

# TRAVAIL DE DIPLÔME: *DÉTERMINATION D'UN MODÈLE D'HUMIDITÉ DU SOL POUR LE MIL*

Sciences et Ingénierie de l'Environnement

30 Juillet 2010



LUCILE VERROT

M. PARLANGE, PROFESSEUR ENCADRANT EPFL  
A. REPETTI, SUPERVISEUR EPFL

LAUSANNE, 2010





## **Résumé**

Plus que partout ailleurs dans le monde, l'agriculture est un enjeu vital en Afrique de l'Ouest. Elle fait travailler et nourrit une grande partie de la population.

Mais les récoltes sont dépendantes d'un climat très variable, et le manque de données et de moyen est un frein au développement de l'agriculture. En proposant des outils d'information simples, sur la base des réseaux de capteurs sans fil pour les populations rurales et les organismes locaux, on peut contribuer à améliorer ce secteur. C'est dans cette optique que la prévision de l'état de santé du mil, principale culture vivrière, pourrait permettre une appropriation de l'environnement, une meilleure connaissance et donc aiderait à la décision.

Pour modéliser l'état de santé du mil, il faut avant tout pouvoir modéliser l'évolution de l'humidité du sol. C'est ici l'objectif de ce travail, effectué sur la base de mesures directes dans des champs de mil au village de Tambarga, Burkina Faso. A long terme, et en apportant des installations complémentaires (petite retenue d'eau), les populations locales devraient pouvoir décider d'apporter de l'eau à leurs cultures, afin d'assurer leur récolte malgré des périodes de sécheresse, tout en gérant de façon durable les ressources naturelles.

## **Abstract**

More than anywhere else in the world, agriculture is fundamental to the livelihood of West Africa. However harvests are highly dependent on the variable climate, specifically the rainfall, and data shortages slow agricultural development. By proposing simple tools to inform the rural populations and the local authorities using a wireless sensor network, we can improve agricultural adaptation to the climate variability. The prediction of the performance of millet, the main food crop, would allow an adaptation to the environmental challenges and thus improve the decisions that determine crop success.

To model the performance of millet, it is necessary to first model the evolution of the soil humidity. This is the specific objective of this work, based on direct measures in the millet fields of the village of Tambarga, Burkina Faso. In the future, with additional installations such as small water restraints, the local population will be able to use the results of this work to help decide to irrigate their crop, and thus assure successful harvests despite droughts and rainfall uncertainty, while managing their natural resources sustainably.



## Table des matières

I.	Introduction.....	7
A.	Contexte global de la culture vivrière en zone soudano sahélienne.....	7
B.	Présentation du mil et de ses particularités .....	8
1.	Adaptations aux climats tropicaux .....	8
2.	Problématique du semis et Vulnérabilité du rendement au stade de la floraison 8	
C.	Zone d'étude.....	9
II.	Eco-hydrologie et Bilan hydrique.....	11
A.	Equation du bilan hydrique .....	12
B.	Infiltration dans le sol pendant un évènement pluvieux.....	13
C.	Assèchement du sol.....	14
III.	Objectifs.....	19
IV.	Problématique .....	21
A.	Estimation de l'humidité du sol .....	21
B.	Fonctionnement du modèle mathématique .....	21
V.	Mesure des paramètres, Résultats.....	23
A.	Hypothèses, protocole, résultats et discussion pour chaque paramètre.....	23
1.	La zone racinaire $Z_r$ .....	24
2.	La pluie $R(t)$ .....	26
3.	Le ruissellement $Q[\theta(t),t]$ .....	28
4.	L'interception $I(t)$ .....	29
5.	Les valeurs remarquables du sol.....	35
6.	Pondération des valeurs remarquables du sol.....	37
7.	Les paramètres liés à l'évapotranspiration .....	39
B.	Mesures de l'humidité du sol aux stations 1160 et 1161 .....	42
1.	Humidité du sol à la station 1161 .....	43
2.	Humidité du sol à la station 1160 .....	56
3.	Observation générale sur le comportement des capteurs en surface lors d'une pluie 61	
C.	Données d'une autre station du bassin versant : la station 1007.....	63
1.	Choix de la station 1007 .....	63
2.	Humidité du sol à la station 1007 .....	66
D.	Discussion des résultats.....	100
E.	Proposition d'amélioration de la qualité et de la fiabilité des données.....	102

1.	Dans des conditions climatiques « standards » .....	102
2.	Sur le terrain d'étude, village de Tambarga .....	103
VI.	Perspectives d'exploitation des résultats pour l'information des communautés locales ou des organismes régionaux .....	105
A.	Obtenir un modèle prédictif de l'assèchement du sol avec les installations Sensorscope ?.....	105
B.	Quel type d'informations fournir aux populations locales ?.....	106
1.	Données brutes des stations Sensorscope .....	107
2.	Résultats d'un modèle appliqué aux données des stations .....	109
3.	Conseil sur la base d'un modèle .....	111
VII.	Conclusion .....	113
VIII.	Bibliographie .....	115

# **I. Introduction**

## **A. Contexte global de la culture vivrière en zone soudano sahéenne**

Au Burkina Faso, plus de 90% de la population dépend de l'agriculture (FAO, 2005). La culture vivrière est donc le centre des activités économiques et sociales. Pourtant le sol de la zone Soudano-sahéenne est globalement peu fertile (Dutartre et al, 1993). Le climat y est caractérisé par une saison des pluies de 3 à 4 mois, une pluviométrie moyenne annuelle de 600 à 900 mm avec des variations interannuelles entre 20 et 30 % (Nicholson, 1980).

Dans cette région semi-aride d'Afrique de l'Ouest, l'irrigation représente environ 1% des terres cultivées (FAO, 2005), il existe donc une très forte dépendance des rendements agricoles vis-à-vis de la quantité et de la répartition des pluies.

## B. Présentation du mil et de ses particularités

### 1. *Adaptations aux climats tropicaux*

Le mil (*Pennisetum glaucum* (L) R.Br.) est une céréale originaire de l'Afrique de l'Ouest, domestiquée il y a 40 000 ans environ. L'alimentation quotidienne de plus de 500 millions de personnes en Afrique et en Asie du Sud-Est dépend de cette culture. Sa grande résistance à la sécheresse en est sa principale caractéristique, et en fait une des cultures les plus répandues dans les régions sahélienne et soudano sahélienne. Dans les sols sableux de ces régions, le point de flétrissement permanent se situe aux alentours de 11% de contenu volumique en eau (Rodriguez-Iturbe and Porporato, 2004) si l'on tient compte de la définition liée aux forces de rétention de l'eau dans le sol, alors que rapporté particulièrement au mil, le point de flétrissement est bien plus bas, jusqu'à 6-7% (Bieler, 1992).

Outre la résistance particulière du mil à la sécheresse, on peut noter aussi sa forte tolérance aux températures élevées et aux sols sableux. En effet, il faut des températures extrêmes (> 45°C) pour brûler les semis ou les plants (Felch, 1982), et des rendements minimaux sont assurés sur les terres peu fertiles de la zone sahélienne (teneurs en matières organiques faibles et forte proportion de sables –Dutartre et al, 1993-).

### 2. *Problématique du semis et Vulnérabilité du rendement au stade de la floraison*

Deux périodes sont très critiques pour la culture du mil ; le semis et le stade de la floraison .

La date de semis est une décision de l'agriculteur et repose sur plusieurs principes : il faut que la saison des pluies soit correctement installée pour garantir d'une part une humidité initiale du sol suffisante et d'autre part pour avoir une certitude raisonnable de la continuité des pluies pour la croissance des plants.

Le risque de semer trop tôt est de perdre les semis par manque d'eau et donc de devoir semer à nouveau (perte économique). Semer trop tard fait courir le risque de ne pas pouvoir profiter de la saison des pluies, surtout aux moments où la plante est sensible à la sécheresse. Cependant, l'évolution génétique du mil depuis les débuts de sa culture autorise des dates de semis décalées d'une semaine, sans affecter le rendement (Clerget et al, 2007). Cette caractéristique, appelée photopériodisme, est liée à la capacité de ces plantes à caler leur croissance sur la durée des jours.

Les stades de la floraison et de la post floraison sont particulièrement sensibles (Bieler,1992). Pour cette raison, les déficits en eau en fin de saison sont une des principales craintes des agriculteurs. (Verrot, 2009).

### C. Zone d'étude

Les expériences ont été menées au début de la saison des pluies (31 mai-12 juillet) à proximité du village de Tambarga dans le bassin versant de la Singou, au sud est du Burkina Faso, dans la commune de Madjoari à 210 mètres d'altitude.

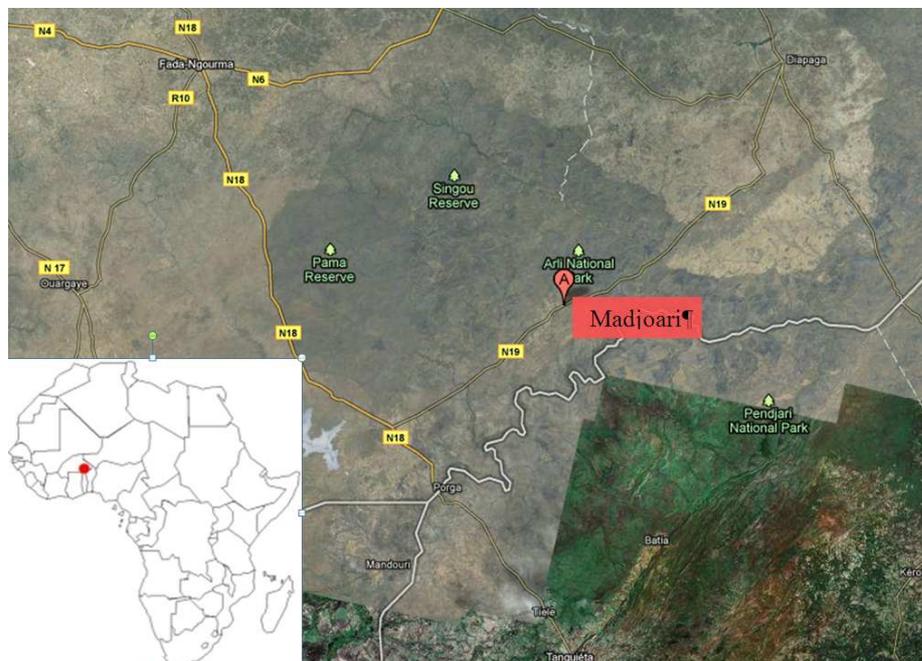


Figure 1 Localisation de la commune de Madjoari

Les cultures sont principalement vivrières (mil, maïs), mais plusieurs sont également cultivées à des fins commerciales (arachides, coton, riz).

La saison des pluies s'étend approximativement de mai à octobre, mais la période de culture dure de juin à septembre pour la plupart des cultures.

Dans le système cultural local, on distingue deux types principaux de champs : « les champs de village » et les « champs de brousse » (Bordes, 2010). Généralement, les agriculteurs sèment du mil à cycle court et des arachides dans les champs de village. Le mil à cycle court est utilisé pour la « soudure », c'est-à-dire pour palier à l'épuisement des récoltes de l'année précédente avant la récolte du mil des champs de brousse, principalement des variétés locales à cycle long, généralement plus photopériodiques .

A Tambarga, la variété utilisée, une espèce locale (« Niadi ») dans les champs de village, où sont déployés les instruments, a un cycle de 70 jours du semis jusqu' à la période de récolte.

La culture en association est très marginale dans les champs du village, ce qui permet une étude réellement axée sur le mil.

Outre le photopériodisme et la taille, les variétés à cycle court et celles à cycles long ont un comportement similaire, ce qui permet globalement une extrapolation des résultats obtenus aux plantations des champs de brousse qui constituent le stock pour l'année suivante. Ce sont de ces cultures en brousse que dépend principalement l'alimentation des villageois.



## **II. Eco-hydrologie et Bilan hydrique**

L'éco-hydrologie décrit les interactions existantes entre les différents compartiments du système lié à l'humidité du sol.

L'humidité du sol est le paramètre central du système, résultant des actions conjuguées du climat, de la végétation et du sol lui-même, et contrôlant spécifiquement la végétation.

La connaissance de cette variable est donc le point clé dans la modélisation de l'influence des pluies sur la végétation, particulièrement dans les zones arides.

## A. Equation du bilan hydrique

Pour un profil de sol donné, et en négligeant les effets topographiques, l'humidité du sol  $s(t)$  moyennée verticalement est exprimée selon l'équation donnée par Rodriguez-Iturbe et Porporato (2004) :

$$n Z_r \frac{d\theta(t)}{dt} = R(t) - I(t) - Q[\theta(t), t] - E[\theta(t)] - L[\theta(t)]$$

*Dans la version originale de l'équation,  $\theta$  est noté «  $s$  »*

*Les équations du modèle décrivent ici  $\theta$  comme l'humidité relative du sol*

*( $0 \leq \theta_{\text{modèle}} \leq 1$ ), alors que les appareils mesurent l'humidité volumétrique en %*

*( $0 \leq \theta_{\text{données}} \leq \text{porosité} * 100$ ). Dans la suite du travail,  $\theta_{\text{modèle}}$  a été converti en humidité volumétrique.*

$n$  étant la porosité du sol, moyennée sur la hauteur considérée

$Z_r$  est la profondeur racinaire, qui définit la hauteur de sol influençant les interactions.

L'apport en eau est décrit par la différence entre la pluie  $R(t)$ , et les pertes par ruissellement  $Q[\theta(t), t]$  et par interception de la végétation  $I(t)$ .

Les pertes depuis le stock dans le sol sont exprimées par l'évapotranspiration  $E[\theta(t)]$  et par le drainage en profondeur en dessous de la zone racinaire considérée  $L[\theta(t)]$ .

La dynamique d'humidification du sol et celle de son assèchement dépendent donc de processus différents.

La quantité d'eau qui peut s'infiltrer pendant une pluie dépend du type de sol, de la quantité d'eau et de l'intensité de l'évènement. Pour des pluies intenses, caractéristiques des régions arides et semi arides, l'influence de la couche superficielle est prépondérante.

L'eau infiltrée se répartit le long du profil pédologique en fonction des forces de succion et de la quantité d'eau déjà stockée.

Les pertes d'eau ont principalement lieu entre deux évènements pluvieux, surtout dans les régions sèches où les taux d'évapotranspiration sont globalement très élevés (les pertes par drainage profond peuvent devenir négligeables par rapport aux pertes par évapotranspiration).

L'évolution temporelle de l'humidité du sol en profondeur est un phénomène complexe qui nécessite des mesures et des modèles spécifiques. Dans le modèle proposé par l'écohydrologie, c'est l'humidité du sol moyennée qui est prise en compte. De plus, à une échelle temporelle journalière, la propagation du front d'humidité est négligeable (Rodriguez-Iturbe et Porporato, 2004). Il est donc possible de simplifier la dynamique de sol liée aux pluies en se focalisant sur la quantité d'eau stockée.

Cette simplification permet aussi de séparer distinctement les deux processus. En réalité, la couche superficielle et les couches profondes ne réagissent pas simultanément. Mais en proposant une approche basée sur le stock d'eau total sur une certaine profondeur avant et après un évènement pluvieux, on peut ne tenir compte que de l'évolution temporelle de la couche limitante.

## B. Infiltration dans le sol pendant un évènement pluvieux

Lors d'une pluie, l'eau atteignant le sol s'infiltré à une certaine vitesse jusqu'au point de saturation de la couche superficielle, considérée comme limitante. Au-delà du point de saturation, l'eau s'infiltré à mesure que le front de saturation avance. Le reste ruisselle à la surface sans s'infiltrer :

$$nZ_r \frac{d\theta(t)}{dt} = R(t) - I(t) - Q[\theta(t), t]$$

L'augmentation du stock d'eau dans le sol peut être obtenu par la différence entre le ruissellement  $Q[\theta(t), t]$  mesuré au cours d'une pluie et la quantité d'eau ayant atteint le sol  $R(t) - I(t)$ .

Les valeurs obtenues peuvent être comparées aux mesures d'humidité dans le sol. L'intégrale des valeurs d'humidité du sol mesurées sur la profondeur donne donc une mesure directe du stock d'eau selon la relation :

$$S = \int_{z_1}^{z_2} \theta \, d\theta$$

Avec

$S$ , le stock d'eau dans le sol

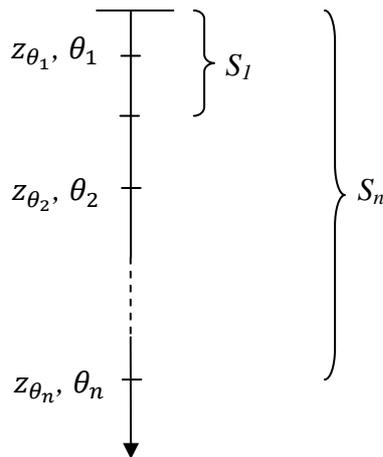
$z_1$  et  $z_2$  les profondeurs de sol considérées

$$S_n = \frac{1}{2}\theta_1(z_{\theta_1} + z_{\theta_2}) + \frac{1}{2}\theta_n(z_{\theta_{n-1}} + z_{\theta_n}) + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{1}{2}\theta_i(z_{\theta_{i+1}} - z_{\theta_{i-1}})$$

Avec

$S_n$ , le stock d'eau sur la profondeur  $n$

$\theta_i$ , l'humidité du sol à la profondeur  $z_i$ .



