

Profils hydriques dans les sols argileux. Premiers résultats sur deux sites expérimentaux

M. VINCENT



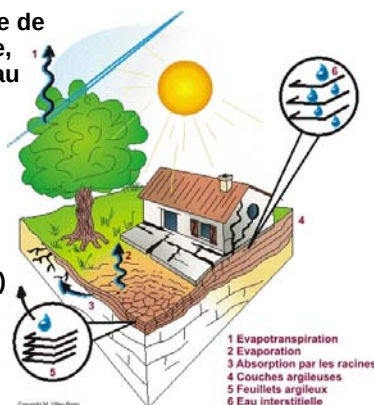
Service Aménagement et Risques Naturels

Journée CFGI-CFMS - 18 janvier 2007



Le retrait-gonflement des argiles : un phénomène géologique déclenché par les variations hydriques dans le sol

- > Mouvements de terrain différentiels provoqués par des variations de volume de certains minéraux de la phase argileuse, soumis à des variations de teneur en eau
- > L'assèchement d'un sol argileux provoque son retrait => fissuration (horizontale) et surtout tassement (vertical), souvent non uniforme (sol hétérogène, zones imperméabilisées, arbres) => mouvement différentiel
- > L'évaporation (température, soleil, vent) affecte une tranche de sol très superficielle (1 à 2 m) alors que les racines d'arbres assèchent le sol sur plusieurs mètres de profondeur et de manière localisée



Service Aménagement et Risques Naturels

Journée CFGI-CFMS - 18 janvier 2007

Mieux comprendre les mécanismes de déclenchement du retrait-gonflement : un enjeu pour la collectivité



> Des mécanismes complexes à quantifier

Mise en évidence du phénomène déjà ancienne (Skempton, 1954 ; Philipponnat, 1976) => facteurs de déclenchement bien identifiés, mais l'enchaînement entre conditions climatiques et apparition de désordres reste complexe à quantifier

> Un risque naturel coûteux et à forts enjeux

Indemnisation actuelle via le régime des catastrophes naturelles (2^{ème} poste ; 7300 communes reconnues dans 90 départements) => besoin d'un critère de reconnaissance objectif et explicite

7500 communes françaises ont déclaré des sinistres en 2003 alors que le critère de reconnaissance 2000 n'était pas respecté => mise en évidence des limites du modèle de réserve hydrique : sous-estime l'influence des racines d'arbres, ne prend pas en compte les effets cumulatifs et les effets retards, n'intègre pas les variations régionales (régime climatique et nature des sols)

Forte attente des pouvoirs publics sur ce dossier car enjeu financier important ; de nouveaux sinistres déclarés en 2004, 2005 et 2006 à traiter...



Service Aménagement et Risques Naturels

Journée CFGI-CFMS - 18 janvier 2007

Implications du BRGM dans ces activités de recherche

> Étude expérimentale confiée par le MEDD (depuis juillet 2004)

- Demande du MEDD (SDPRN) fin 2003 pour mieux comprendre les mécanismes de déclenchement du phénomène et identifier des critères pertinents
- Objectif : évaluer, à partir de mesures expérimentales sur sites, la profondeur affectée par la dessiccation et établir des corrélations entre conditions météorologiques et teneurs en eau dans le sol (modèle)

> Programme RGPU-RGA (coordination BRGM, oct. 2004 à nov. 2006)

- Programme réalisé sur financement RGPU, en collaboration avec le LMSSMat, le LAEGO, le CSTB et CEBTP-Solen
- A notamment permis un complément d'instrumentation sur un site ainsi que la caractérisation des matériaux sur les 2 sites expérimentaux

> Programme ARGIC (coordination BRGM, fév. 2006 à fév. 2009)

- Programme réalisé sur financement ANR-RGPU en collaboration avec 12 partenaires (LCPC, INRA, MF, CdG, LMSSMat, CERMES, LAEGO, INERIS, HydrASA, CDGA, URG, Fondasol) => complément observation et équipement

> Thèse Sahar Hemmati (depuis oct. 2005)

- Collaboration avec le CERMES : modélisation des transferts hydriques dans les sols sujets au retrait-gonflement

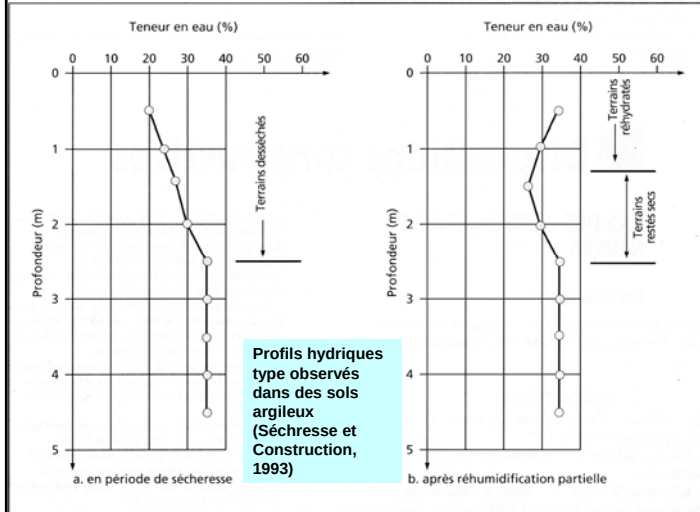


Service Aménagement et Risques Naturels

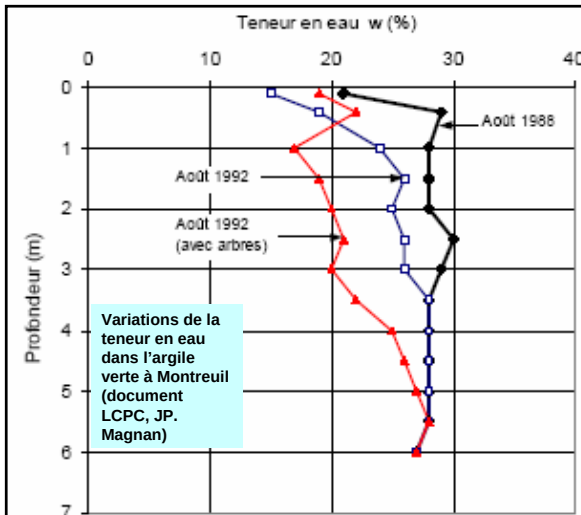
Journée CFGI-CFMS - 18 janvier 2007

Quelques éléments issus de la bibliographie : mesures hydriques in situ

Les variations saisonnières de teneurs en eau sont très diverses (selon lithologie, profondeur, végétation et conditions climatiques) mais peuvent atteindre 50 à 100 % en présence d'arbres (ex : $w = 15$ à 20 % en été et 30-35 % en hiver en surface)



Mise en évidence d'effets cumulatifs inter-annuels avec maintien en profondeur de zones durablement desséchées qui ne se réhumidifient pas en hiver

