29 mars et le 5 avril 2006, après le premier changement de multiplexeur de la canne 1, les mesures semblaient s'être inversées (la sinusoïde était mesurée sur les voies de température et des valeurs semblant correspondre à une saturation des capteurs Humitub étaient mesurées sur les voies de température). Afin de lever ce doute, une intervention à distance par GSM a eu lieu le 31 mai 2007. Il s'agissait de reconfigurer les différentes voies concernées afin d'identifier la nature du paramètre mesuré. L'identification reposait sur une observation effectuée précédemment sur le terrain, lors du contrôle manuel du bon fonctionnement des capteurs : l'interrogation d'un capteur Humitub sans respect du temps de préchauffage de 30 secondes conduit systématiquement à une mesure de 4 mA, alors que pour un capteur de température, la mesure est immédiatement valide. Il a donc suffi de reconfigurer les voies d'humidité en supprimant le temps de préchauffage pour s'assurer qu'il s'agissait bien en réalité de capteurs d'humidité, alors que l'ajout d'un temps de préchauffage sur les voies de température amène à des mesures a priori fiables d'humidité. La configuration des voies de mesures a donc été modifiée en conséquence. Cependant, l'origine de ce problème reste inconnue (probable erreur lors du montage de l'installation, bien que cela n'explique pas pourquoi le fonctionnement semblait correct entre le 29 mars et le 5 avril 2006, avec un autre multiplexeur), et il a donc été décidé de considérer l'ensemble des mesures de la canne 1 (à l'exception des mesures de températures enregistrées à 1,5 m, 5 m et 7 m sur les voies d'humidité) comme douteuses, les éventuelles interversions de capteurs lors du câblage restant impossible à mettre en évidence.

Annexe 2

Liste chronologique des interventions de maintenance réalisées sur le site du Deffend depuis l'installation

Dans ce paragraphe sont détaillées les interventions sur site directement liées à l'instrumentation, et celles ayant eu pour objet des prélèvements ou observations des sols.

28 novembre au 2 décembre 2005 :

Installation de l'instrumentation sur le site : 2 grappes de 11 cannes Humitub équipées chacune d'un capteur et 4 extensomètres implantés en forage. Ceci a nécessité 26 sondages à la tarière, à des profondeurs variant entre 0,7 et 7 m, numérotés de T5 à T30. 4 autres sondages de reconnaissance ont été réalisés à la tarière (T1 en prairie, T2, T3 et T4 en forêt), ainsi que 2 sondages carottés à des profondeurs de l'ordre de 7 m (E1 en prairie et E2 en forêt). Les prélèvements issus de ces sondages carottés ont ensuite fait l'objet d'une étude détaillée de la part de laboratoires partenaires dans le cadre du projet ARGIC (LAEGO et Hydrasa).

6 et 7 septembre 2006 :

Afin de s'affranchir des interventions régulières nécessaires pour le remplacement de la batterie (effectuées depuis l'installation par le Service Géologique Régional Poitou-Charentes du BRGM), il a été décidé d'équiper l'installation d'un panneau solaire, comme sur le site de Mormoiron. Ce panneau solaire, issu des stocks du BRGM, permet depuis une autonomie relative de l'instrumentation, malgré un ensoleillement moindre par rapport au site du Vaucluse. Cette intervention a également été l'occasion de tester le capteur implanté en forêt à 0,5 m de profondeur, qui ne fournit plus de mesures depuis le 7 mai 2006. Les tests semblent indiquer une dégradation du capteur en question, bien qu'un dysfonctionnement du matériel de test ne puisse être totalement exclu. Ce capteur pourrait être enlevé lors d'une prochaine intervention afin de confirmer ce résultat. De plus, un géomètre est intervenu dans le cadre du projet ARGIC afin d'effectuer un lever topographique de l'installation. D'autres levés ultérieurs permettront de vérifier la cohérence des déplacements enregistrés par les extensomètres.



Figure 10 - Vue générale de l'armoire électrique principale et du panneau solaire sur le site du Deffend

28 novembre 2006 :

Ouverture d'une fosse pédologique de 1 m de profondeur afin d'améliorer la caractérisation des horizons de surface pour la modélisation.

30 novembre 2006 :

Suite aux blocages successifs des extensomètres implantés à 0,5 et 1 m de profondeur, une intervention a été effectuée par MINAUS S.A. (installateur du matériel de mesure) afin d'identifier et de résoudre le problème. Le démontage des extensomètres a montré un grippage au niveau de la tige coulissante en extension, lié en particulier à une importante humidité à l'intérieur des tubes (humidité résiduelle liée à l'air enfermé lors de l'installation, mais également infiltrations d'eau suite à l'écrasement des joints toriques lors du serrage de l'écrou de fermeture). Ce grippage a pu être compensé par le nettoyage de la tige, ce qui a permis un retour à des mesures fiables.

2 avril 2007 :

Afin de pallier les possibles grippages des extensomètres constatés lors de l'automne 2006, les extensomètres ont de nouveau été démontés et les ressorts de retour en extension ont été remplacés par des ressorts de raideur supérieure (complétés par des tronçons de ressorts d'origine, afin de pallier à un manque de longueur des nouveaux ressorts). Ces ressorts plus raides devraient permettre de maintenir une extension malgré l'éventuel dépôt de particules le long de la tige. Cette intervention a également été l'occasion d'installer à l'extrémité de chaque extensomètre une cale de rallonge d'environ 20 mm destinée à éviter d'atteindre la limite de course du capteur lors du gonflement hivernal, comme cela avait été le cas à 0,5 m entre le 21 février et le 27 mai 2006. Ces cales pourront si nécessaires être ôtées durant la phase de retrait pour éviter d'atteindre la limite en compression des capteurs.

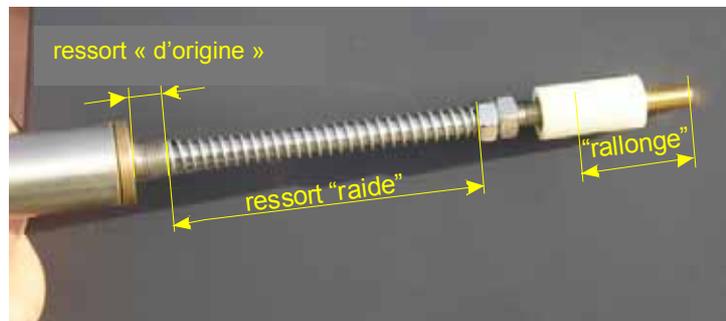


Figure 11 - Modification des extensomètres : ressort de raideur supérieure et ajout d'une cale de prolongement en extrémité



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemain
BP 6009

45 060 – 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

13 276 Marseille cedex 09
Tél. : 04 91 17 74 74