### C. Assèchement du sol

Rodriguez-Iturbe et Porporato (2004) ont décrit l'assèchement du sol moyenné sur la verticale à partir d'une humidité  $s_0 > s_{fc}$ :

$$\theta(t) = \begin{cases} \theta_0 - \frac{1}{\beta} \ln \left\{ \frac{[\eta - m + m e^{\beta(\theta_0 - \theta_{fc})}] e^{\beta(\eta - m)t} - m e^{\beta(\theta_0 - \theta_{fc})}}{\eta - m} \right\} & 0 \leq t < t_{\theta_{fc}} \quad (1) \\ \theta_{fc} - \eta(t - t_{\theta_{fc}}) & t_{\theta_{fc}} \leq t < t_{\theta^*} \quad (2) \\ \theta_w + (\theta^* - s_w) \left[ \frac{\eta}{\eta - \eta_w} e^{\frac{\eta - \eta_w}{\theta^* - s_w}(t - t_{\theta^*})} - \frac{\eta_w}{\eta - \eta_w} \right] & t_{\theta^*} \leq t < t_{\theta_w} \quad (3) \\ \theta_h + (\theta_w - \theta_h) e^{\frac{-\eta_w}{\theta_w - \theta_h}(t - t_{\theta_w})} & t_{\theta_w} \leq t < \infty \quad (4) \end{cases}$$

Les temps  $t_{\theta_{fc}}$ ,  $t_{\theta^*}$  et  $t_{\theta_w}$  sont décrits par :

$$t_{\theta_{fc}} = \frac{1}{\beta(m - \eta)} \left\{ \beta(\theta_{fc} - \theta_0) + \ln \left[ \frac{\eta - m + m e^{\beta(\theta_0 - \theta_{fc})}}{\eta} \right] \right\}$$

$$t_{\theta^*} = \frac{\theta_{fc} - \theta^*}{\eta} + t_{\theta_{fc}}$$

$$t_{\theta_w} = \frac{\theta^* - \theta_w}{\eta - \eta_w} \ln \left( \frac{\eta}{\eta_w} \right) + t_{\theta^*}$$

Les paramètres  $\eta_w$ ,  $\eta$ , et  $m$  sont définis comme suit :

$$\eta_w = \frac{E_w}{nZ_r}$$

$$\eta = \frac{E_{max}}{nZ_r}$$

$$m = \frac{K_s}{nZ_r [e^{\beta(1 - \theta_{fc})} - 1]}$$

$E_w$  et  $E_{max}$ , respectivement l'évapotranspiration au point de flétrissement et l'évapotranspiration journalière maximale sur la période considérée.  
 $K_s$ , la conductivité hydraulique à saturation du sol.

$\beta$ ,  $\theta_h$ , et  $\theta_{fc}$  dépendent principalement de la texture du sol :

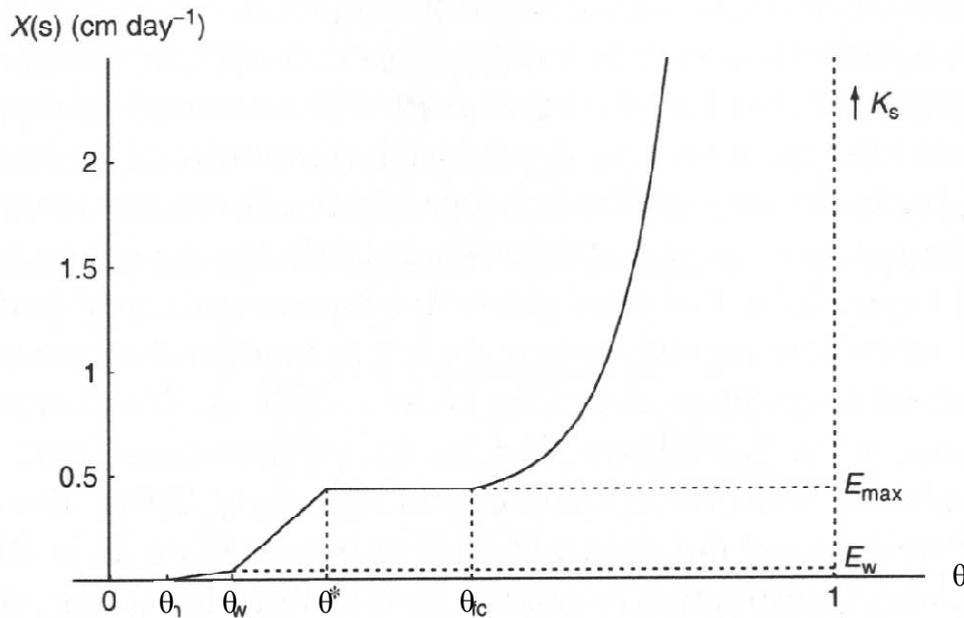
$\theta_h$ , le point hygroscopique, c'est-à-dire le point en dessous duquel seules les forces de succions retiennent l'eau dans le sol.

Au dessus du point  $\theta_{fc}$ , le drainage par gravité est non négligeable (défini par Rodriguez-Iturbe et Porporato (2004) comme l'humidité du sol à partir de laquelle la conductivité hydraulique représente plus de 10% des pertes maximales journalières par évapotranspiration).

$\theta_w$  et  $\theta^*$  dépendent de la végétation et du type de sol.

$\theta_w$  le point de flétrissement permanent. En dessous de ce point, la plante ne peut plus extraire l'eau du sol, elle meurt si cet état se prolonge.

$\theta^*$ , l'humidité du sol à partir de laquelle la plante limite ses pertes par transpiration en fermant les stomates.



**Figure 2 Evolution théorique des pertes eau en fonction de l'humidité du sol**

*(Tiré de Rodriguez-Iturbe et Porporato -2004-)*

Les équations (1) (2) (3) (4) sont les solutions analytiques de l'équation différentielle des pertes d'eau du sol :

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{E(\theta) + L(\theta)}{nZ_r} = \frac{\rho(\theta)}{nZ_r}$$

En dessous du point hygroscopique, il n'y a pas d'évapotranspiration, l'eau est retenue trop fortement dans le sol :

$$\rho(\theta) = E(\theta) = 0 \quad 0 < \theta \leq \theta_h$$

Entre  $\theta_h$  et  $\theta_w$ , seule l'évaporation peut avoir lieu, la plante ne pouvant extraire l'eau du sol.

$$\rho(\theta) = E(\theta) = E_w \frac{\theta - \theta_h}{\theta_w - \theta_h} \quad \theta_h < \theta \leq \theta_w$$

Les stomates s'ouvrent à partir de  $\theta_w$  jusqu'à leur ouverture maximale. La dépendance linéaire qui existe entre la transpiration des plantes dans les milieux arides et semi arides et l'humidité du sol est expliquée par Rodriguez-Iturbe et Porporato (2004) à partir de plusieurs travaux.

$$\rho(\theta) = E(\theta) = E_w + (E_{max} - E_w) \frac{\theta - \theta_w}{\theta^* - \theta_w} \quad \theta_w < \theta \leq \theta^*$$

Lorsque les stomates sont ouverts, la transpiration à lieu à un taux constant qui correspond à l'évapotranspiration maximale.

$$\rho(\theta) = E(\theta) = E_{max} \quad \theta^* < \theta \leq 1$$

Au-delà de la capacité au champ  $\theta_{fc}$  le drainage prédomine suivant une forme exponentielle décrite par Davidson (1963), Cowan (1965), Sisson (1988) et reprise par Rodriguez-Iturbe et Porporato (2004):

$$\rho(\theta) = L(\theta) = \frac{K_s}{e^{\beta(1-\theta_{fc})} - 1} [e^{\beta(\theta-\theta_{fc})} - 1] \quad \theta_{fc} < \theta \leq 1$$

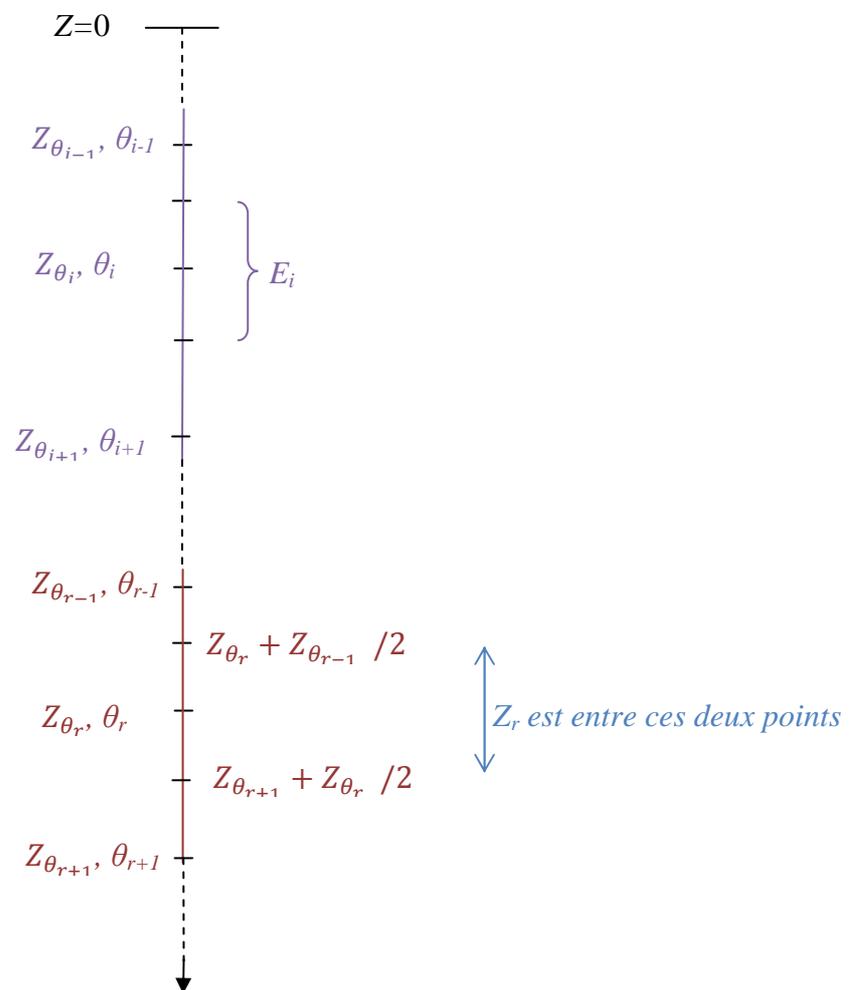
Remarque: Pour comparer le modèle aux données, on effectuera donc une pondération des données sur le même principe que celle effectuée pour les stocks d'eau :

$$\theta_{données} = \sum_{i=1}^{r-1} \theta_i \cdot \frac{E_i}{Z_r} + \theta_r \cdot \frac{E_r}{Z_r}$$

Avec :

$$E_i = \frac{Z_{\theta_{i+1}} - Z_{\theta_{i-1}}}{2}$$

$$E_r = Z_r - \frac{Z_{\theta_{r+1}} + Z_{\theta_r}}{2}$$





### III. Objectifs

Les objectifs pour ce travail sont multiples ;

- Mesurer les paramètres du modèle (interception, humidité du sol, ruissellement..) afin de discuter de la validité du modèle dans ce contexte en particulier et d'en évaluer la pertinence pour une utilisation locale.
- Comprendre l'influence de la pluie sur les différents paramètres mesurés, et en particulier sur le stockage d'eau dans le sol. La réponse d'un sol à une pluie est un phénomène complexe ; il s'agit ici de modéliser de façon simple la réponse du sol en fonction des caractéristiques de la pluie et de la couche supérieure du sol.
- Modéliser l'assèchement du sol selon le modèle en «seau» décrit par Rodriguez-Iturbe et Porporato (2004). L'évapotranspiration du sol est considérée comme étant une fonction de l'humidité moyennée du sol sur le profil racinaire. Selon le modèle de Richards, l'influence de l'entièreté du profil du sol est considérée.
- Proposer un dispositif qui permettrait l'exploitation de ces données et modèles pour les communautés locales ou d'autres acteurs.



## IV. Problématique

### A. Estimation de l'humidité du sol

La problématique globale est liée au contexte agricole. Déterminer la faisabilité d'un système d'auto-décision ou d'aide à la décision pour les agriculteurs et/ou les autorités locales en est l'enjeu principal. Ce système doit être le moins possible dépendant d'informations extérieures souvent trop globales (service météo du Burkina par ex.). La possibilité de l'utilisation de certaines technologies semblables à celles employées doit être une piste de réflexion primordiale.

Comme le soulignait Dancette (1991), beaucoup de recherches ont porté sur la mise au point de variétés de mil à cycles plus courts que les variétés locales, « profitant » ainsi plus des hivernages courts qui étaient observés. Mais ces variétés ont montré leurs limites, puisqu'elles sont en général peu ou pas photopériodiques (pas de marge possible pour la date de semis), et plus sensibles à certaines maladies (Niangado, 1989).

Depuis ces constats, des progrès dans la technologie ont été faits et ont permis des études plus approfondies sur les besoins en eau et sur la résistance à la sécheresse, mais toujours dans les conditions de stations de recherche agronomique. Généralement, les informations délivrées aux agriculteurs concernent surtout les pratiques culturales (fumure organique, techniques de labourage, etc...) et les variétés (Verrot, 2009).

Avec les moyens actuels de prise d'information et de communication, il devrait être possible de développer des outils simples et fiables pour déterminer en milieu paysan l'état de stress de la plante, la quantité d'eau à apporter le cas échéant ou encore la probabilité de période de sécheresse selon la structure de la saison en cours. Partant de cette supposition, on peut mettre en place un protocole afin de valider ou non l'applicabilité d'un modèle simple de bilan hydrique, grâce auquel les agriculteurs pourraient eux-mêmes prendre les décisions de façon autonome sur la base de principes scientifiques.

### B. Fonctionnement du modèle mathématique

Le modèle d'assèchement du sol présenté au paragraphe II C. décrit l'assèchement d'un profil vertical de sol simplifié en un « seau », c'est-à-dire que la réponse du sol est simplifiée en une seule réponse, celle de la surface.

Seul ce modèle pourrait permettre l'élaboration d'outils utilisables par les agriculteurs, puisqu'il ne nécessite pas une connaissance approfondie des couches de sol et le degré de précision des résultats serait plus en adéquation avec l'utilisation escomptée de tels outils.



## V. Mesure des paramètres, Résultats

### A. Hypothèses, protocole, résultats et discussion pour chaque paramètre

Deux stations de mesure Sensorscope sont installées dans la zone d'étude à Tambarga (Figure 3). Ces stations permettent une collecte continue des données. Le réseau radio qui les relie assure la transmission autonome et automatique des groupes de données à une station de base qui envoie les informations via le réseau GPRS<sup>1</sup>. Chacune a été reliée à des capteurs mesurant l'humidité du sol et à un pluviomètre enterré mesurant la pluie arrivant effectivement au sol.

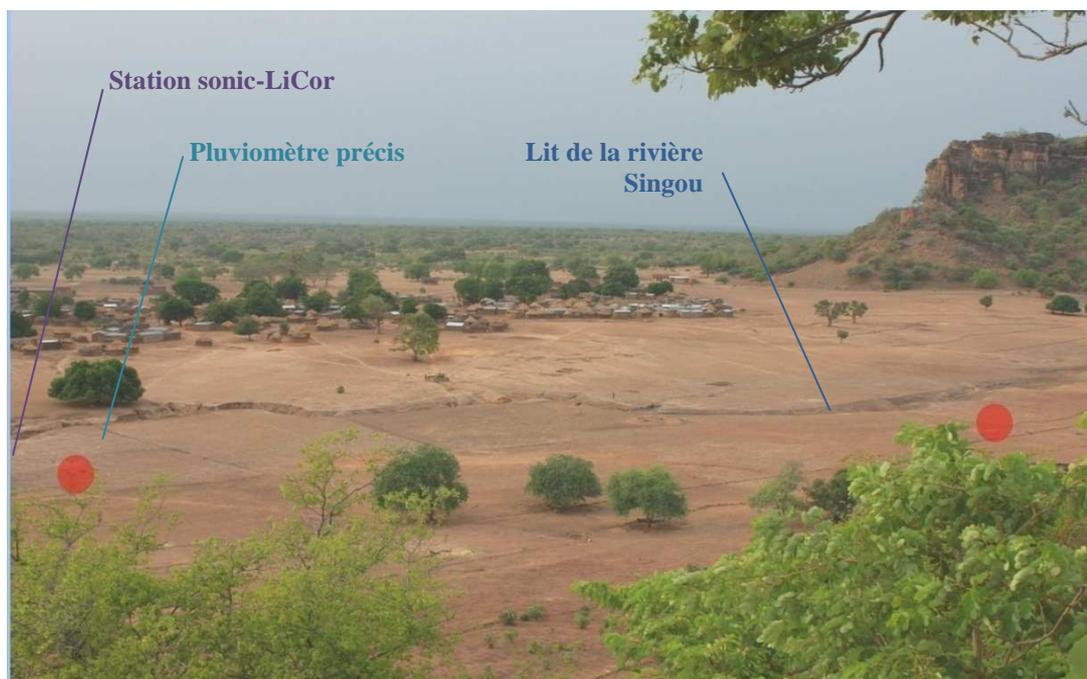


Figure 3 Emplacement des deux stations Sensorscope, 25 mai

*Station 1160 (à gauche de la photo) et 1161 (à droite de la photo) situées sur la rive gauche de la Singou  
Photo prise le 14 mai*

<sup>1</sup> Source : [www.sensorscope.epfl.ch](http://www.sensorscope.epfl.ch), consulté le 10 juillet 2010

## 1. La zone racinaire $Z_r$

La zone racinaire inclut le sol jusqu'aux racines les plus profondes. S'agissant du mil, les racines peuvent atteindre 1,80 m de profondeur (Felch, 1982). La définition de  $Z_r$  est un point clé du modèle (Rodriguez-Iturbe et Porporato, 2004), puisque les définitions de la porosité  $n$  et du drainage en profondeur  $L(t)$  en dépendent.