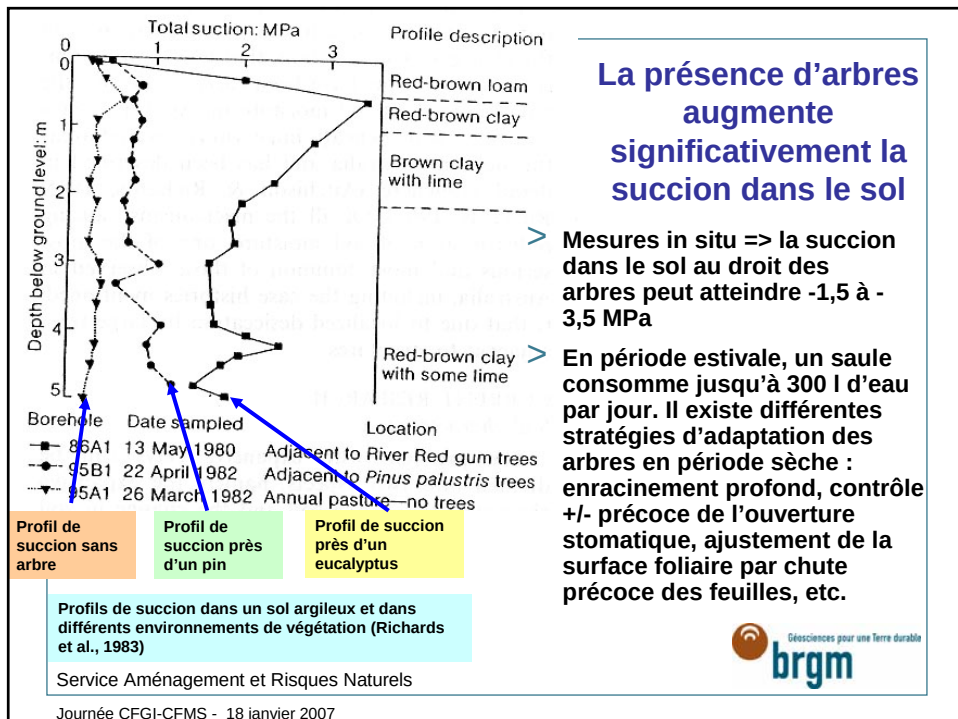
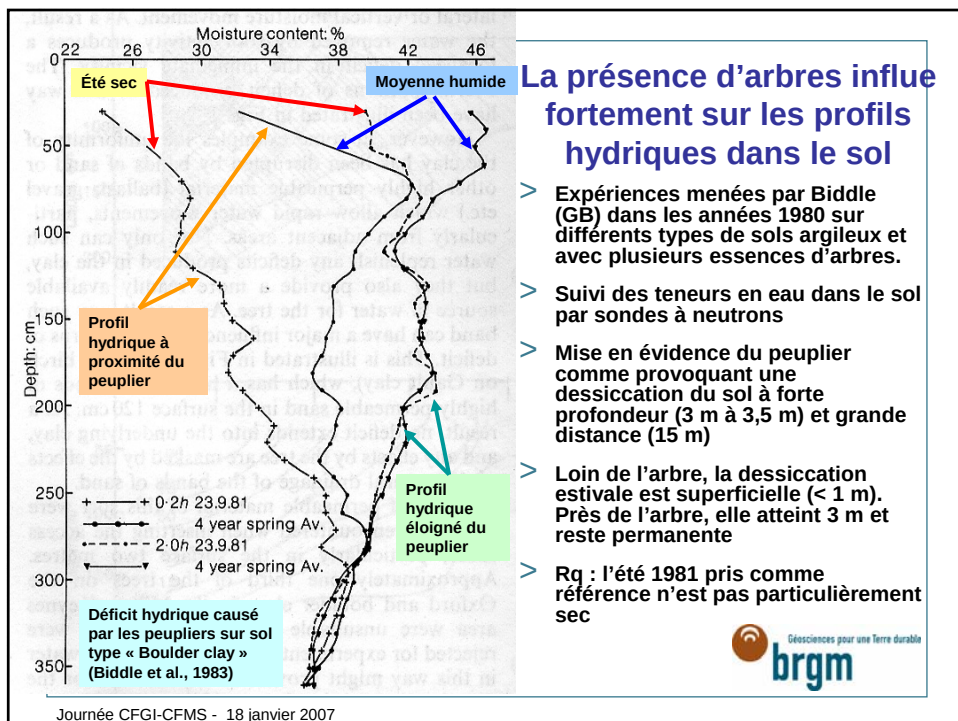


Le rôle aggravant de la végétation

- > La profondeur de dessiccation ne dépasse pas 1 m à 1,50 m sous végétation herbeuse mais atteint 2 à 8 m en présence d'arbres (2,5 à 4 m en moyenne)
- > L'influence des arbres (variations saisonnières de w) est sensible jusque vers 3 m de profondeur en période normale et 4 ou 5 m en période sèche.

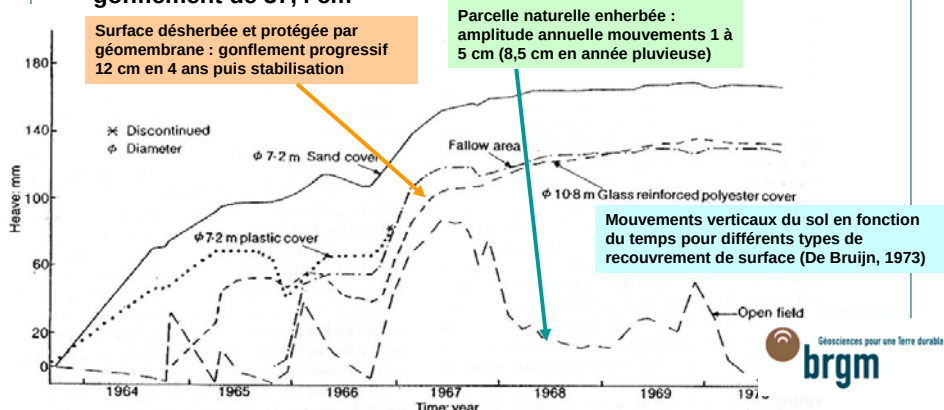
- > Le rayon d'influence des arbres varie selon les espèces et le sol : il atteint généralement 0,4 à 1 fois la hauteur de l'arbre mais 1 à 1,5 fois dans certains cas, en direction préférentielle des zones plus humides (sous les bâtiments)





La végétation influe directement sur les mouvements observés au niveau du sol

- > Les mouvements verticaux annuels du sol en présence d'arbres et en climat tempéré sont fréquemment de l'ordre de 3 à 6 cm
- > En phase de dessiccation, le tassement moyen atteint 0,3 mm/jour
- > L'abattage d'arbres peut conduire à des soulèvements de l'ordre de 10 cm en quelques années. En Afrique du Sud, on a observé un gonflement de 37,4 cm

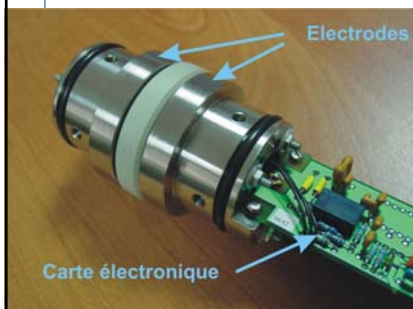


Méthodes de suivi des teneurs en eau

> Revue des systèmes de mesure disponibles

- # Pesée après dessiccation : méthode destructive
- # Résistivité électrique : mesure indirecte, sensible à la texture du sol
- # Sonde à neutrons : fiable mais contraintes d'utilisation (radioactivité)
- # Gammamétrie en sondage : fiable mais pas d'acquisition automatisable
- # Sondes TDR : fréquence 1 à 3 GHz, peu dépendant de la texture et de la salinité, automatisation possible mais mise en place en forage délicate
- # Sondes capacitives : développé par l'INRA (suivi de la constante diélectrique du sol), adapté par le BRGM en 1994 (Humilog) pour une mise en œuvre en forage avec possibilité de mettre en œuvre plusieurs capteurs sur la même canne (Humitub).

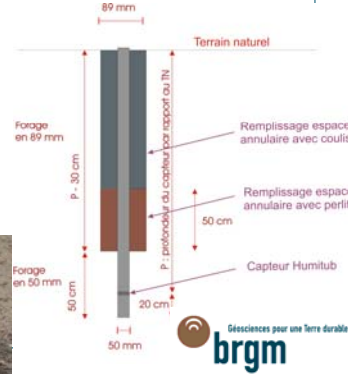
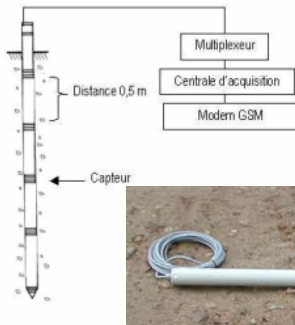
> Système Humitub



- # Capteur capacitif avec électrodes annulaires + mesure température. Sortie 4-20 mA
- # Capteur étalonné en labo dans des milieux de permittivité connue : azote (1), éthanol (25) et eau déminéralisée (80)
- # Étalonnage initial sur différents matériaux avec diamètre 40 mm, en cours d'étalonnage sur cuve avec diamètre adapté 50 mm

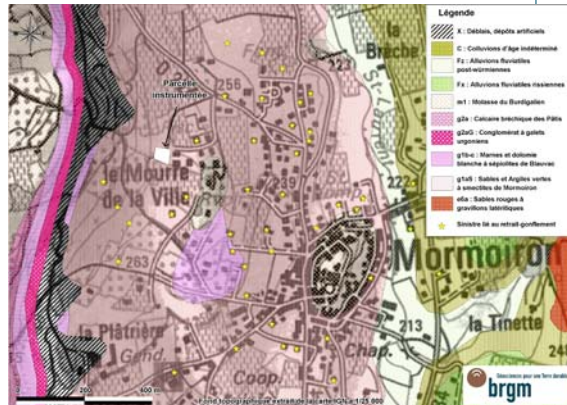
Mise en œuvre in situ

- **Appareillage Humitub** (développé par le BRGM, assemblé par MINAUS)
- Canne de mesure installée en forage, avec plusieurs capteurs positionnés à des profondeurs variables (Mormoiron) ou un seul capteur par sondage (Le Deffend) pour un meilleur contact capteur – terrain
- Acquisition à un pas de temps réglable (6 h à Mormoiron, 12 h au Deffend)
- Télétransmission des mesures (interrogation périodique par GSM)



Sélection du site de Mormoiron

- Choix de la commune selon critères géologiques et sinistralité RG : Argiles vertes à smectites de l'Éocène terminal avec passées silteuses
- Forte sinistralité : 63 sinistres recensés et route fissurée
- Beaucoup de difficultés à sélectionner une parcelle (1er sondage défavorable : grès)
- Convention passée avec la mairie pour mise à disposition d'une parcelle communale non constructible





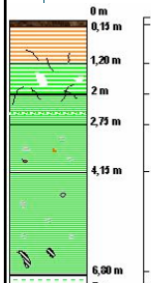
Observations in situ

> Nature lithologique des terrains

- Très mince épaisseur de terre végétale (10-15 cm)
- Argile marneuse au moins jusqu'à 7 m : faciès d'altération beige-grisâtre avec tâches de rouille et racines jusqu'à 1,20 m puis marnes verdâtres homogènes et plus plastique avec nodules calcaireux blancs
- Présence localisée de lentilles plus silteuses, d'épaisseur 10 à 20 cm. Venue d'eau temporaire observée en fév. 2006 à 1,80 m

> Caractérisation du matériau

- Granulométrie : 90 à 95 % < 80 μ m et 25 à 64 % < 2 μ m ; Vb = 7,1 à 12,9 ; CaCO₃ = 37 à 44 %
- 99 % interstratifiés illites-smectites avec 69 à 72 % de smectites
- Limites Atterberg : WI = 52 %, Wp = 23,3 % et Ip = 28,7 %



I	terre végétale à importante quantité de racines ;
II	argiles d'altération beige avec présence de racines ;
III	argiles vertes à beige très plastique avec tâches blanches d'origine carbonatée. Des racines sont bien visibles jusqu'à 2 m ;
IV	argiles vertes plastiques homogènes avec petites intercalations silteuses à 2,40 m et légèrement gréseuses de 2,55 à 2,75 m ;
V	argiles vertes compactes, compacte à petits nodules de calcaire, peu silteux à 3,75 m avec traces d'oxydation vers 3,70 m ;
VI	argiles vertes compactes à petits nodules de calcaire avec petits morceaux de gypse ;
VII	marnes vertes blanchâtres très compactées.



brgm

Log géologique du sondage réalisé.

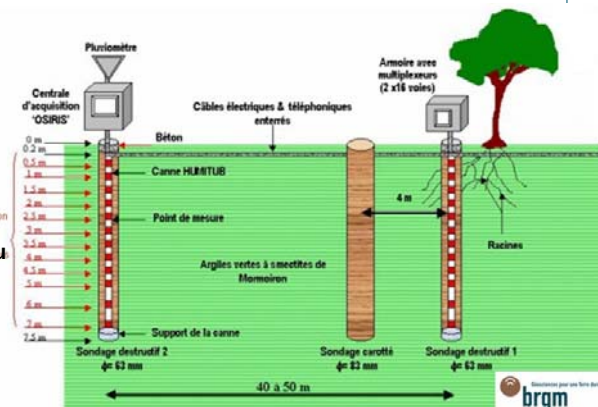
Instrumentation du site de Mormoiron

- > Installation en déc. 2004 => 2 ans de mesures
- > 2 cannes : la première au pied d'un arbuste (Orme), la seconde en « prairie », parcelle broussaillieuse défrichée en juin 2006
- > 12 capteurs capacitifs (Humitub) par canne à différentes profondeurs jusqu'à 7 m dans marnes
- > Un pluviomètre sur site depuis déc. 2004 + station MF Carpentras (9 km)
- > Alimentation par panneau solaire et télétransmission par GSM des données
- > Caractérisation du matériau en labo par le LMSSMat (plusieurs prélèvements intacts en fosses)