$Z_r$  varie au cours de la saison : une mesure directe est donc faite 2 fois par semaine aux alentours de chaque station, en mettant à nu les racines puis en mesurant la longueur. Par soucis de cohérence avec la mesure de la densité racinaire (Cf.V.A.8.). On ne prend en compte que la longueur de la racine pour un diamètre de plus de 0.7mm.



Figure 4 Mesure de racine, 26 juin

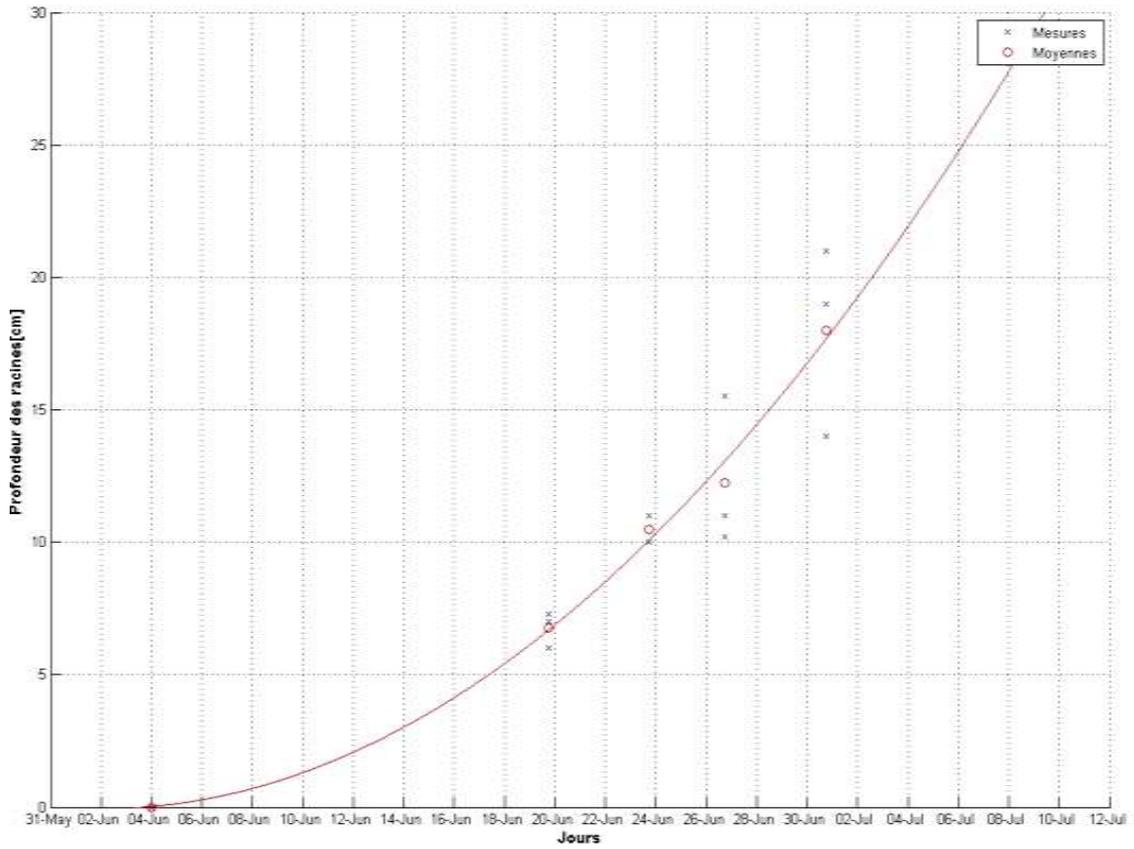


Figure 5 Evolution de la profondeur racinaire du 4 juin (date du semis) au 12 juillet

Equation de la courbe :  $0.02142x^2 - 3.146e+004x + 1.155e+010$   
 $R^2 = 0.9944$

## 2. *La pluie $R(t)$*

La pluie est mesurée par un pluviomètre précis à bascule (Précis Mécanique) (enregistrement de la date du basculement chaque 0.1 mm de pluie). On peut voir son emplacement sur la Figure 3

Dans le modèle utilisé, les pluies sont considérées comme instantanées, puisque l'évolution temporelle du profil d'humidité dans le sol est négligée à l'échelle de la journée (Rodriguez-Iturbe et Porporato -2004-).

Par ailleurs, l'utilisation de ce modèle dans une zone soudano-sahélienne où les pluies peuvent être très brèves et rapprochées impose de définir clairement ce qu'on appelle un « événement pluvieux ». En effet les pluies tombent souvent sur des sols dont la température initiale est de plus de 45°C, l'évaporation a donc lieu immédiatement après la pluie à des taux non négligeables. L'intervalle de temps pour distinguer deux événements pluvieux est mis à 30 minutes (Balme, 2006).

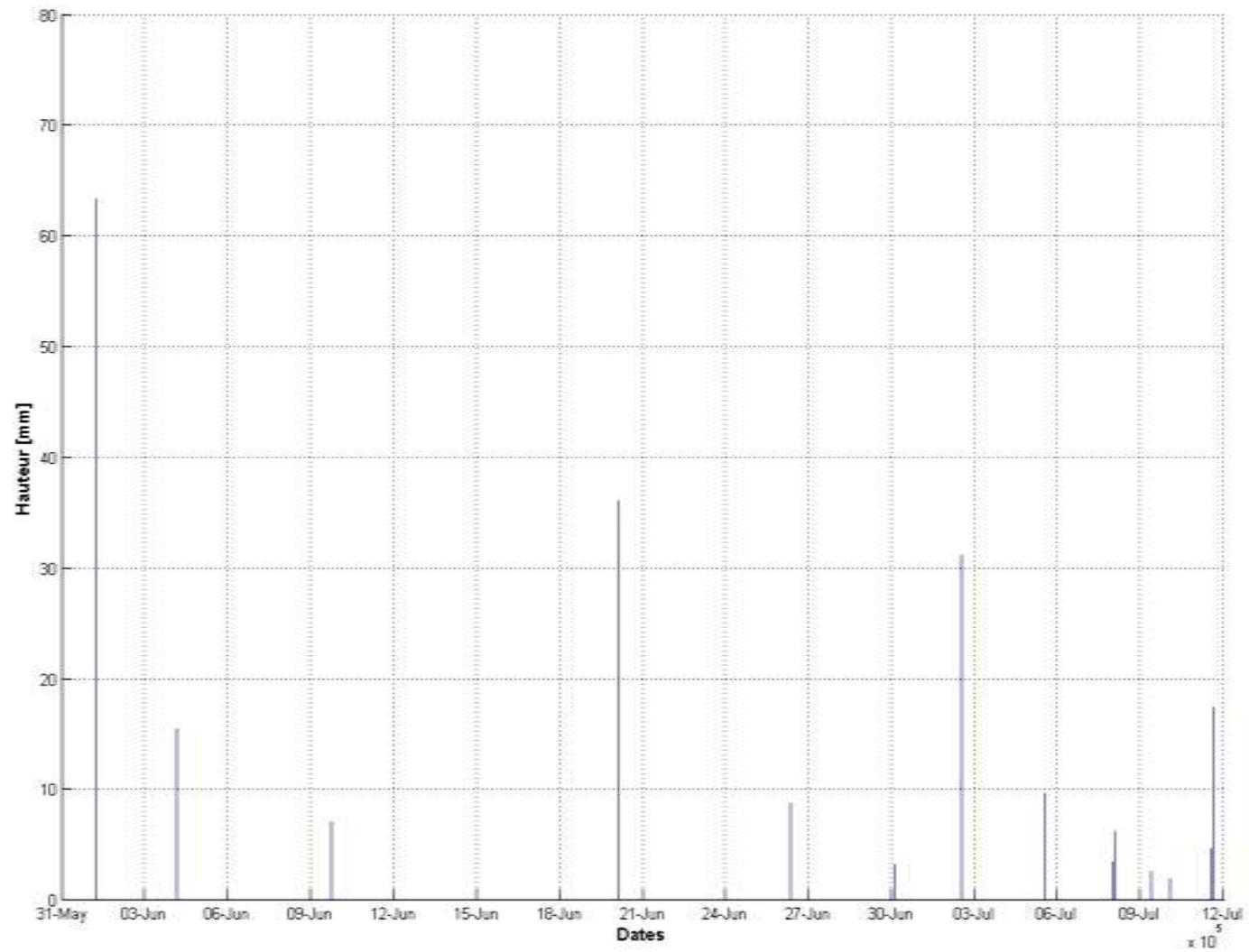


Figure 6 Hauteur de pluie par évènement

### 3. Le ruissellement $Q[\theta(t),t]$

Le ruissellement est mesuré directement à proximité de chacune des deux stations Sensorscope par des parcelles de  $1\text{m}^2$  disposées dans le sens de la pente. L'eau déversée dans la parcelle est récupérée dans un seau dans lequel est fixé un système de mesure de niveau (Odyssey).



Figure 7 Parcelle de ruissellement et mesure de niveau Odyssey, 20 mai

Par ailleurs, un protocole de mesure d'infiltration en surface par des infiltromètres à petit diamètre (Minidisk Infiltrometer, Decagon Devices Inc.) a été suivi afin de coupler les mesures à des estimations.

#### a) Résultats

Le matériel n'a pas fonctionné du 20 mai au 21 juin pendant la période de mesures.

#### b) Interprétation des résultats

Le matériel Odyssey présente l'avantage d'être peu onéreux et automatisé. Néanmoins, sa fiabilité semble discutable. Par ailleurs, si l'on souhaite envisager laisser un dispositif de mesure directe de ce paramètre pour une utilisation autonome de la part des agriculteurs ou des communautés locales, il n'est pas adapté puisqu'il requiert le téléchargement régulier des données sur un ordinateur (saturation de la mémoire).

Idéalement, pour une phase plus poussée de mise au point du modèle, ainsi que pour une utilisation éventuelle par les communautés locales, un système automatisé de mesure de niveau plus fiable serait relié à une station Sensorscope, comme les autres appareils de mesure.

#### 4. *L'interception $I(t)$*

Un pluviomètre (Davis Instruments) disposé à chacune des deux stations mesure la pluie arrivant effectivement au sol. La surface de collecte est positionnée à 10 cm de la surface du sol afin que les mesures ne soient pas influencées par l'« effet splash » ; lorsque les gouttes d'eau tombent au sol et se disloquent, une partie de l'eau est projetée en l'air. La quantité et la hauteur de l'eau projetée dépendent de l'angle de chute des gouttes d'eau. Dans ces régions, et particulièrement au début de la saison des pluies, les vents peuvent être très violents. Un réajustement de la hauteur des deux pluviomètres a été effectué après une pluie afin de minimiser l'effet de ces gouttes d'eau. Un géotextile avait été prévu pour limiter cet effet, mais il s'est avéré que le bétail risquait de l'ingérer (inefficacité de l'installation et danger pour le bétail). Le labour a ensuite corrigé ce problème (remblayage de terre autour du pluviomètre). Un tuyau a été ajouté afin d'évacuer l'eau du pluviomètre et d'éviter la submersion de la bascule.

Une bascule change de position chaque 2,54 mm. Toutes les 5 minutes, le nombre de basculements est envoyé à la station. En mesurant le diamètre du pluviomètre, on connaît l'aire de la surface qui collecte la pluie, obtenant ainsi la hauteur de pluie unitaire en mm.

Les agriculteurs ont semé de la même manière que dans le reste des champs, de façon à ce que les mesures soient représentatives.

La différence entre la pluie, mesurée par le pluviomètre précis, et la pluie mesurée par les pluviomètres enterrés est donc une mesure de l'interception par les feuilles des plantes  $I(t)$ .



**Figure 8 Pluviomètre enterré de la station 1161, 20 juillet**

a) Résultats

Les données des 3 pluviomètres (1160 1161 et précis) sont reportées sur la Figure 9.

Les données sont journalières, le but étant principalement de comparer les hauteurs relevées par les 3 pluviomètres.

Le tableau ci-dessous reprend les dates auxquelles le début et la fin de chaque pluie est enregistrée. Une pluie se distingue d'une autre par un intervalle d'au moins 30 minutes (paragraphe V.A.2)

**Tableau 1 Comparaison des débuts et fins de pluies enregistrées par les pluviomètres des stations 1160, 1161 et par le pluviomètre précis**

	<b>Date de début enregistrée</b>	<b>Date de fin enregistrée</b>	<b>Hauteur de pluie enregistrée</b>
<b>1<sup>er</sup> juin</b>			
1160	01-Jun 05:55	01-Jun 10:50	75.4
1161	01-Jun 05:55	01-Jun 11:00	67.6
Précis	01-Jun 05:45	01-Jun 11:25	63.3
<b>4 juin</b>			
1160	04-Jun 04:45	04-Jun 05:05	16.5
1161	04-Jun 04:45	04-Jun 05:25	14.0
Précis	04-Jun 04:40	04-Jun 05:25	15.5
<b>9 juin</b>			
1160	09-Jun 19:25	09-Jun 22:00	7.1
1161	09-Jun 19:25	09-Jun 22:05	7.9
Précis	09-Jun 19:15	09-Jun 22:50	7.1
<b>20 juin</b>			
1160	20-Jun 03:20	20-Jun 04:25	54.1
1161	20-Jun 03:15	20-Jun 04:25	52.1
Précis	20-Jun 03:10	20-Jun 04:30	36.0
<b>26 juin</b>			
1160	26-Jun 07:30	26-Jun 09:15	8.9
1161	26-Jun 07:30	26-Jun 09:10	10.2
Précis	26-Jun 09:25	26-Jun 11:10	8.8
<b>30 juin</b>			
1160	30-Jun 02:55	30-Jun 03:10	3.8
1161	30-Jun 02:55	30-Jun 03:20	3.0
Précis	30-Jun 02:50	30-Jun 03:05	3.3
<b>2 juillet</b>			
1160	02-Jul 11:45	02-Jul 14:00	36.6
1161	02-Jul 11:45	02-Jul 13:45	34.0
Précis	02-Jul 11:40	02-Jul 13:55	31.2

<b>5 juillet</b>			
1160	05-Jul 11:50	05-Jul 14:05	19.6
1161	05-Jul 11:50	05-Jul 14:00	19.8
Précis	05-Jul 11:40	05-Jul 12:15	9.7
Précis	05-Jul 13:00	05-Jul 14:05	3.1
<b>7 juillet</b>			
1160	08-Jul 00:00	08-Jul 00:15	3.3
1161	07-Jul 23:55	08-Jul 00:15	3.8
Précis	07-Jul 23:40	08-Jul 00:10	3.5
<b>8 juillet</b>			
1160	08-Jul 00:55	08-Jul 02:05	2.3
1160	08-Jul 02:50	08-Jul 04:45	3.8
1161	08-Jul 01:15	08-Jul 04:45	7.1
Précis	08-Jul 01:10	08-Jul 05:15	6.3
<b>9 juillet</b>			
1160	09-Jul 09:45	09-Jul 10:05	3.0
1161	09-Jul 09:45	09-Jul 10:00	3.0
Précis	09-Jul 09:40	09-Jul 09:55	2.7
<b>10 juillet</b>			
1160			0
1161	10-Jul 01:50	10-Jul 02	2.0
Précis	10-Jul 01:40	10-Jul 02:00	2.0
<b>11 juillet</b>			
1160	11-Jul 12:05	11-Jul 12:30	4.6
1161	11-Jul 12:10	11-Jul 12:35	4.6
Précis	11-Jul 12:00	11-Jul 12:30	4.6
<b>11 juillet</b>			
1160	11-Jul 15:40	11-Jul 18:30	16.5
1161	11-Jul 15:40	11-Jul 18:40	19.6
Précis	11-Jul 15:25	11-Jul 18 :35	17.4

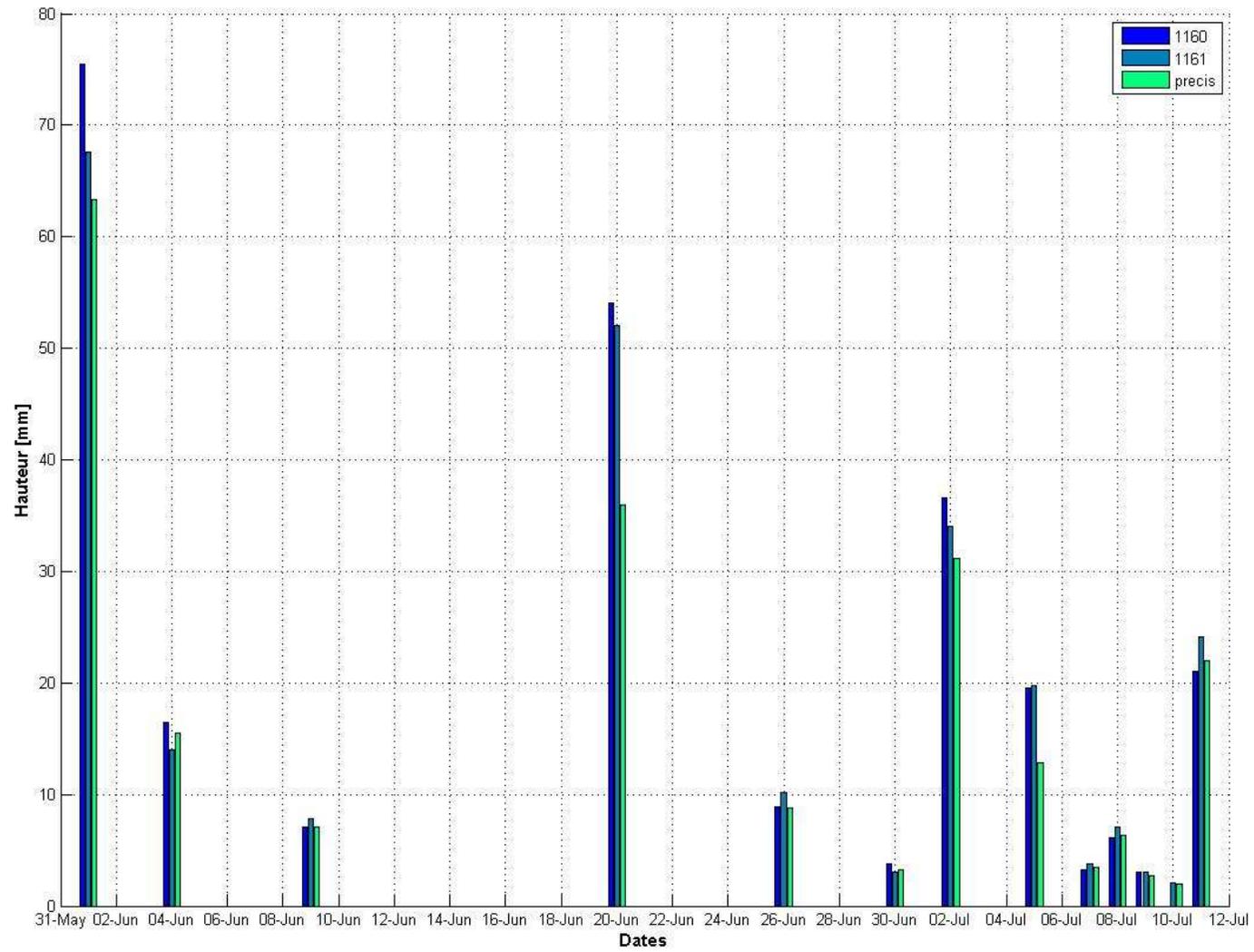


Figure 9 Hauteur journalière des pluies relevées par les pluviomètres des stations 1160 et 1161 et par le pluviomètre précis