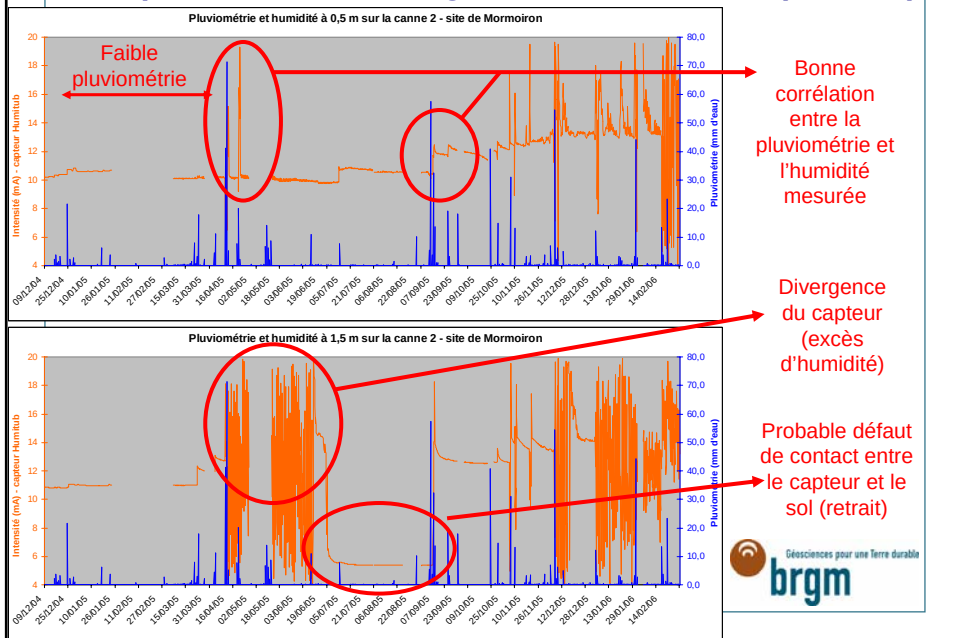
Service Aménagement et Risque

Journée CFGI-CFMS - 18 janvier 200



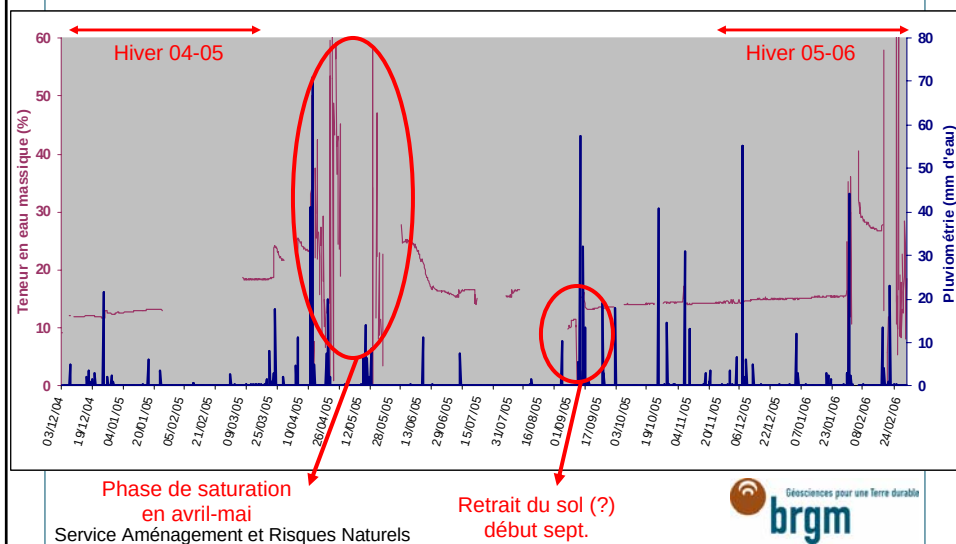
brgm

Exemple de courbes enregistrées à Mormoiron (canne 2)



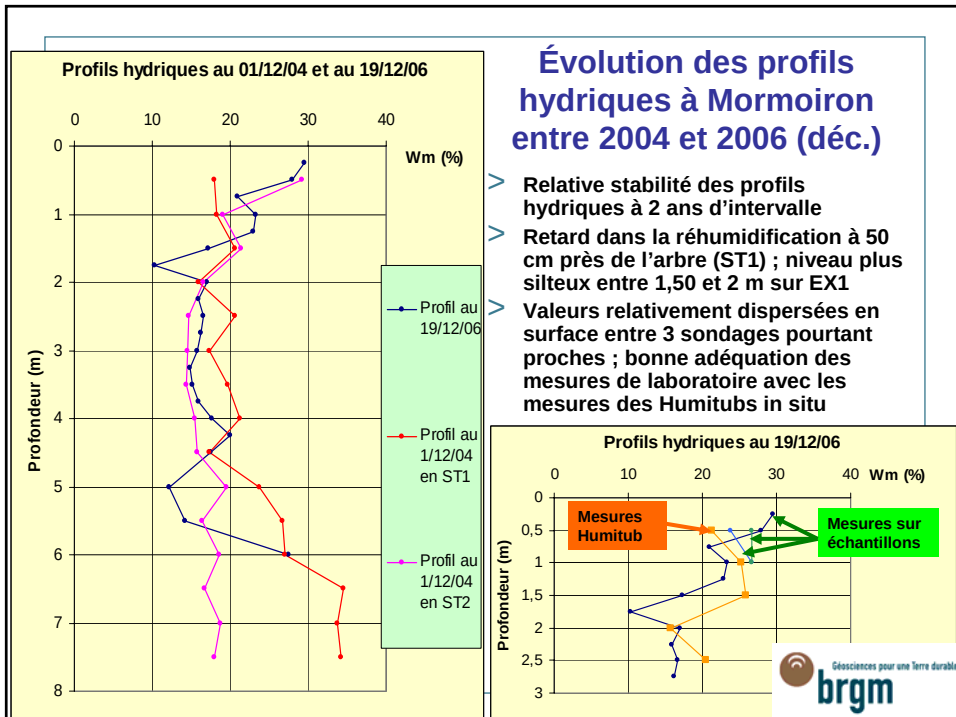
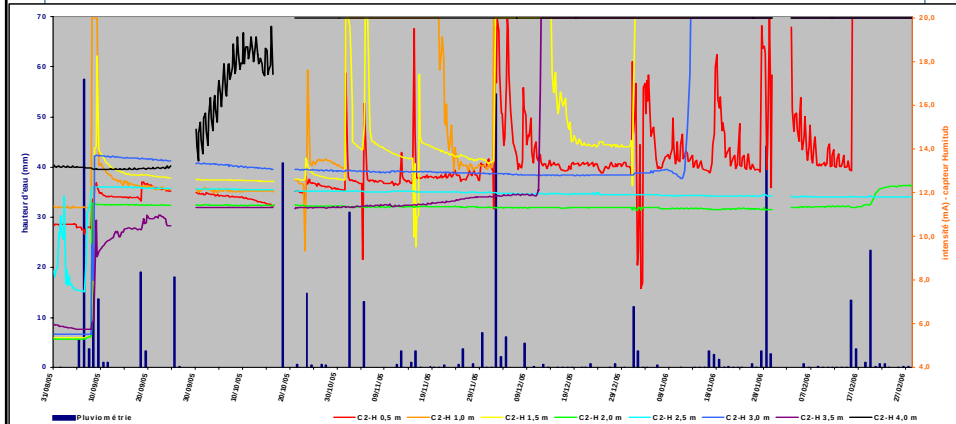
Exemple de courbes enregistrées à Mormoiron (canne 1)

La réhumidification début 2005 (avril) a été beaucoup plus tardive qu'en 2006 (saturation à partir de février)



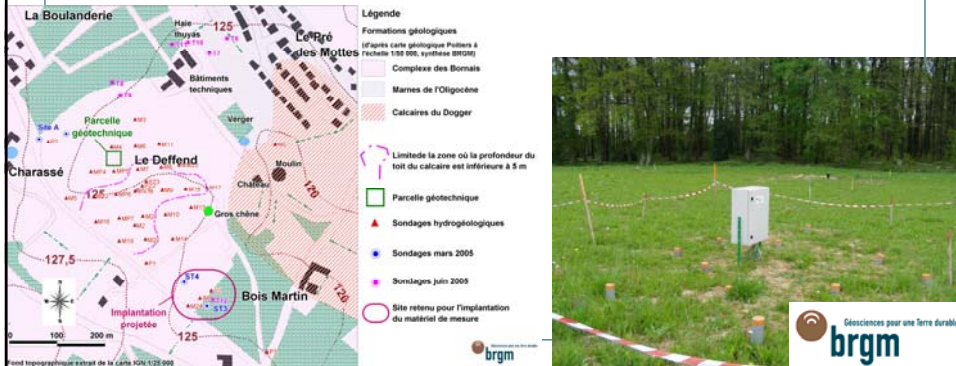
Suivi des teneurs en eau à différentes profondeurs (canne 2 ; sep. 2005 à fév. 2006)