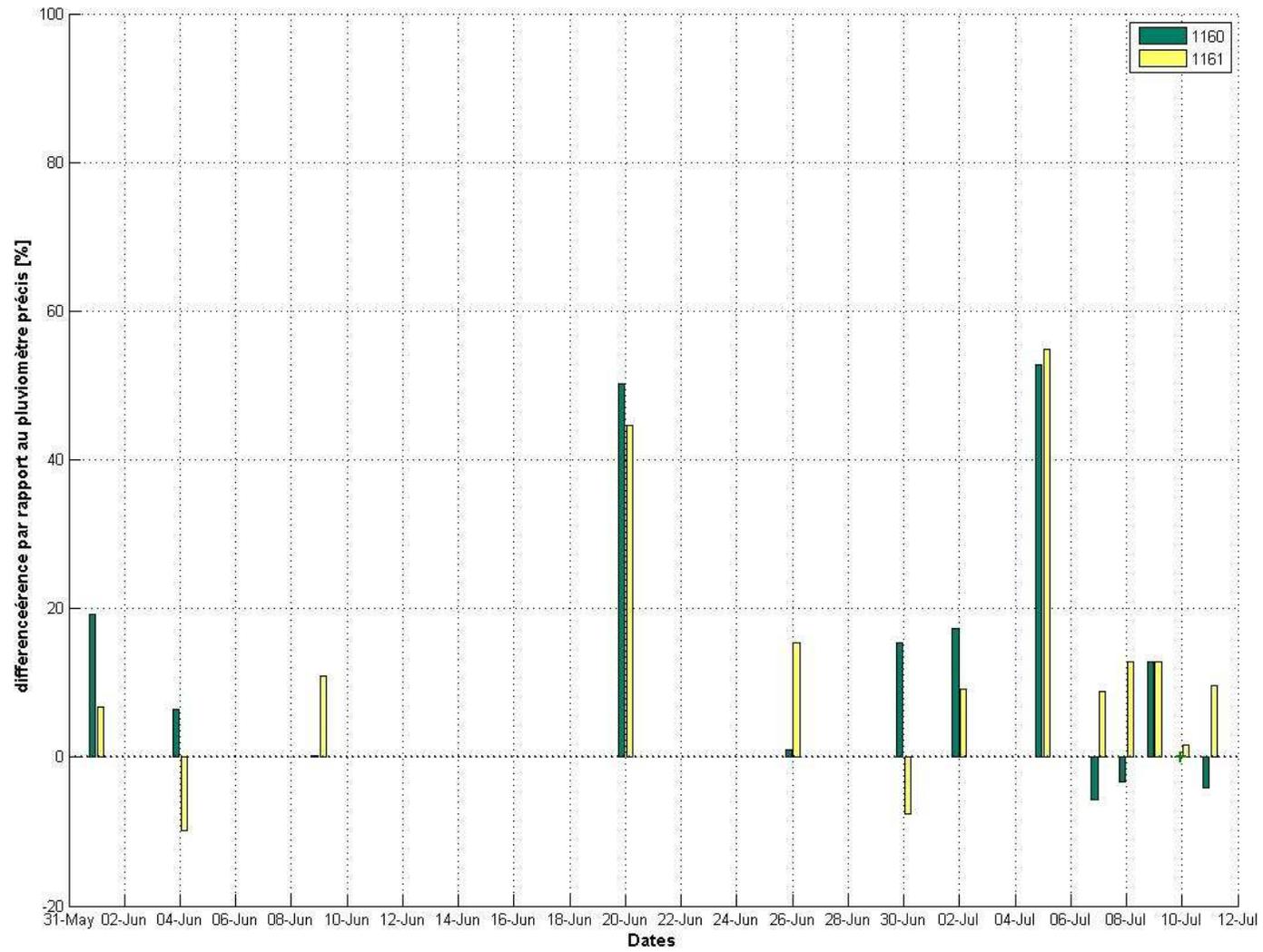


Figure 10 Différences entre les pluviomètres des stations et le pluviomètre précis pour les valeurs journalières

## b) Interprétation des résultats

Le pluviomètre précis distingue donc deux pluies le 5 juillet. Le pluviomètre de la station 1160 en distingue également deux le 8 juillet, et n'en détecte aucune le 10 juillet (Tableau 1).

Il existe une forte variabilité spatiale pour les pluies de la région soudano-sahélienne. Il n'est pas possible de savoir si ces différences sont dues à une variabilité spatiale ou au matériel.

Ces différences peuvent poser problème pour l'interprétation des données d'interception par exemple.

Pour ce qui est des hauteurs (Figure 9), on remarque une forte disparité entre les valeurs du pluviomètre précis et celles des pluviomètres enterrés des deux stations. Les valeurs statistiques sont plutôt bonnes (moyenne des différences entre le pluviomètre 1160 et le pluviomètre précis : 3.4 mm, écart type : 3.4 mm, moyenne des différences entre le pluviomètre 1161 et le pluviomètre précis : 2.6 mm, écart-type : 4.2 mm) mais les plus grandes différences en valeur absolue se trouvent sur certaines grandes pluies (1<sup>er</sup> juin, 20 juin, 5 juillet notamment : l'erreur due à la différence de précision de la bascule augmente).

Par ailleurs, les hauteurs enregistrées par les pluviomètres des deux stations sont dans 85% des cas supérieures aux valeurs enregistrées par le pluviomètre précis (dans 15% des cas elles sont en dessous, Figure 10).

Il paraît peut probable qu'une disparité spatiale dans la répartition des pluies puisse expliquer ces différences entre les pluviomètres enterrés et le pluviomètre précis (distance entre le pluviomètre 1160 et le pluviomètre précis ; environ 20 mètres, distance entre le pluviomètre 1161 et le pluviomètre précis : 200 mètres, même topographie aux trois endroits).

A l'époque des mesures, aucune couverture végétale ne se trouvait sur le terrain des stations.

S'il s'avérait que la disparité spatiale explique ces différences, il faudrait disposer un pluviomètre mesurant la pluie avant son interception, au dessus de la végétation, près de chacune des deux stations Sensorscope pour comparer directement les valeurs enregistrées par le pluviomètre enterré.

Dans le cas où les différences de matériel expliquent les disparités des mesures, il faudrait envisager de n'utiliser qu'un seul type d'appareil (même marque, même modèle) et éventuellement procéder à une correction entre les pluviomètres.

En conclusion, le dispositif actuel semble inapproprié pour la mesure de l'interception aux stations 1160 et 1161. Une suite de tests serait à envisager pour connaître avec certitude l'origine des différences de mesures afin d'améliorer le dispositif et ainsi permettre une prise de données exploitables.

## 5. Les valeurs remarquables du sol

Des échantillons du sol pour chaque profondeur de capteur ont été prélevés. Les résultats de l'analyse de texture sont reportés sur les figures suivantes.

Profondeur [cm]	Argiles [%]	Limons [%]	Sables [%]
5	7.1	20.1	72.8
20	10.3	22.7	67.0
35	<i>Echantillon abîmé</i>		
50	7.4	22.2	70.4
65	8.0	18.6	73.4
80	9.5	18.3	72.2
170	7.7	13.2	79.1

Tableau 2 Textures du profil de sol-station 1160

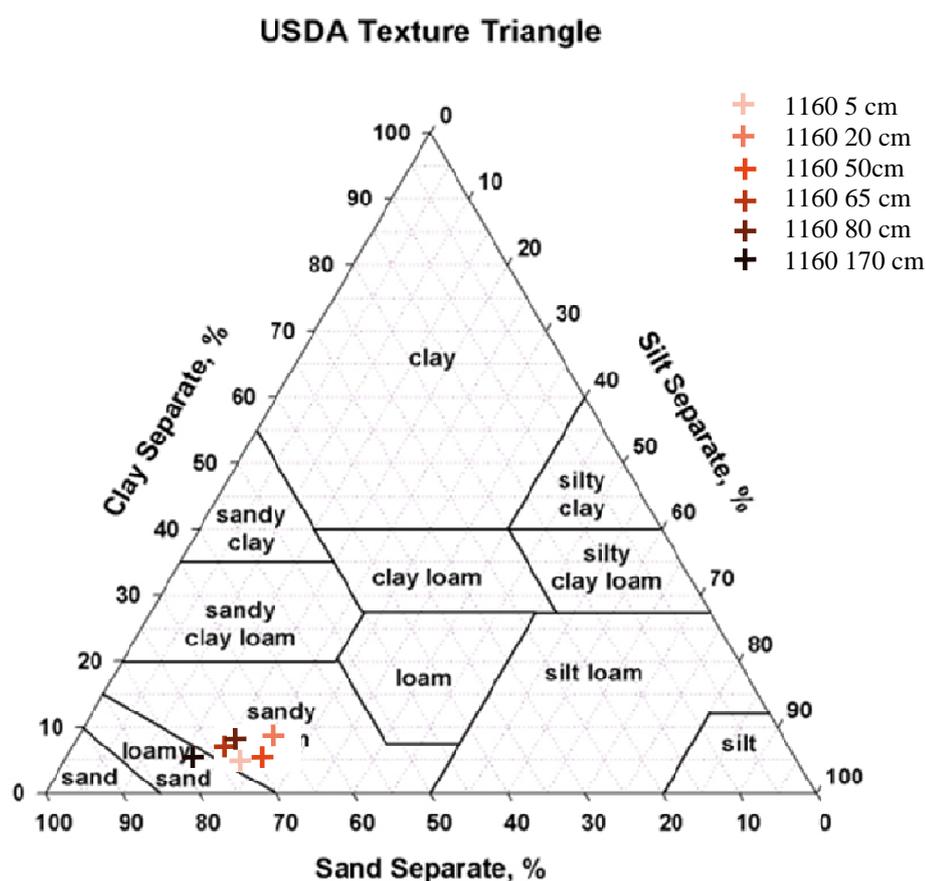


Figure 11 Textures du profil selon la classification USDA-station 1160

Les valeurs de  $\theta_h$   $\theta^*$   $\theta_f$   $\theta_w$   $\beta$   $n$   $K_S$  pour les limons sableux sont adaptées de Rodriguez-Iturbe et Porporato (2004) :

$\theta_h$	$\theta^*$	$\theta_{fc}$	$\theta_w$	$\beta$	$n$	$K_S$ [cm/day]
0.14	0.46	0.56	0.18	13.8	0.43	80

Tableau 3 Paramètres pour le sol de la station 1160

Profondeur [cm]	Argiles [%]	Limons [%]	Sables [%]
5	<i>Echantillon abîmé</i>		
20	7.7	11.0	81.3
35	<i>Echantillon abîmé</i>		
50	10.8	16.7	72.5
65	30.1	17.6	52.3
80	33.2	18.7	48.1

Tableau 4 Textures du profil de sol-station 1161

### USDA Texture Triangle

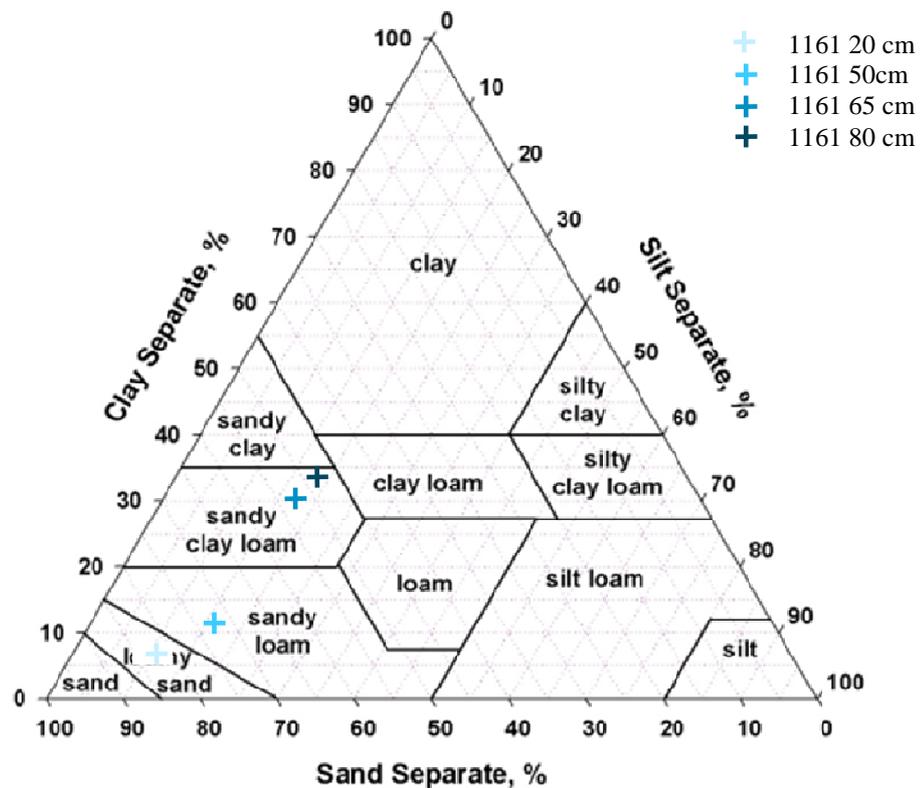


Figure 12 Textures du profil selon la classification USDA-station 1161

Les valeurs de  $\theta_h$ ,  $\theta^*$ ,  $\theta_f$ ,  $\theta_w$ ,  $\beta$ ,  $n$ ,  $K_S$  pour des sols de la station 1161 sont adaptées de Rodriguez-Iturbe et Porporato (2004) :

	$\theta_h$	$\theta^*$	$\theta_{fc}$	$\theta_w$	$\beta$	$n$	$K_S$ [cm/day]
Loamy Sand	0.08	0.31	0.52	0.11	12.7	0.42	100
Sandy Loam	0.14	0.46	0.56	0.18	13.8	0.43	80
Sandy clay loam	-	-	0.71 <sup>1</sup>	0.36 <sup>1</sup>	-	0.45 <sup>2</sup>	10 <sup>2</sup>

Tableau 5 Paramètres pour le sol de la station 1161

<sup>1</sup> Blencowe et al, 1960

<sup>2</sup> Rawls et al, 1982

## 6. Pondération des valeurs remarquables du sol

Pour la période de l'étude, aucune pondération des paramètres n'a été appliquée puisque les racines ne traversent pas de sols très hétérogènes au début de la saison des pluies (Figure 5, Figure 11, Figure 12). Mais elle est nécessaire lorsque le réseau racinaire du mil commence à s'étendre en profondeur et en largeur. En effet, les racines peuvent alors traverser plusieurs couches pédologiques de propriétés différentes.

Pour avoir une première estimation de la densité racinaire, on peut appliquer les facteurs de pondération en considérant que les 2/3 des racines sont situées dans les 45% supérieurs du sol (Felch, 1982).

On peut aussi envisager de pondérer les paramètres physiques du sol en fonction de mesures directes de la densité racinaire (méthode adaptée de Bohm (1979) et de Maertens (1964).

- Prélèvement bihebdomadaire du sol par carottage avec des cylindres (Figure 13), en 3 points sous le mil, pour les profondeurs des capteurs installés (paragraphe V.B).

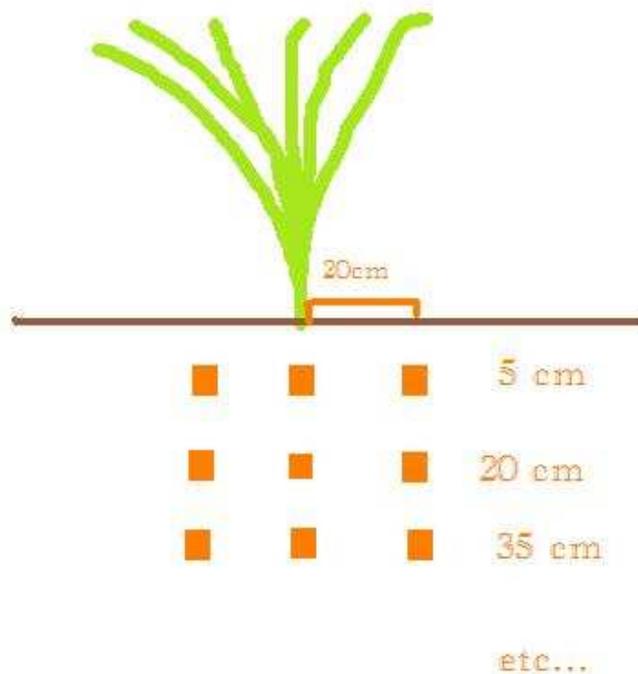


Figure 13 Schéma des points de carottage sous le mil pour la mesure de la densité racinaire

- Pesée des échantillons :  $M_{S+R_i}$ . (masse du sol et des racines [g])
- Tamisage à 1mm des échantillons prélevés, récupération des racines
- Pesée des racines :  $M_{R_i}$  (masse des racines [g]).
- Pour chaque profondeur de mesure on calcule la moyenne arithmétique des masses ;

$$M_{S+R} = \sum_{i=1}^3 M_{S+R_i}$$

$$M_R = \sum_{i=1}^3 M_{R_i}$$

La densité racinaire pour chaque profondeur est alors

$$D_R = M_R / M_{S+R} \quad [\text{g/g}]$$

Avec la mesure de la densité apparente des sols, on obtient la densité racinaire en  $[\text{g/m}^3]$ .

On supposera que la densité racinaire trouvée est la même pour toute la profondeur d'influence du capteur correspondant, comme pour le calcul du stock d'eau (paragraphe II.B)

<i>Profondeur du capteur [cm]</i>	<i>« Tranche » du sol mesurée par le capteur [cm]</i>	<i>Proportion Correspondante [-]</i>	<i>Densité racinaire <math>D_R</math> mesurée <math>[\text{g/m}^3]</math></i>	<i>Facteur de pondération à appliquer [-]</i>
$z_1$	$T_1 = \frac{1}{2}(z_2 - z_1)$	$P_1 = \frac{T_1}{z_n}$	$D_{R_1}$	$\delta_1 = D_{R_1} \cdot P_1$
$z_i$	$T_i = \frac{1}{2}(z_{i+1} - z_{i-1})$	$P_i = \frac{T_i}{z_n}$	$D_{R_i}$	$\delta_i = D_{R_i} \cdot P_i$
$z_n$	$T_n = \frac{1}{2}(z_n - z_{n-1})$	$P_n = \frac{T_n}{z_n}$	$D_{R_n}$	$\delta_n = D_{R_n} \cdot P_n$
	<i>Total :</i> $\sum_{i=1}^n T_i = \text{Profondeur } z$			

Tableau 6 Calcul des facteurs de pondération pour les différents paramètres du sol

## 7. Les paramètres liés à l'évapotranspiration

$E_{max}$ , l'évapotranspiration maximale journalière pour chaque période d'assèchement du sol, est déterminée à partir des ET journalières (évapotranspiration de référence journalière : ET). En appliquant la méthode eddy-correlation aux mesures de l'anémomètre sonic (Campbell Scientific) et de l'analyseur de gaz (LiCor, Figure 14), on détermine ET :

$$ET = \rho \overline{q'w'} \quad [ML^{-2}T^{-1}]$$

Avec  $\overline{q'w'}$  la composante verticale du flux de transport de vapeur  
 $\rho$  est la densité de l'air (Figure 15)

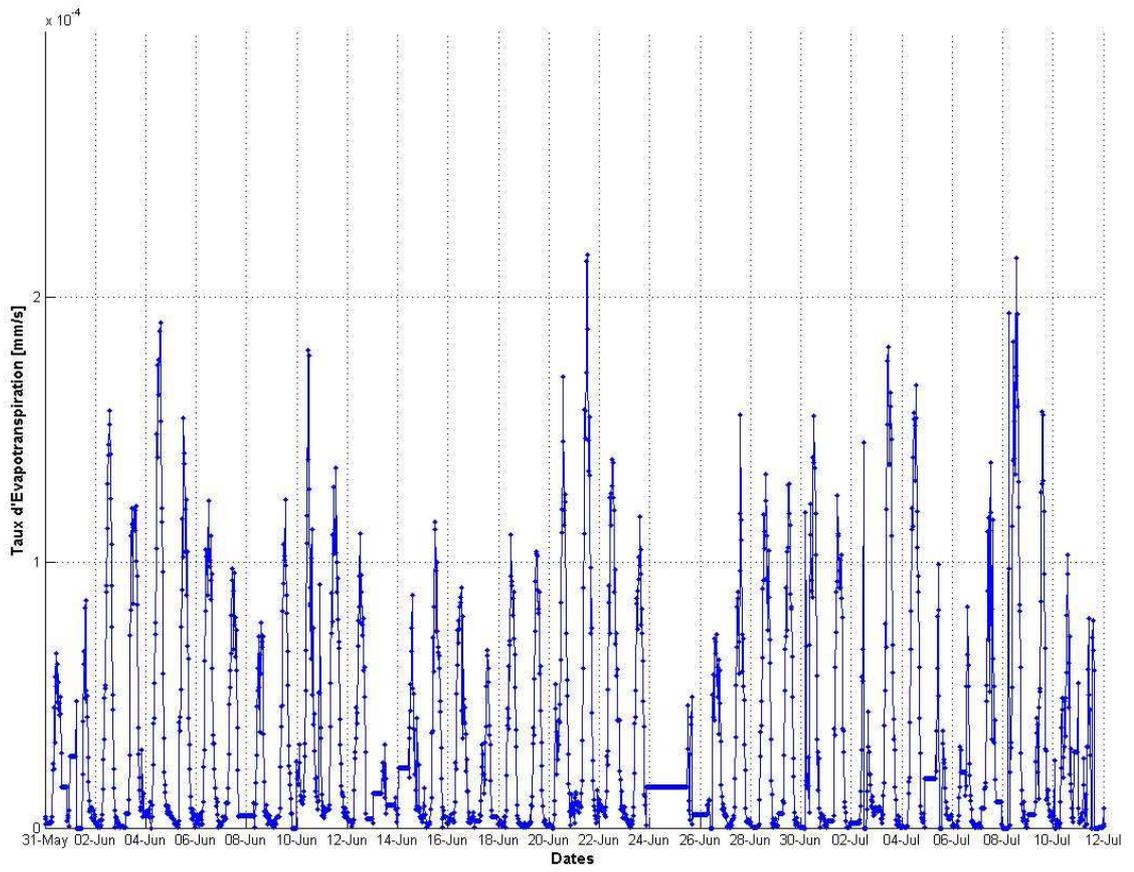


Figure 14 Installation sonic-LiCor

L'installation est appelée pour la suite du travail « station sonic-LiCor » (Figure 3).

La Figure 16 reprend les évapotranspirations totales journalières du 31 mai au 12 juin, qui sont donc les valeurs de  $E_{max}$

Déterminer  $E_w$  à partir de données sur le terrain nécessite une expérience en station agronomique, puisqu'il s'agit de permettre un assèchement jusqu'au point de flétrissement permanent, et de mesurer l'évapotranspiration alors encore présente. Dans les conditions de l'expérience, on décide de fixer la valeur de  $E_w$  à une constante (Rodriguez-Iturbe and Porporato, 2004).



**Figure 15** Données d'Evapotranspiration du sonic LiCor

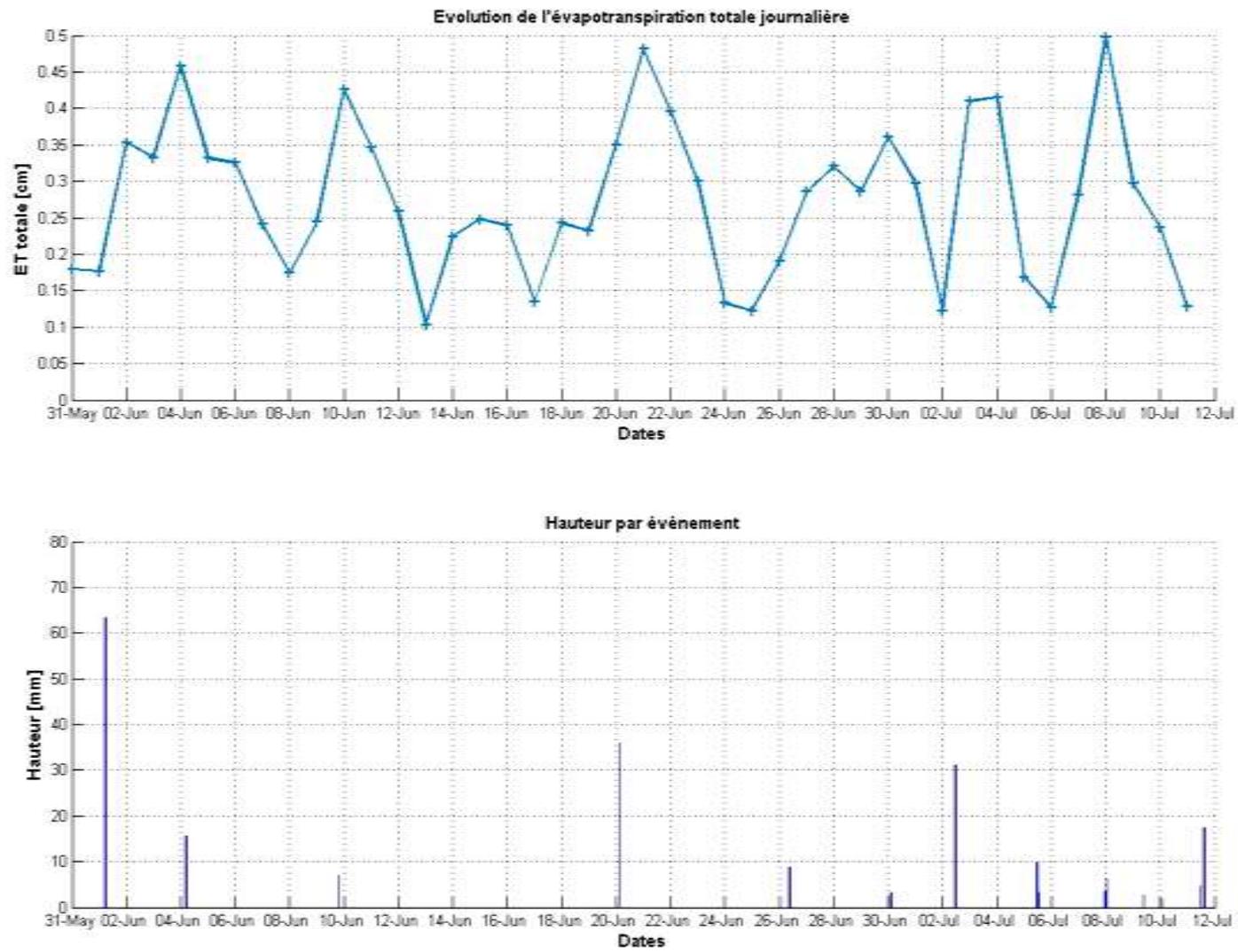


Figure 16 Evolution de l'évapotranspiration totale journalière

## B. Mesures de l'humidité du sol aux stations 1160 et 1161

Les sondes d'humidité du sol ont été installées en creusant un trou de 2m de profondeur et environ 80cm de diamètre et en évacuant le sol horizontalement sur 40cm à chaque profondeur choisie.



**Figure 17 Pose des sondes d'humidité du sol à la station 1160, 29 avril**

Les sondes sont réparties sur le profil afin de saisir au mieux les changements d'humidité selon les couches pédologiques : 5cm, 20cm, 35cm, 50cm, 65cm, 80cm, 100cm, 125cm, 150cm, 175cm.

175cm correspond à la profondeur maximale moyenne des racines du mil trouvée dans la littérature (Bieler, 1992).

L'écartement entre les sondes n'est pas le même pour tous les capteurs ; il a été choisi en fonction des observations sur le terrain (homogénéité du sol) et du nombre de capteur à disposition.

## 1. Humidité du sol à la station 1161

Les données de la station 1161 pour la période du 31 mai au 12 juillet sont représentées sur la Figure 20.

Il n'a pas été possible de creuser au-delà de 1,50 m, le sol devenant trop compact. Le capteur le plus profond a donc été placé à 1,50m, mais il n'a jamais fonctionné (aucune donnée envoyée).

### a) Discussion sur la fiabilité des données de la station 1161

#### ▪ Données jusqu'au 21 juin

Les capteurs n'ont donc pas réagi aux pluies entre le 1<sup>er</sup> juin (pluie de 68 mm) et le 21 juin alors que les capteurs de la station 1007 par exemple, avaient fortement réagi (Figure 21). Au cours de cette période, 3 pluies ont été enregistrées : le 4 juin (16 mm), le 9 juin (7 mm) et le 20 juin (36 mm).

Ces constats ont amené à une vérification des capteurs, le 21 juin. Il s'est avéré que les deux premiers capteurs se trouvaient respectivement à 15 et 30 cm au lieu de 5 et 20 cm (erreur de positionnement). Suite au labourage du même jour, la profondeur des 2 capteurs a été rectifiée.

Par ailleurs, le sol semble s'assécher très lentement à 15 cm après la pluie du 1<sup>er</sup> juin. Après cette même pluie, le sol à 30 cm s'humidifie en plus d'une semaine (de 20% à 25%).

Enfin, en remarquant que le sol à 20 cm à la station 1161 est très semblable au sol à 15 cm de la station 1007 (Figure 30), on peut penser que les données du capteur à 15 cm sur la période du 31 mai au 21 juin ne sont pas cohérentes.

Quant au capteur à 30 cm, il n'y a pas de point de comparaison possible avec la station 1007, mais encore une fois, le sol se situant au dessus étant très conducteur, on peut penser que ce capteur aurait dû réagir plus rapidement après la pluie du 1<sup>er</sup> juin (il atteint le maximum d'humidité 7 jours après l'occurrence de la pluie), et montrer un assèchement plus rapide par la suite.

On peut penser qu'il est anormal que le capteur à 15 cm (ligne rouge sur la figure) n'ait pas réagi à la pluie du 20 juin (Figure 20) alors qu'il a réagi à la pluie du 1<sup>er</sup> juin.

En réalité, le capteur a réagi à partir d'une hauteur de pluie de 52 mm environ (Figure 18). La pluie du 20 juin faisant au total 36 mm, il paraît donc normal que le capteur n'y ait pas réagi.

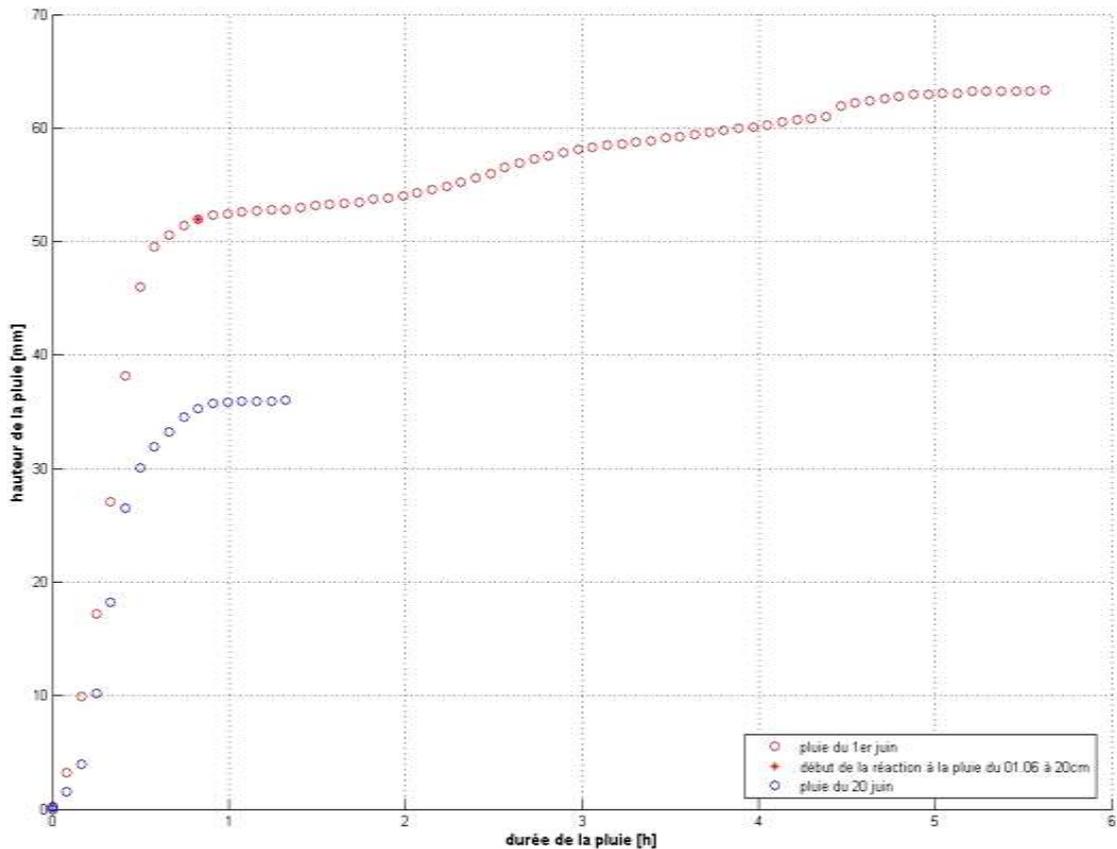


Figure 18 Réaction du capteur à 15 cm aux pluies du 1er et 20 juin-station1161

- Données du 21 juin au 2 juillet

Aucun capteur n'a non plus réagit à la pluie du 26 juin (9 mm). Un test sur le capteur à 5 cm a été fait le 27 juin. Il a été placé à 5 cm près de son emplacement d'origine (pour ne pas influencer les données ultérieures), et l'équivalent de 20 mm de pluie a été versé sur le sol en 1h30.

Le capteur n'a pas réagit à l'augmentation du contenu en eau (Figure 19). En fin de test, il était évident que le sol autour du capteur était beaucoup plus humide que le sol situé plus loin.