- Fortes précipitations en sept. 05 => saturation passagère des capteurs de surface et effet visible jusqu'à 2,50 m (écoulements préférentiels)
- Les capteurs de surface réagissent rapidement aux précipitations et seaturent progressivement pendant l'hiver
- Un front de saturation déconnecté des épisodes pluvieux semble se propager vers le haut depuis les horizons plus silteux à 4,50 m



Site expérimental du Deffend (86)

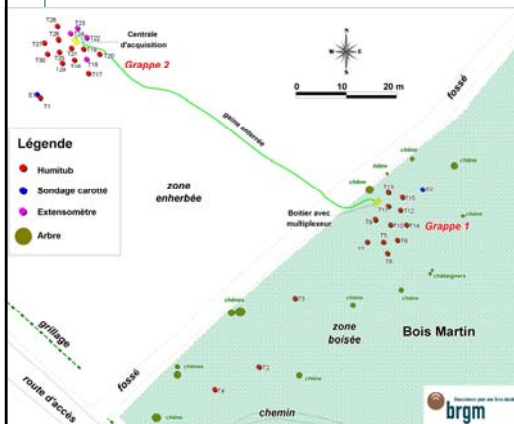
- > Localisation géographique : lieu-dit Le Deffend, commune de Mignaloux-Beauvoir à 4 km au sud-est de Poitiers (86) - 600 sinistres en 2003 sur la CAP
- > Site public (géré par l'Université de Poitiers - siège de plusieurs programmes expérimentaux), clôturé et gardé – convention signée avec l'université
- > Contexte géologique connu par de multiples sondages antérieurs : recouvrement tertiaire (formations détritiques argilo-sableuses hétérogènes) sur substratum calcaire du Dogger avec surface d'altération irrégulière
- > Occupation de surface variée avec zones boisées et prairies
- > Climat océanique à semi-continentale – station météo sur le site + MF à 8 km



Mise en place

> Déroulement de l'installation

- Installation effectuée début décembre 2005 avec appui logistique de Solen-CEBTP (cadre RGPU)
- Teneurs en eau échantillons remaniés mesurées par HydrASA et échantillons intacts carottés transmis au LAEGO



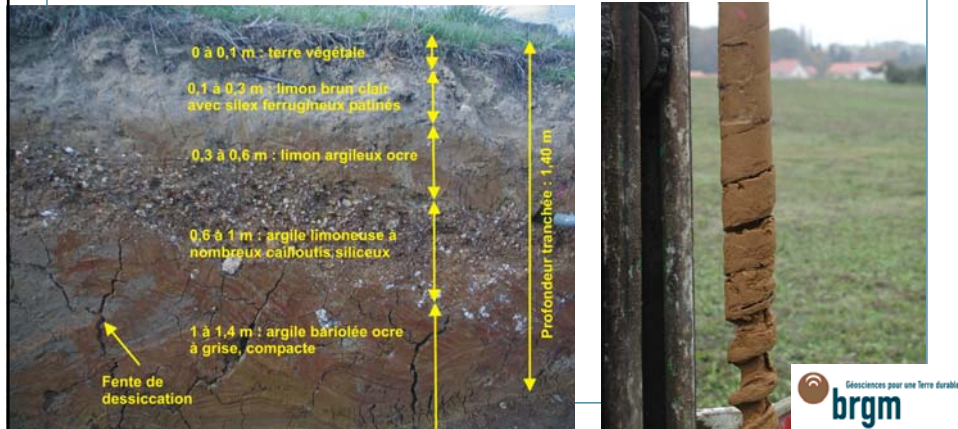
> Matériel installé

- Mise en place de 22 sondes Humitub en 2 grappes espacées de 40 m (zone boisée et prairie) à des profondeurs comprises entre 0,5 m et 7 m, avec 1 capteur par forage
- Acquisition 4 mesures / jour, transmises par GSM
- Alimentation par batterie puis par panneau solaire

Observations in situ

> Grande hétérogénéité des terrains en sondage

- Formations détritiques tertiaires très hétérogènes (localement argiles à cailloutis de silex et poches de sable) à dominante argilo-sableuses
- Sables limoneux ocres, assez secs, jusque vers 1,10 à 1,40 m, puis argile beige à ocre, localement silteuse, de plus en plus humide et plastique à partir de 3 m
- Toit du calcaire rencontré entre 6,10 et 7,10 m
- Variations locales de faciès très nombreuses et brutales (cf poche localisée de sable blanc et blocs de calcaire siliceux)



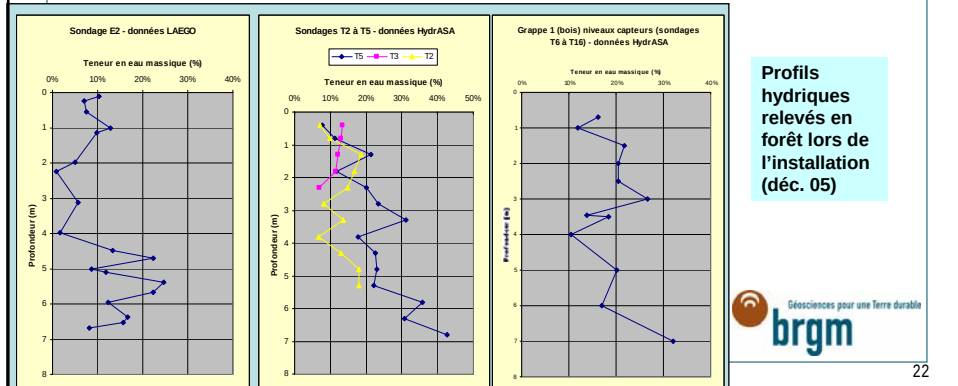
État hydrique du sol

> Grande hétérogénéité des profils hydriques

- Mesures des teneurs en eau massiques sur échantillons remaniés (tarière) et intacts (carottes) mais dessiccation possible des carottes
- Profils irréguliers car lithologie très hétérogène
- En prairie, réhumidification en tête sur 33-40 cm mais ensuite limons très secs jusqu'à 1,20 m

> Terrains très secs dans la zone boisée

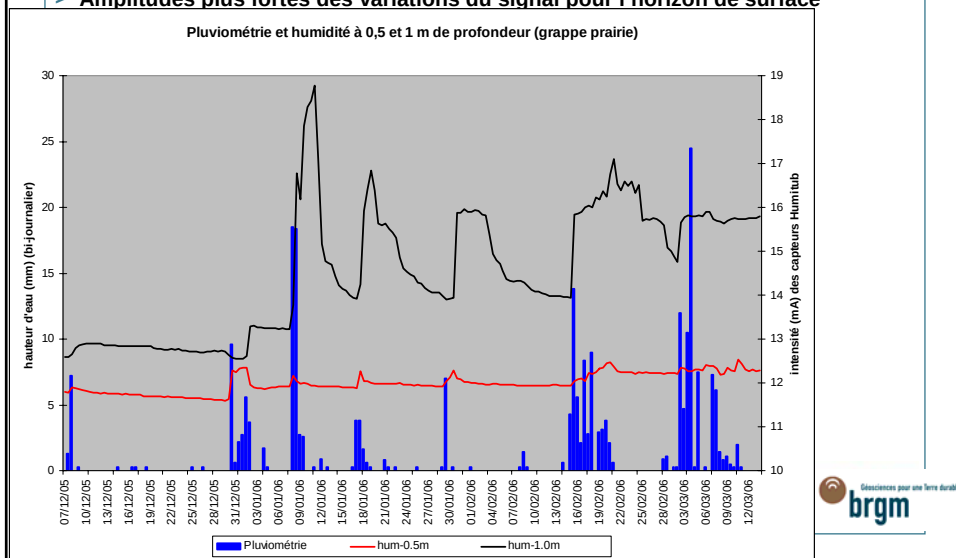
Faibles teneurs en eau in situ jusqu'à 2,50 m voire 4 m, sans réhumidification en tête