Le capteur a été remplacé de la même façon que les fois précédentes.

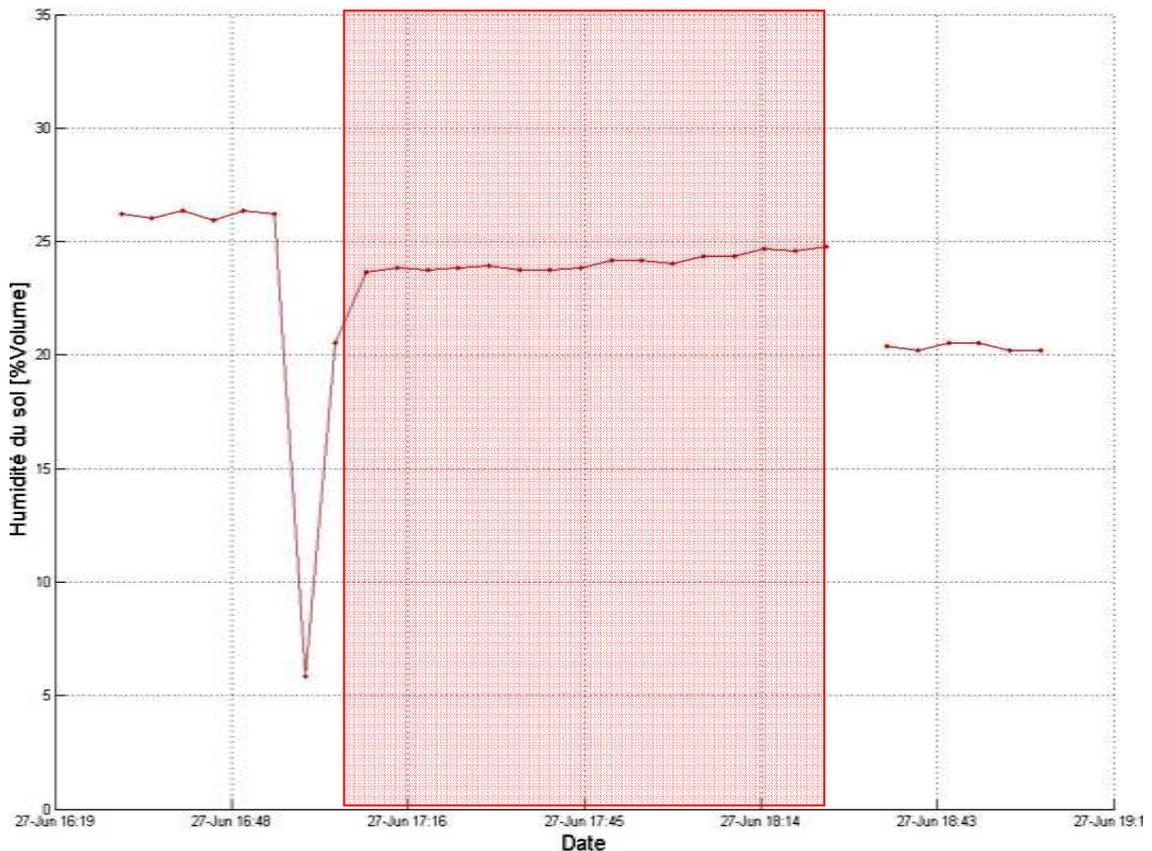


Figure 19 Evolution de l'humidité du sol lors du test sur le capteur à 5 cm le 27 juin-station1161

- Données du 2 juillet au 12 juillet

A partir du 2 juillet, le capteur situé à 5 cm a réagit à toutes les pluies de plus de 2 mm.

Le capteur à 15 cm depuis le 21 juin n'a jamais réagit à aucune pluie.

- Données en profondeur sur la période

Les valeurs très élevées des derniers capteurs (à partir du capteur à 65 cm) indiqueraient la présence d'une nappe à partir de 80 cm (à 80 cm, les données sont à 43% de contenu volumique en eau, ce qui est proche de la porosité théorique donc de la saturation (Tableau 1 Tableau 5)).

Les données à disposition indiqueraient que la nappe se situerait aux alentours de 12 mètres à la fin du mois de juin<sup>1</sup>. Par ailleurs, il est difficile d'imaginer une nappe qui ne monterait pas au cours du mois de juin compte tenu des pluies enregistrées. En effet le capteur à 65 cm, qui aurait donc été à la limite de la zone saturée au début du mois de juin (si l'on suppose qu'à 80 cm, le sol est saturé), aurait dû mesurer une augmentation progressive du contenu en eau. Ce n'est pas le cas.

<sup>1</sup> Source : Mesures manuelles N. Ceperley et T. Mande, mai 2010

Les données du capteur à 120 cm sont complexes à interpréter, puisqu'elles indiquent une teneur en eau constante et en dessous de la teneur en eau plus en surface, à 1m et 80 cm.

Il peut exister plusieurs explications :

- Une erreur de notation pour ces capteurs ; il se pourrait qu'en réalité les capteurs à 125 et 80 cm soient inversés.
- Une composition différente de sol, qui amènerait le sol à 125 cm à être saturé à de plus faibles teneurs en eau que le sol à 80 cm et à 100 cm. Il n'a pas été possible faute de temps d'analyser ces échantillons de sol.
- Une lentille d'eau entre 80 et 100 cm, qui ne serait pas la nappe phréatique connue, mais une zone de saturation perchée.
- Des données erronées

Aucun élément ne permet de valider une explication, mais l'analyse des sols à 100 et 125 cm permettrait d'en savoir plus.

- Conclusion sur la fiabilité des données de la station 1161

Les données enregistrées par les capteurs montrent:

- une réaction très lente à 30 cm à la pluie du 1<sup>er</sup> juin
- un assèchement très lent après cette pluie, et uniquement à 15 cm, pas d'assèchement à 30 cm.
- aucune réaction à 5 cm lors de la simulation d'une pluie de 20 mm
- des réactions à chaque pluie à 5 cm après la remise en place du capteur le 27 juin, alors qu'à 20 cm, on ne constate aucune réaction

L'hypothèse d'un dysfonctionnement des capteurs, dû par exemple à des bulles d'air évoquées par le fabricant dans le manuel d'utilisation des capteurs n'est pas à exclure (le remaniement du capteur à 5cm le 27 juin aurait pu supprimer ces bulles).

Des tests systématiques sur ces capteurs, en conditions de laboratoire, avec contrôle et mesure des données permettraient de statuer définitivement sur la fiabilité de ces capteurs (paragraphe V.E).

La ressemblance des teneurs en argiles, sables et limons à 20 cm pour la station 1161 et à 15 cm pour la station 1007 a été évoquée. Il faut remarquer que la teneur en sables (globalement très conducteurs) à la station 1161 est de 2% environ inférieure à celle trouvée à la station 1007, alors que la teneur en argiles (globalement peu conductrices) est de 3% supérieure. Ces différences pourraient peut-être expliquer l'absence de réaction et l'assèchement lent à 15cm jusqu'au 21 juin. A partir du 21 juin, le capteur est à 20 cm, ce qui pourrait être un élément supplémentaire pour expliquer l'absence de réaction aux pluies à partir de ce jour (Figure 21).

	1007 (échantillons du 29.11.2009)	1161
	15 cm	20 cm
Argiles [%]	4.7	7.7
Limons [%]	12.4	11.0
Sables [%]	83	81.3

**Tableau 7 Comparaison des teneurs en argiles, sables et limons pour les stations 1161 et 1007**

Pour ce travail, on décide donc de ne pas exclure les données de cette station.

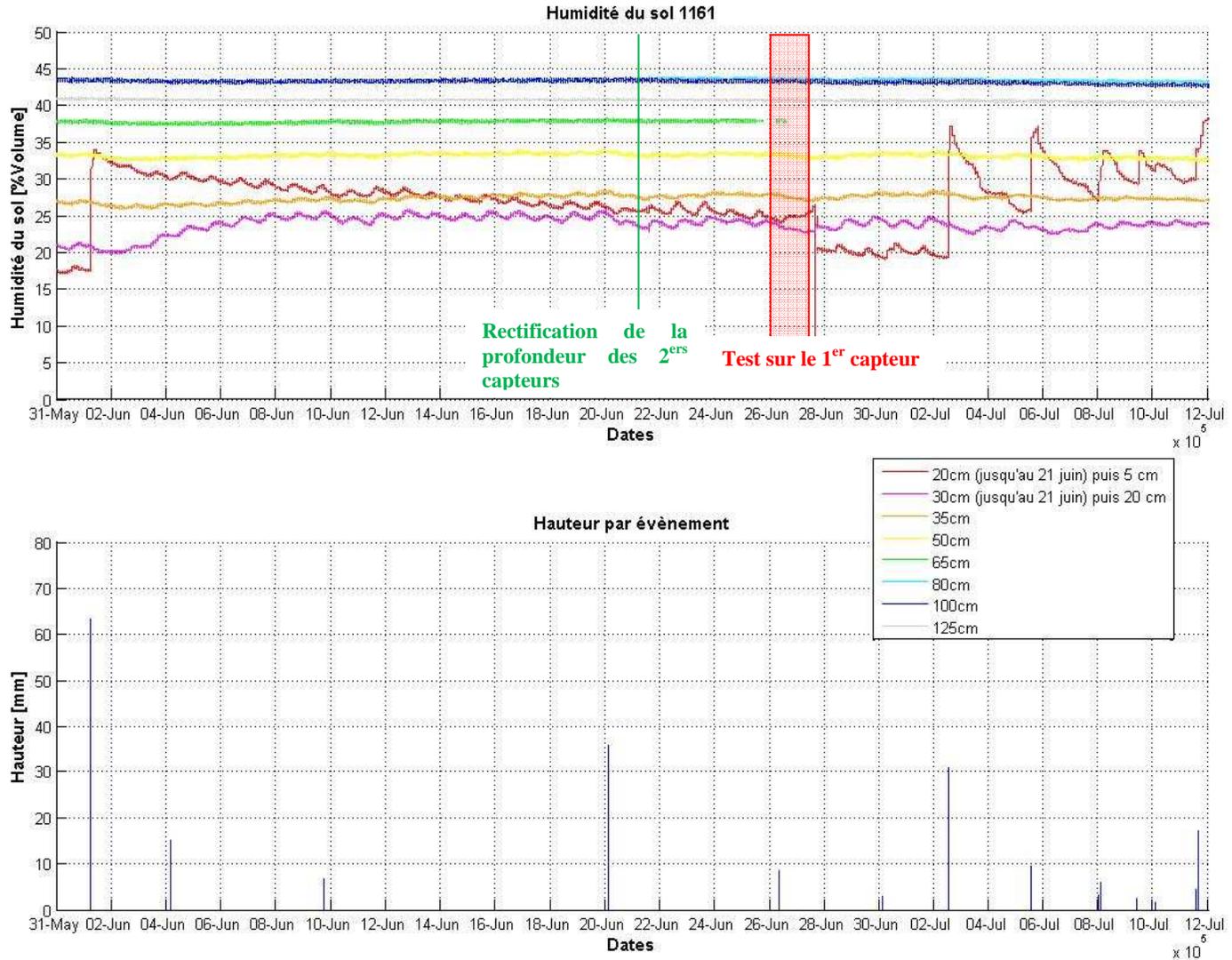


Figure 20 Evolution de l'humidité du sol du 31 mai au 12 juillet-station1161

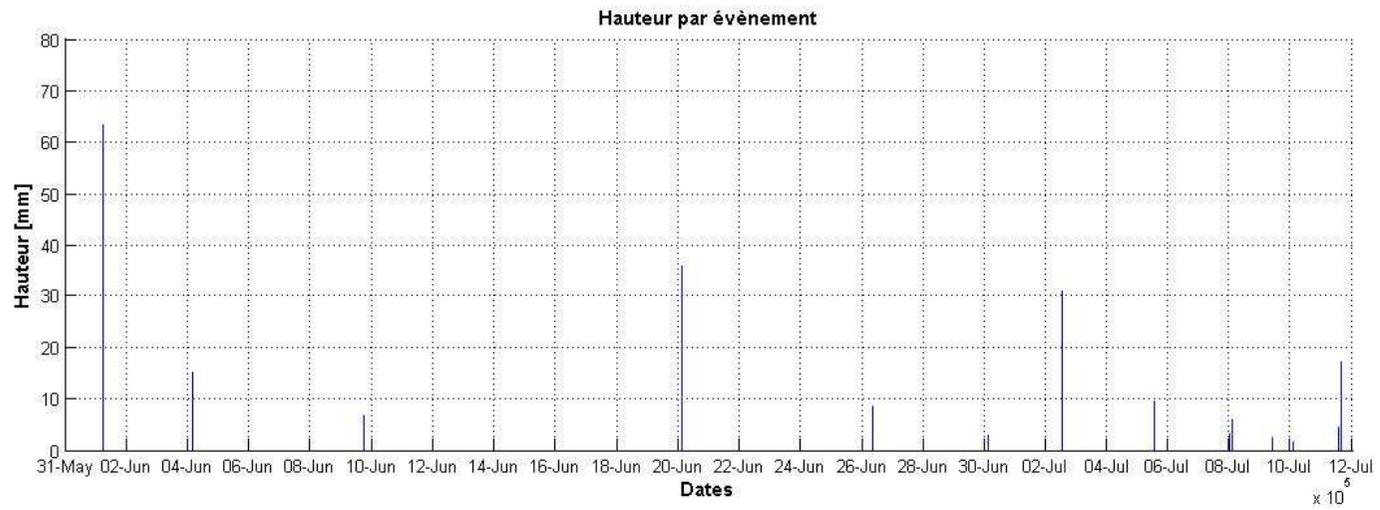
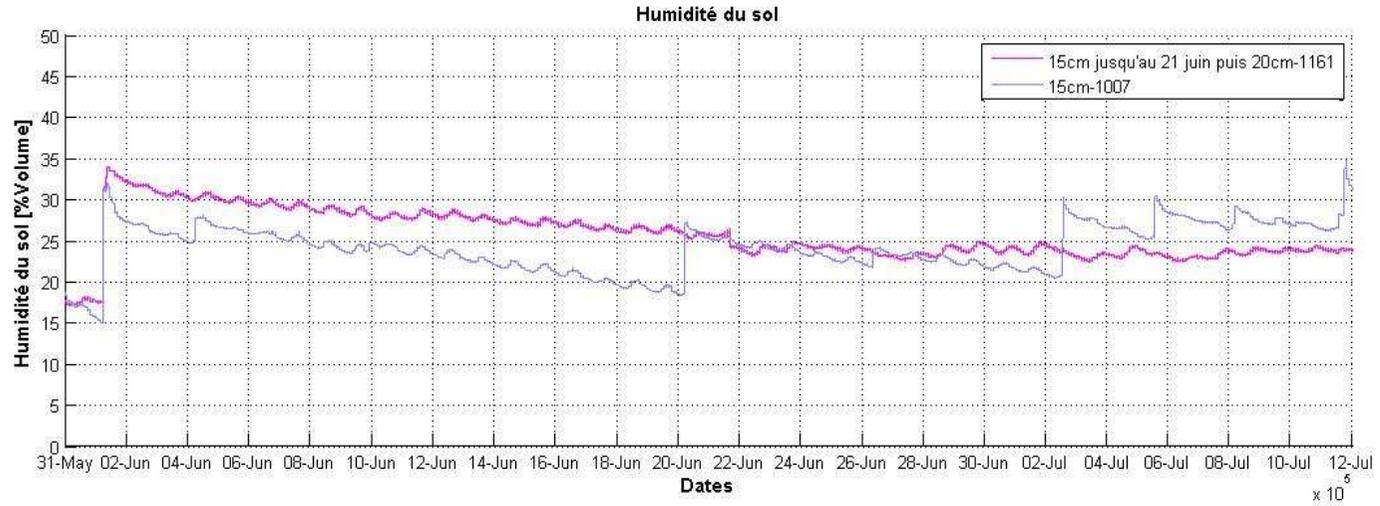


Figure 21 Comparaison de l'évolution de l'humidité du sol à 20 cm pour les stations 1007 et 1161

## b) Modèle d'assèchement du sol

Le 1<sup>er</sup> capteur a réagit à 5 pluies : 1<sup>er</sup> juin (il était alors à 15 cm), 2 juillet, 5 juillet, 8 juillet, 11 juillet (il était à 5 cm pour ces pluies).

On a défini arbitrairement qu'il y a réaction à une pluie lorsque l'humidité du sol mesurée par le premier capteur augmente d'au moins 2% entre le début de la pluie et 2 heures après la fin de la pluie (et non juste après la fin de la pluie pour tenir compte d'un éventuel retard de réaction du sol).

La date de semis étant le 4 juin, il n'est pas possible de modéliser l'assèchement du sol suite à la pluie du 1<sup>er</sup> juin ( $Z_r = 0$ ).

Comme il a été expliqué au paragraphe II.C,  $E_{max}$  correspond à la valeur maximale de l'évapotranspiration journalière, pour chaque période d'assèchement,  $Z_r$  est la profondeur racinaire pour le début de la période. Comme expliqué dans la partie V.A.6, il n'a pas été nécessaire de pondérer les valeurs des paramètres du sol.

La « Moyenne pondérée des données » correspond à l'humidité du sol théorique sur la profondeur racinaire, telle qu'expliquée dans la partie II.C.

Le temps  $t=0$  correspond au temps immédiatement après la fin de la pluie. Le dernier temps correspond au temps juste avant le début de la pluie suivante, sauf pour le dernier graphique (Figure 25), puisque la période considérée s'arrête le 12 juillet à minuit.

A cause du retard de réponse du sol par rapport à la fin de la pluie, on commence le modèle pour un  $\theta_0$  ( $\theta$  pour  $t=0$ ) égal au maximum des données sur la période, et non égal à  $\theta$  juste après la fin de la pluie.