Profils hydriques relevés en forêt lors de l'installation (déc. 05)

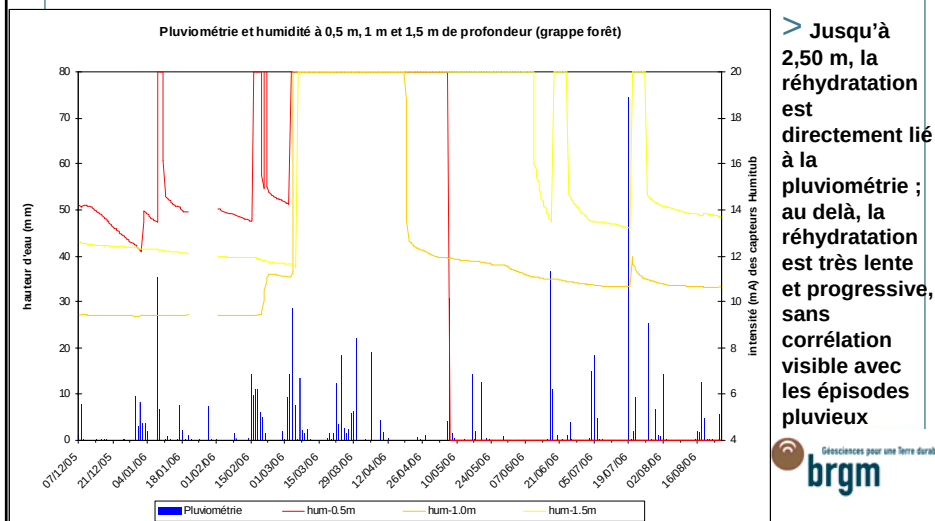
Données brutes des capteurs (grappe prairie)

- Saturation quasi-permanente de la plupart des capteurs situés en profondeur
- Réaction rapide des capteurs superficiels aux épisodes pluvieux
- Amplitudes plus fortes des variations du signal pour l'horizon de surface



Données brutes des capteurs (grappe forêt)

- Réaction rapide des capteurs superficiels aux épisodes pluvieux
- Période de saturation quasi permanente en surface à partir du 15 mars 2006
- Amorce de déshydratation visible à partir de début juillet



Suivi des déplacements verticaux en forage (site expérimental de Poitiers - projet RGPU-RGA)

> Extensomètres en forage :

- Scellement au coulis en fond de forage à 7 m de profondeur (référence fixe)
- Capteur permettant théoriquement de mesurer un tassement de 40 mm et un soulèvement de 10 mm par rapport à la position initiale
- Point de mesure placé à 0,10 m, 0,50 m, 1 m et 1,50 m par rapport au terrain naturel, en secteur non boisé

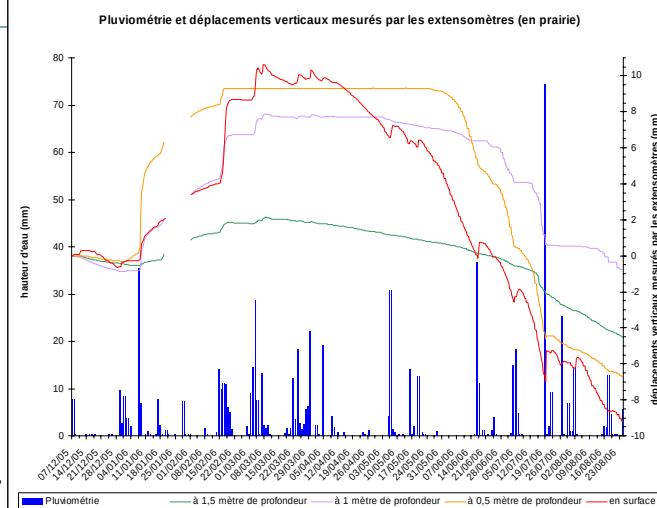
> Contrôle par nivellement périodique en surface (prévu)



25

Déplacements verticaux site du Deffend

- > Bonne corrélation entre les déplacements et les précipitations
- > Amplitude estimée des déplacements en surface : 1 cm de gonflement en 2 mois et 2 cm de retrait en 6 mois
- > À 1,5 m de profondeur, on mesure encore des déplacements de 0,7 cm d'amplitude par an
- > Vitesses maximales atteintes en surface (estimées sur des pas de temps de 6 h) : 1,2 mm/jour en retrait et 3,8 mm/jour en gonflement



Une amorce de modélisation des variations hydriques dans les sols argileux

- > Les variations des teneurs en eau dans les sols argileux ne sont que partiellement reliées aux précipitations et sont fonction de l'évaporation du sol, de la transpiration des plantes ou des arbres, de l'état hydrique initial des sols, du ruissellement, etc.
- > Une étude paramétrique d'un système aussi complexe suppose l'utilisation d'un modèle qui intègre les mécanismes de transferts de l'eau et ceux de la croissance des plantes et des arbres
- > Le modèle MACRO prend en compte les écoulements préférentiels qui caractérisent les sols argileux (existence d'une macroporosité, liée à la vie organique et aux fissures de retrait) et intègre le développement végétatif
- > Ce modèle (1D) a été validé depuis 15 ans sur de nombreux sites sous différents climats et couverts végétaux (infiltration pesticides)
- > Mise en œuvre sur les sites expérimentaux à partir de données Météo-France (P et ETP) depuis 1949 (Poitiers) ou 1964 (Mormoiron) + caractérisation pédologique + prise en compte de divers couverts végétaux (données FOCUS)

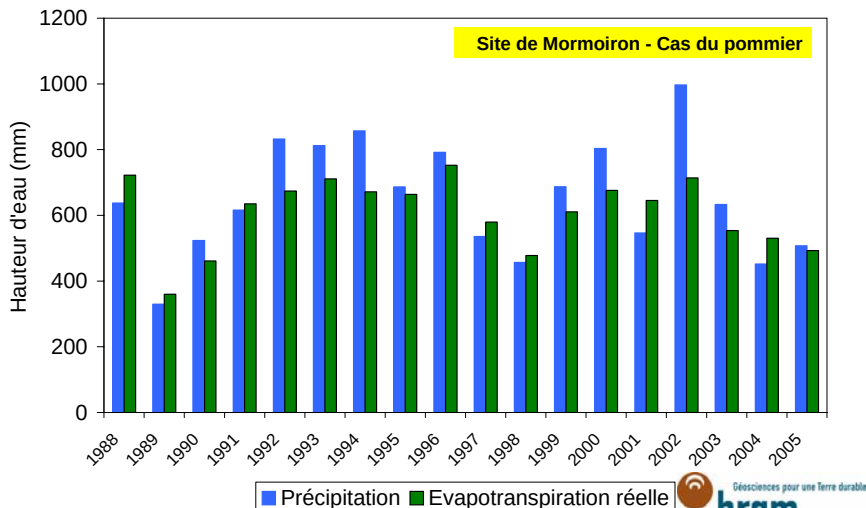


Service Aménagement et Risques Naturels

Journée CFGI-CFMS - 18 janvier 2007

Les sorties de MACRO

- > Établissement de bilans d'eau : pluies, ETP, ETR, recharge

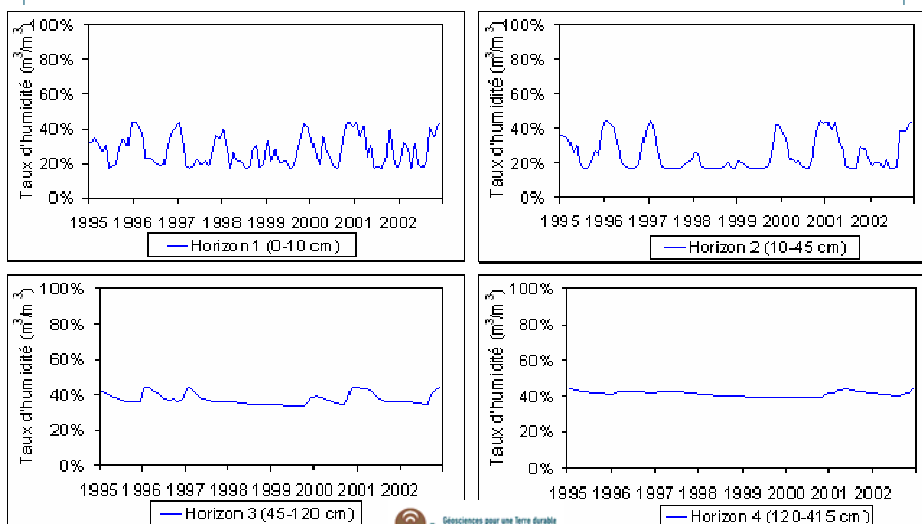


Service Aménagement et Risques Naturels

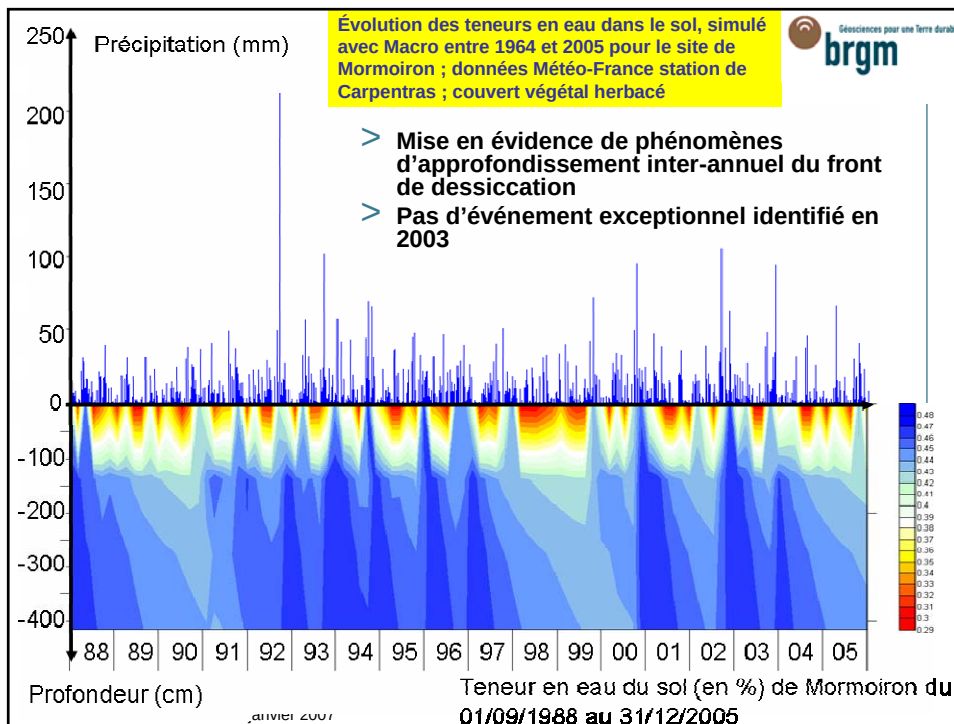
Journée CFGI-CFMS - 18 janvier 2007

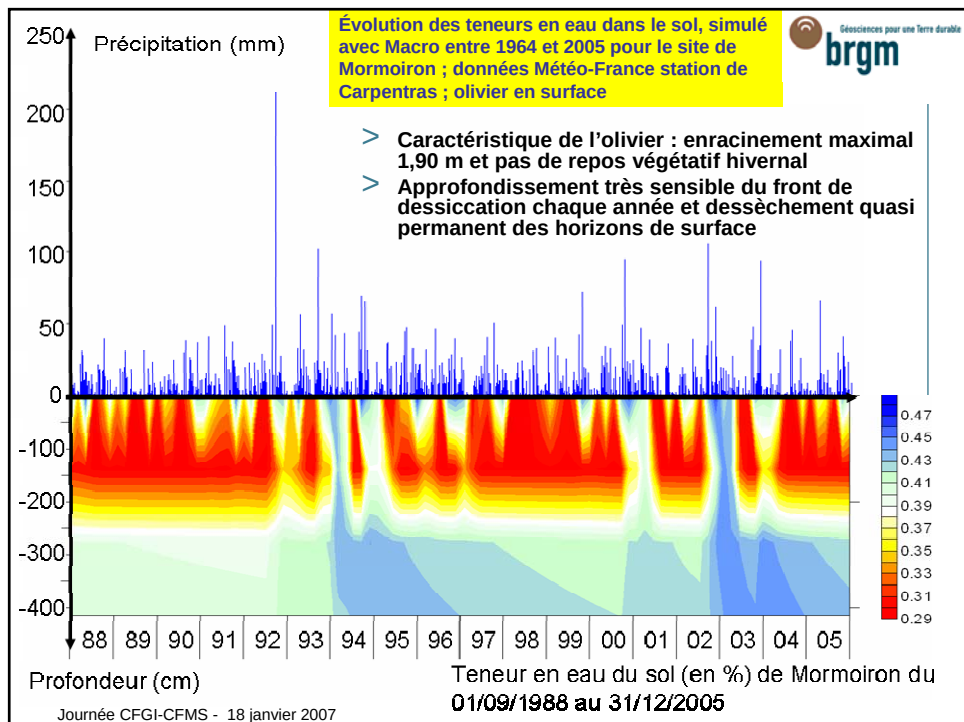
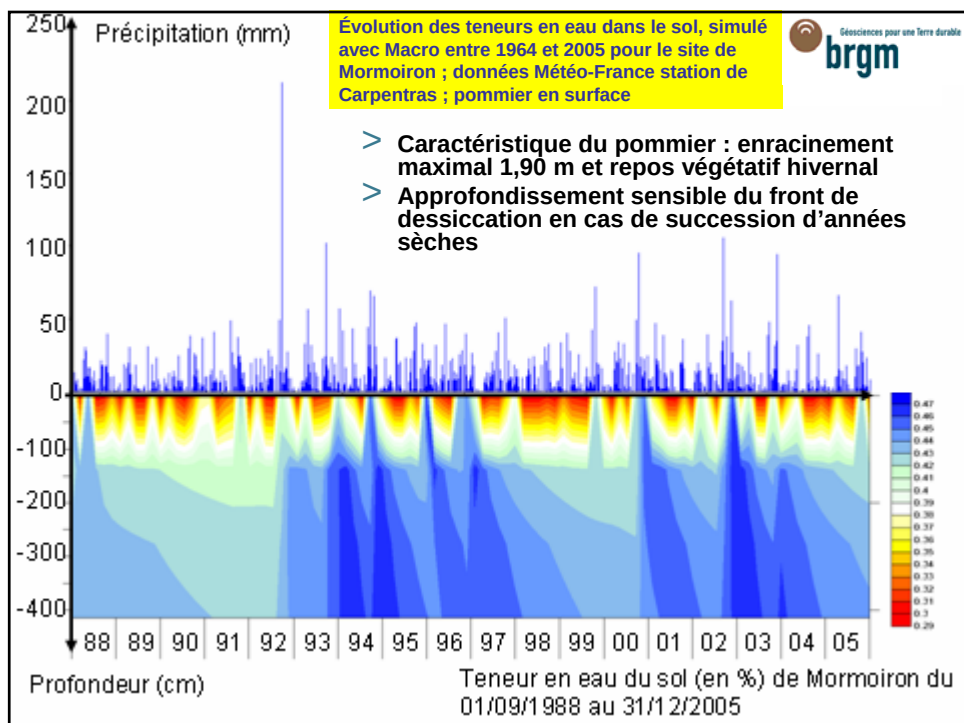
Les sorties de MACRO