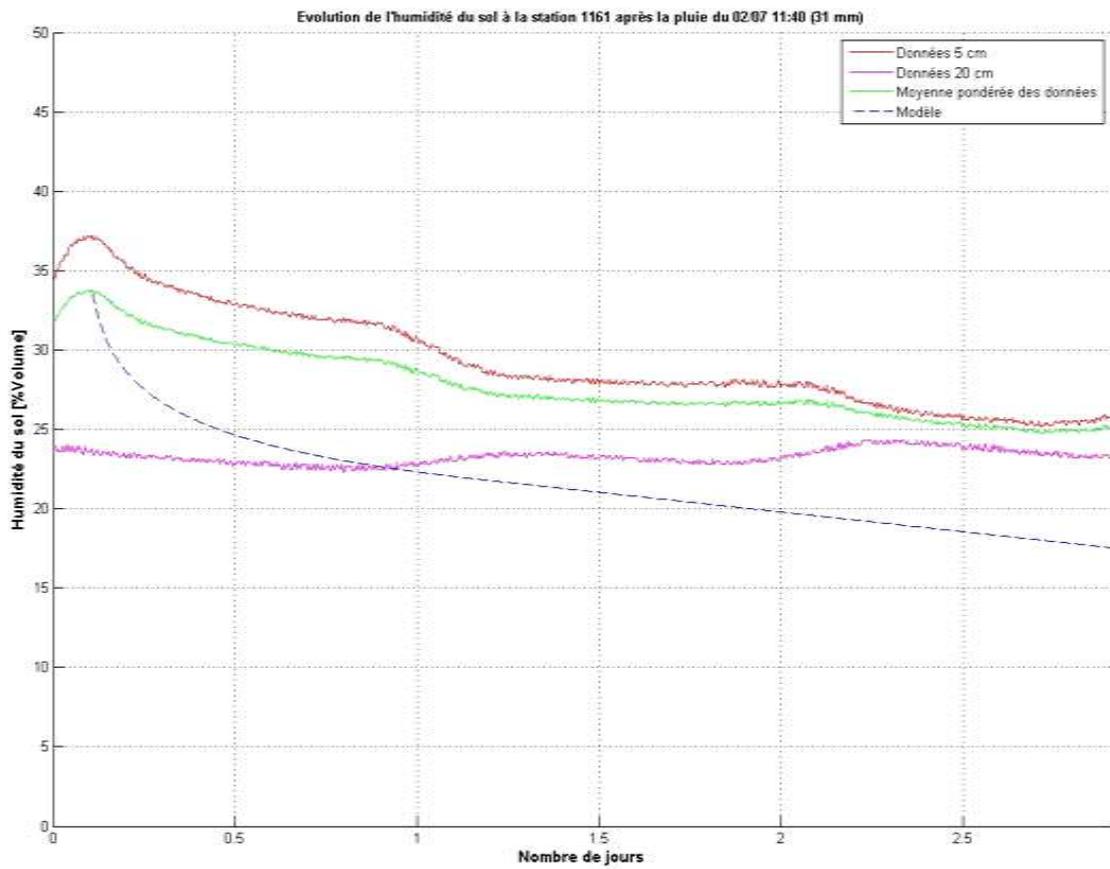
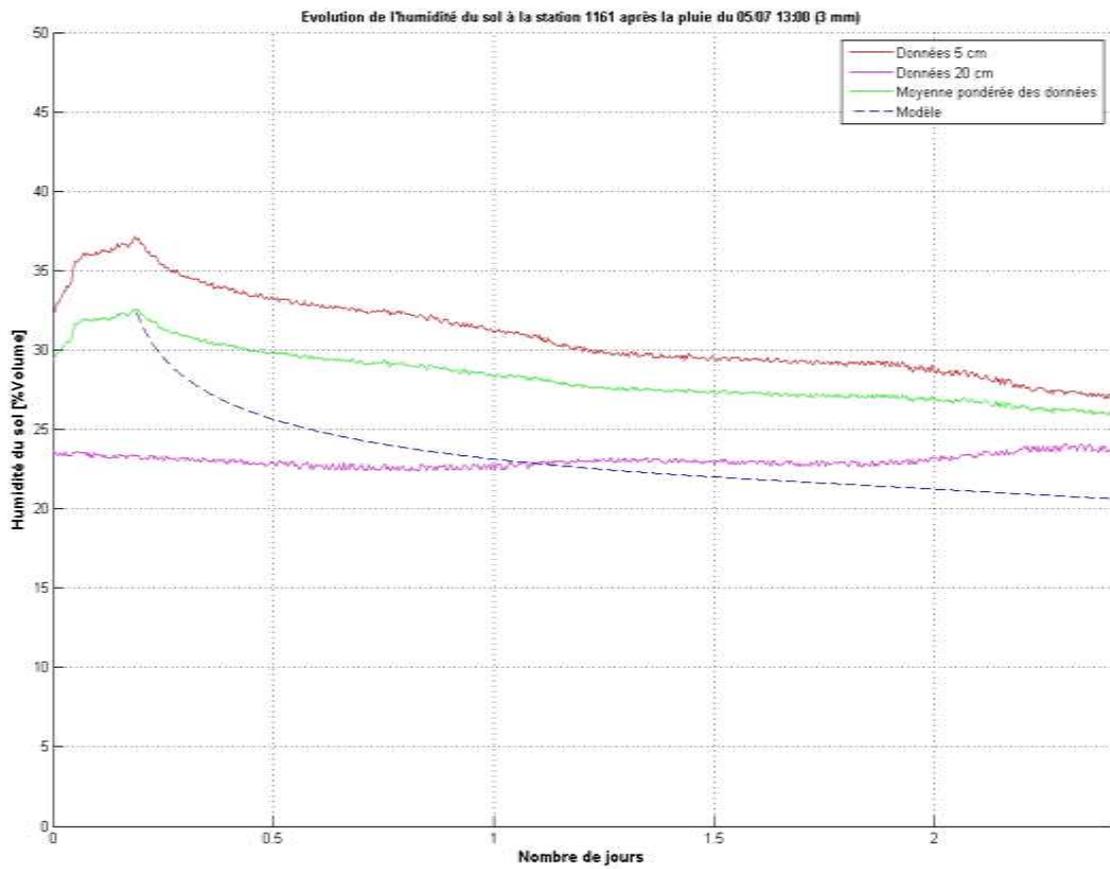


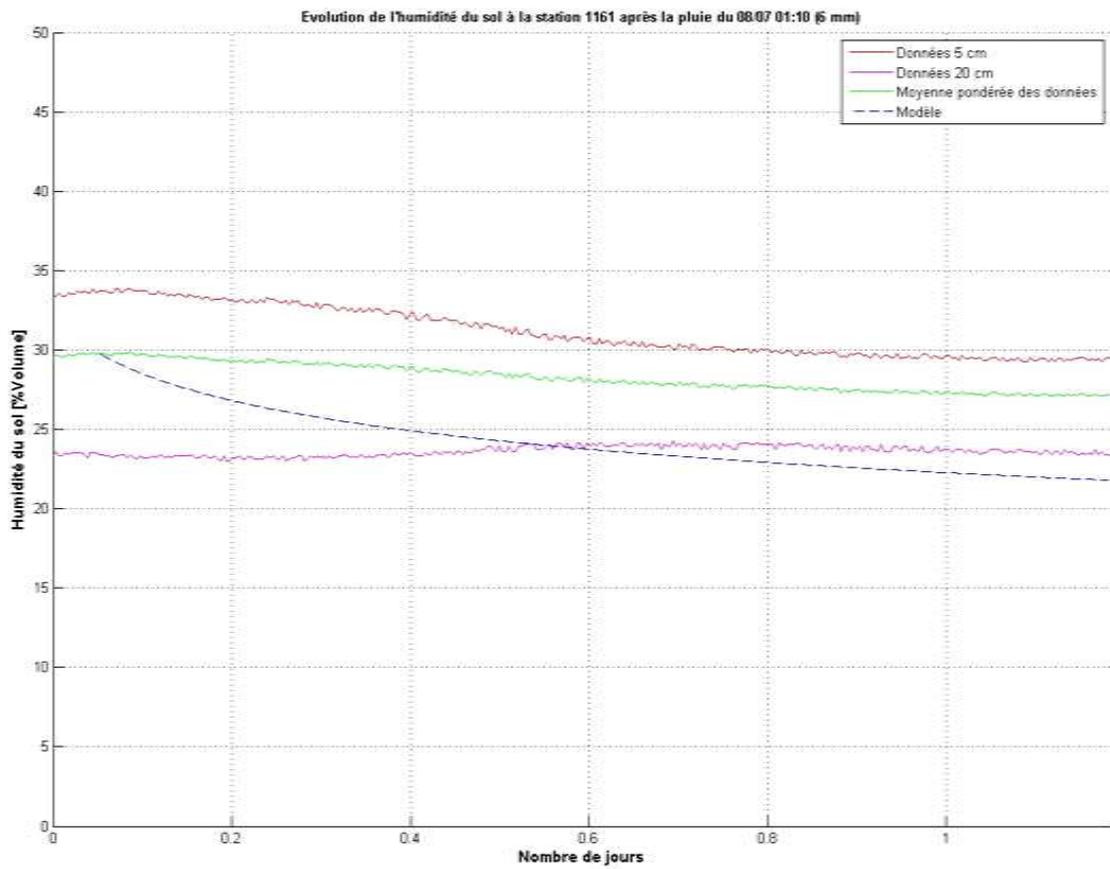
Figure 22 Modèle d'assèchement du sol après la pluie du 2 juillet- station 1161

$E_{\max}$  [mm/jour] 0.415  
 $Z_r$  [cm] 16.734



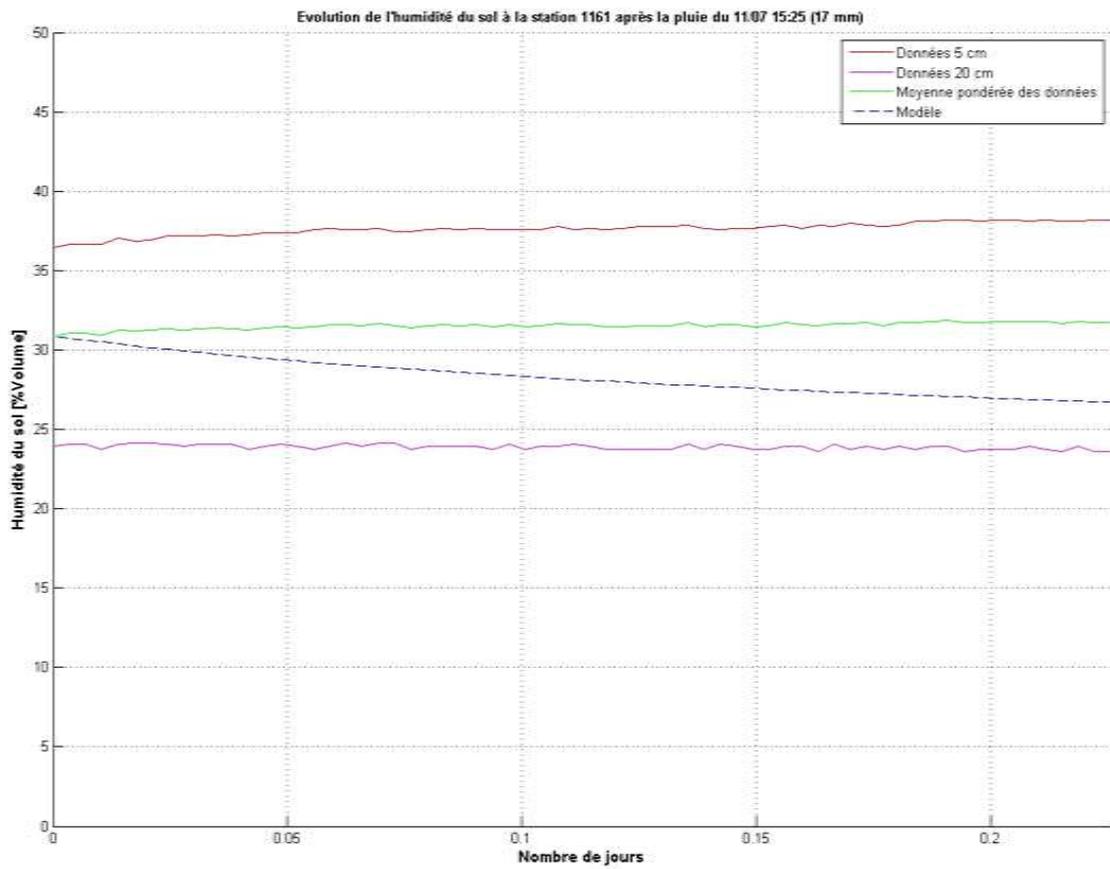
**Figure 23** Modèle d'assèchement du sol après la pluie du 5 juillet- station 1161

$E_{\max}$  [mm/jour] 0.280  
 $Z_r$  [cm] 18.612



**Figure 24** Modèle d'assèchement du sol après la pluie du 8 juillet- station 1161

$E_{\max}$  [mm/jour] 0.498  
 $Z_r$  [cm] 20.256



**Figure 25** Modèle d'assèchement du sol après la pluie du 11 juillet- station 1161

$E_{\max}$  [mm/jour] 0.129  
 $Z_r$  [cm] 22.477

### c) Résultats

Le modèle sous-estime globalement l'humidité du sol de 18% en moyenne par rapport aux données -Tableau 8- (on ne tient pas compte des modélisations pour moins de 1 jour de données : en effet compte tenu de la très courte période de simulation et des fluctuations des données au cours de la journée –paragraphe V.B.3-, la différence entre le modèle et les données n'est pas représentative du fonctionnement du modèle).

Après la pluie du...	Différence moyenne $\theta_{\text{modèle}} - \theta_{\text{données}}$ sur la période d'assèchement [%]	Différence $\theta_{\text{modèle}} - \theta_{\text{données}}$ à la fin de la période d'assèchement [%]	Durée de la période d'assèchement [j]
2 juillet Figure 39	-22.4	-30.7	2.9
5 juillet 13h00 Figure 41	-17.5	-20.5	2.4
8 juillet Figure 24	-14.2	-19.5	1.2
<b>Moyenne pour toutes les périodes d'assèchement</b>	<b>-18.0</b>	<b>-23.5</b>	<b>2.2</b>

Tableau 8 Résultats du modèle d'assèchement-1161

Pour la dernière pluie (Figure 25) les données semblent montrer une augmentation de l'humidité du sol après la pluie, pour les deux profondeurs ainsi que pour la moyenne pondérée. Ces données ne sont pas nécessairement incohérentes : il faut noter que la fin de cette période est 0.2 jours après la pluie, soit environ 5 heures. Il semble donc, d'après les données, que le sol continue de réagir à la pluie. On ne tient donc pas compte du modèle d'assèchement du sol pour cette période.

Il peut y avoir 2 raisons principales à cette grande différence :

- Le modèle n'est pas adapté pour ce type de données
- Les capteurs ne rendent pas compte de la réalité (ce qui confirmerait l'hypothèse d'une forte inertie de ces capteurs, à cause par exemple d'une bulle d'air).

L'étude au paragraphe V.C des données d'une station dont les données ne sont pas source de contestations permet de conclure plus précisément sur la question.

## 2. Humidité du sol à la station 1160

Les données d'humidité du sol de la station 1160 sont représentées sur la Figure 26. Les données des capteurs à 20 et 35 cm ont été isolées (Figure 27) pour plus de clarté.

Le capteur à 50 cm semble avoir mal fonctionné jusqu'au 10 juin environ.

### a) Discussion sur la fiabilité des données de la station 1160

A partir de 50 cm, les données témoignent d'une humidité constante sur toute la période.

Globalement, les capteurs semblent réagir faiblement aux variations d'humidité du sol : le capteur superficiel met plus de 24 heures pour atteindre un maximum de teneur en eau après la pluie du 1<sup>er</sup> juin

Là encore, on considèrera que la forte inertie du capteur à 20cm de la station 1007, en comparaison avec la station 1007 (Figure 28) peut être expliquée par les différences (plus marquées que pour la station 1161) des teneurs en argiles, sables et limons avec la station 1007.