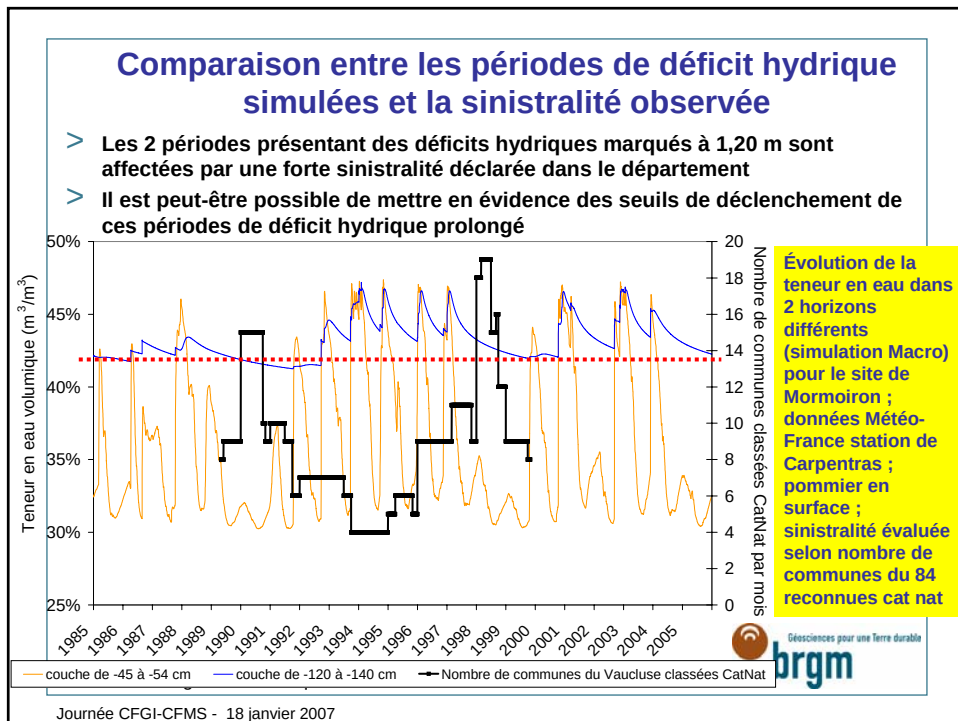
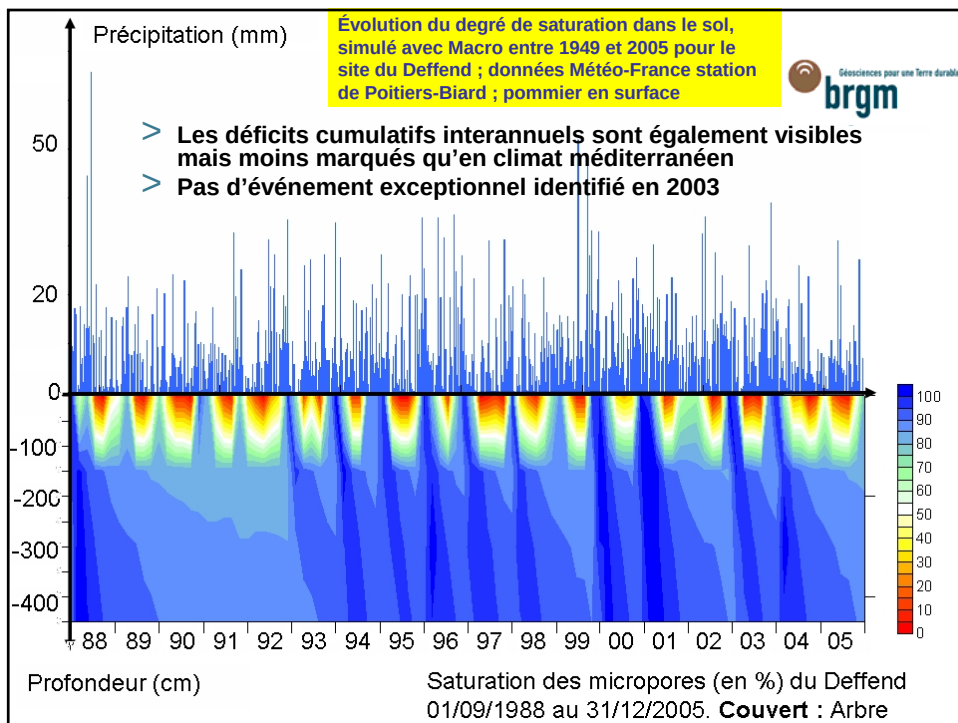
> Évolution des teneurs en eau dans les différents horizons



Journée CFGI-CFMS - 18 janvier 2007







Perspectives actuelles

> Des premiers résultats encourageants malgré des difficultés

- # Les instrumentations in situ fonctionnent malgré difficultés pour le choix des sites et permettent une acquisition continue malgré problèmes de maintenance
- # Les mesures de déformation sont cohérentes => étendues à Mormoiron
- # Problème technique d'étalonnage des capteurs Humitub et de saturation pour les sols très humides => en cours d'étude en laboratoire sur capteur étalon
- # L'outil Macro paraît bien adapté pour rendre compte des transferts hydriques dans les sols argileux sous différents couverts végétaux

> Les points qui restent à approfondir

- # L'acquisition des mesures in situ doit être poursuivie sur plusieurs années et étendue à d'autres configurations (climat, sol, végétation)
- # Les techniques de suivi des teneurs en eau in situ doivent être améliorées (développement capteurs + comparaisons entre différentes techniques)
- # Les bilans hydriques demandent à être précisés (meilleure calibration des courbes de rétention et du rôle des racines d'arbres, prise en compte du ruissellement, etc.)
- # Le travail de modélisation doit être prolongé par des analyses en 2 D et des études de paramétrage pour en extrapoler les résultats, évaluer l'impact de mesures préventives et proposer des critères de reconnaissance cat nat



Service Aménagement et Risques Naturels

Journée CFGI-CFMS - 18 janvier 2007