	1007 (échantillons du 29.11.2009)	1160
	15 cm	20 cm
Argiles [%]	4.7	10.3
Limons [%]	12.4	22.7
Sables [%]	83	67.0

**Tableau 9** Comparaison des teneurs en argiles, sables et limons aux stations 1160 et 1007

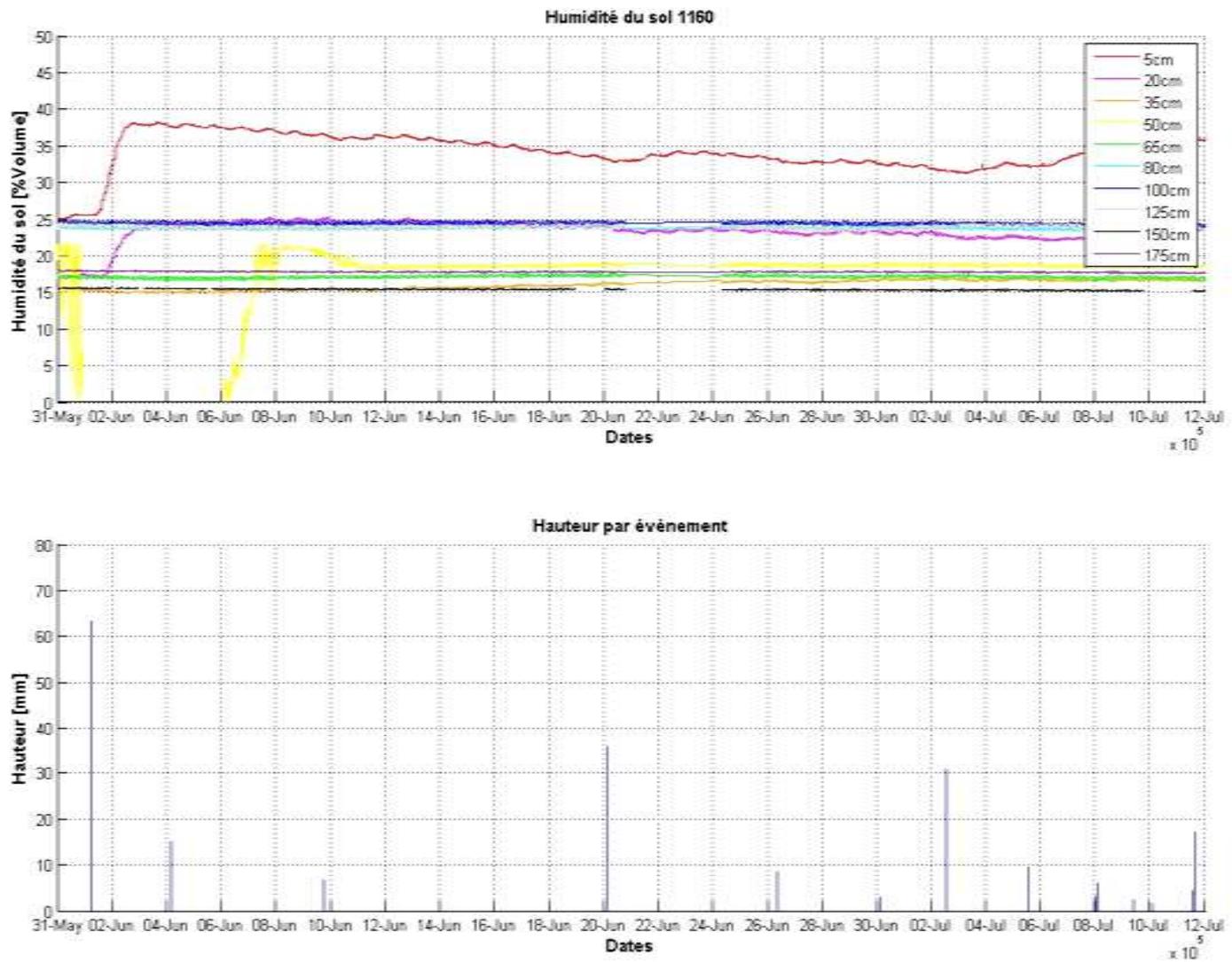


Figure 26 Evolution de l'humidité du sol du 31 mai au 12 juillet, 1160

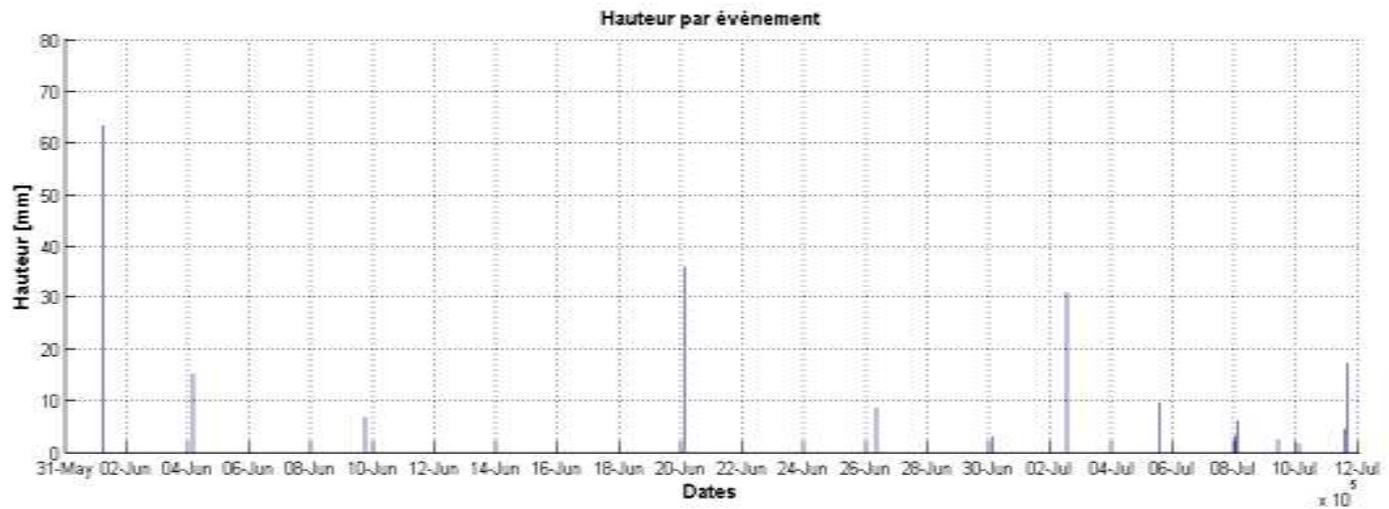
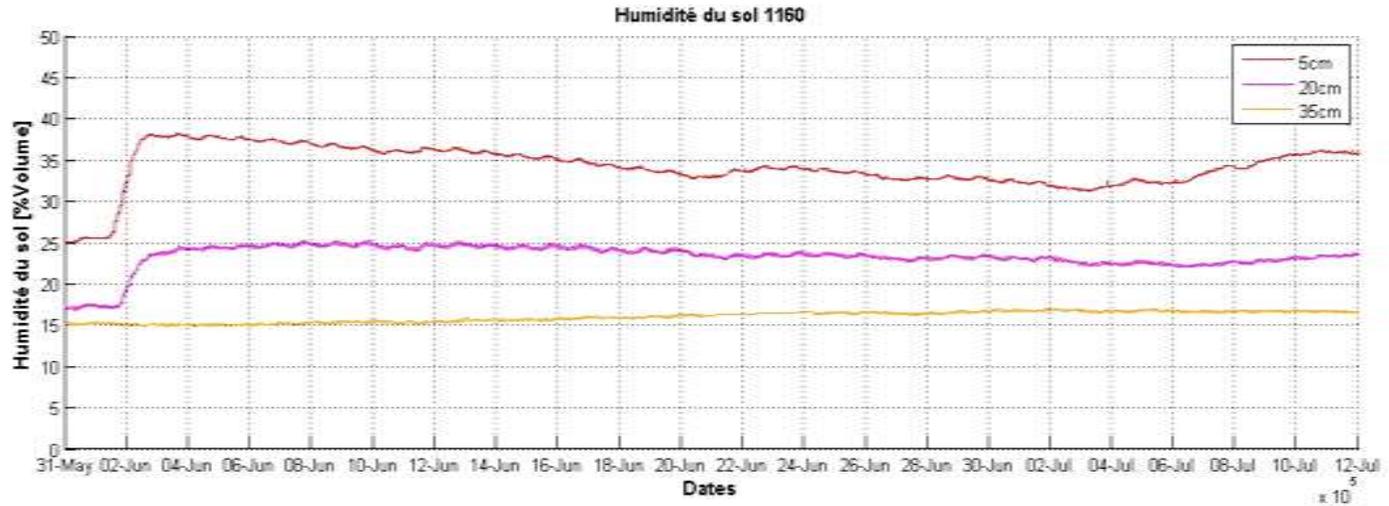


Figure 27 Evolution de l'humidité du sol du 31 mai au 12 juillet à 5, 20 et 35 cm, 1160

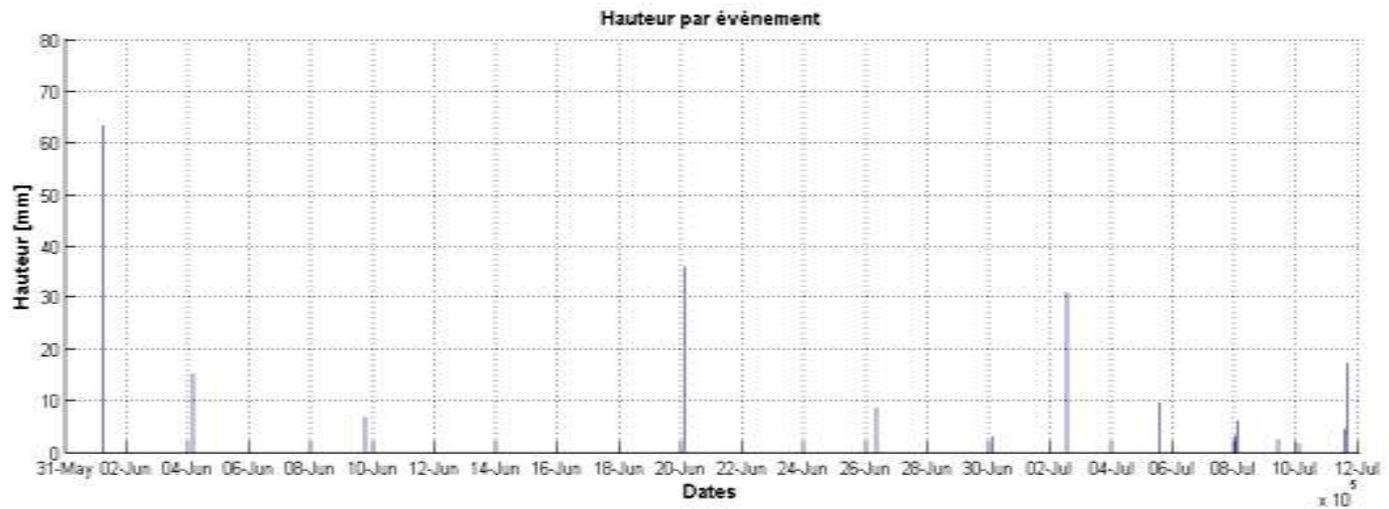
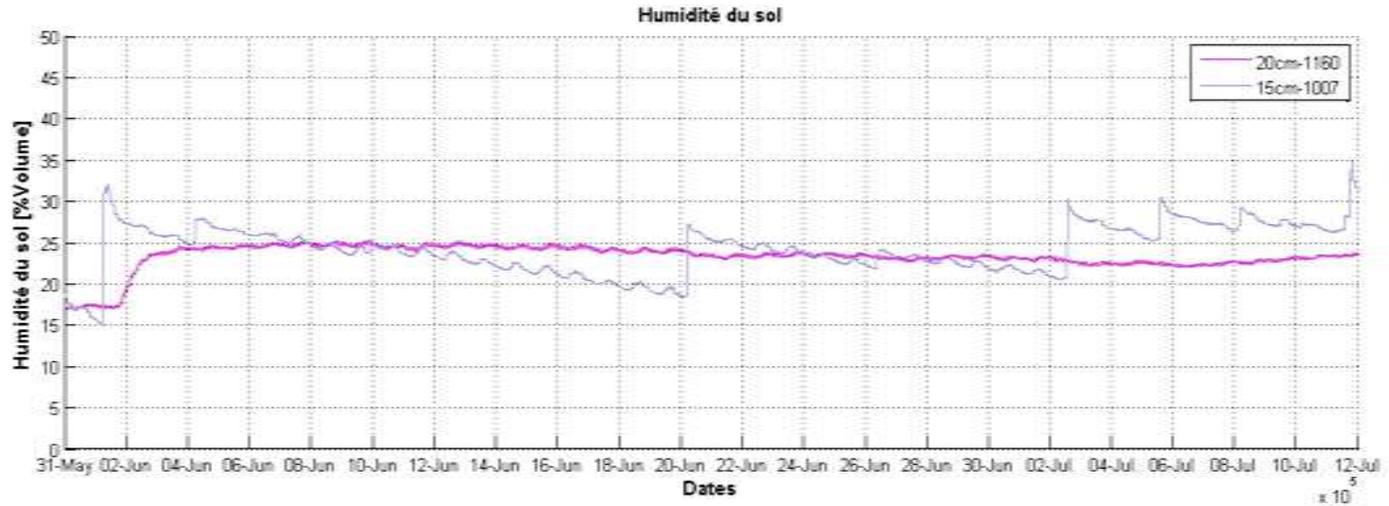


Figure 28 Comparaison des données à 20cm de la station 1160 et à 15 cm de la station 1007

b)      Modèle d'assèchement du sol

Le sol de la station 1160 n'a finalement pas été cultivé, par décision de la famille propriétaire de la parcelle. Il n'est donc pas possible d'étudier le modèle d'assèchement du sol pour cette station ( $Z_r = 0$  pour toute la période).

### 3. *Observation générale sur le comportement des capteurs en surface lors d'une pluie*

Lors d'une pluie, les capteurs à 5 cm et 20 cm des stations 1160 et 1161 ont un comportement similaire lorsqu'ils ne réagissent pas : on constate une légère baisse de l'humidité du sol mesurée (Figure 29).

Ce type de capteur est en réalité affecté par la température du sol (Scott et al, *in press*). Les fluctuations journalières observées sont également dues à ce comportement des capteurs. C'est donc la baisse de température du sol lors d'une pluie qui est à l'origine de la baisse observée. Il faudrait pouvoir écarter les fluctuations, mais aucune méthode n'existe pour le moment. Par défaut, on choisit de ne pas corriger les données.

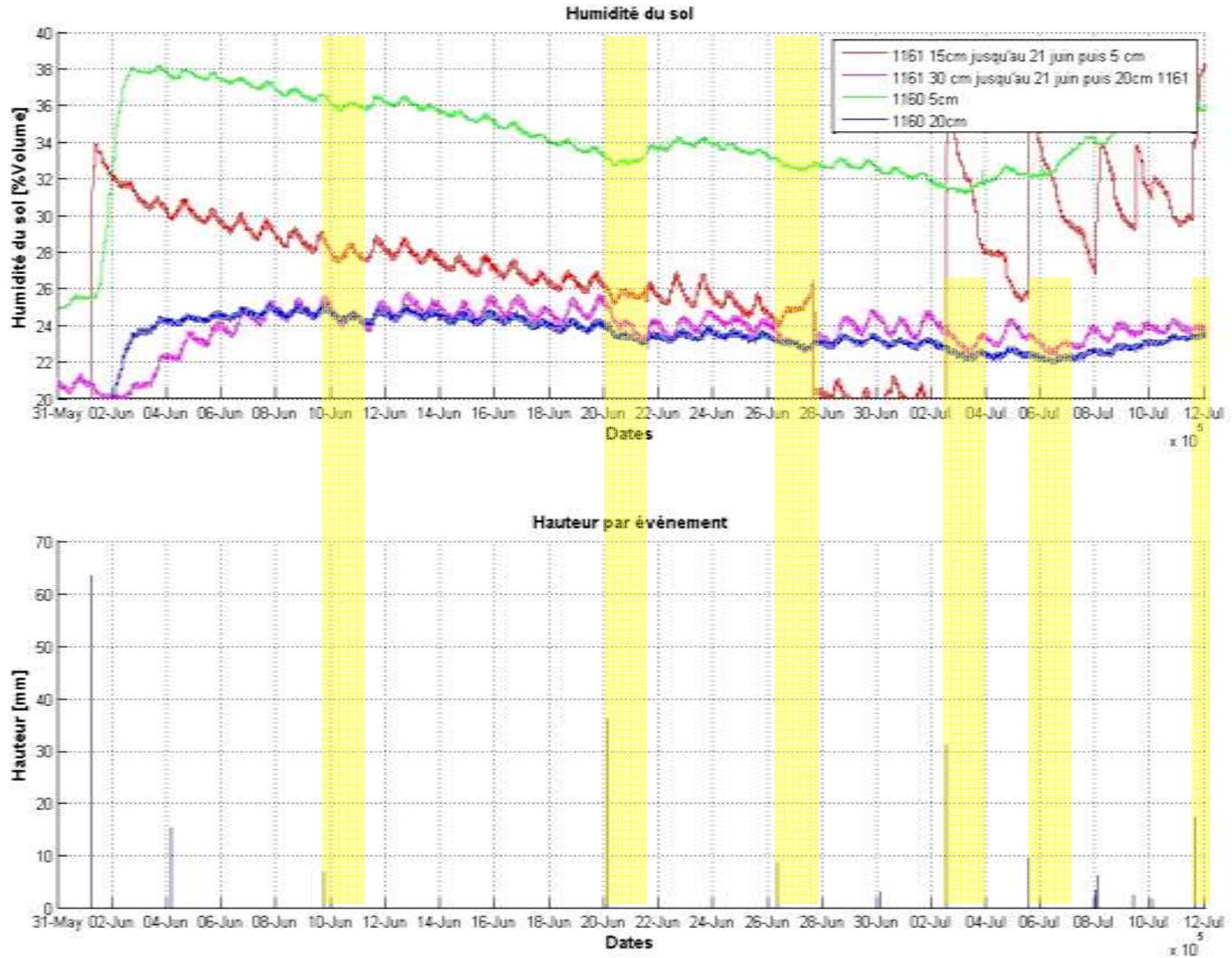


Figure 29 Evolution de l'humidité du sol pour les capteurs superficiels des stations 1160 et 1161 du 30 mai au 12 juillet

## C. Données d'une autre station du bassin versant : la station 1007

### 1. Choix de la station 1007

La station Sensorscope 1007 est située sur le même versant que les stations 1160 et 1161. Le relief local et le type de sol sont très proches de ceux de la 1161. La station 1007, comme les autres stations du bassin versant (excepté 1160 et 1161) ne dispose que de deux profondeurs de mesure : 5 et 15 cm.

	1007 (échantillons du 29.11.2009)		1160	1161		
	15 cm	30 cm	5 cm	20 cm	5 cm	20 cm
Argiles [%]	4.7	3.8	7.1	10.3	-	7.7
Limons [%]	12.4	10.5	20.1	22.7	-	11.0
Sables [%]	83	85.7	72.8	67.0	-	81.3

**Tableau 10 Comparaison des teneurs en Argiles, Limons et Sables aux stations 1007 1160 1161**

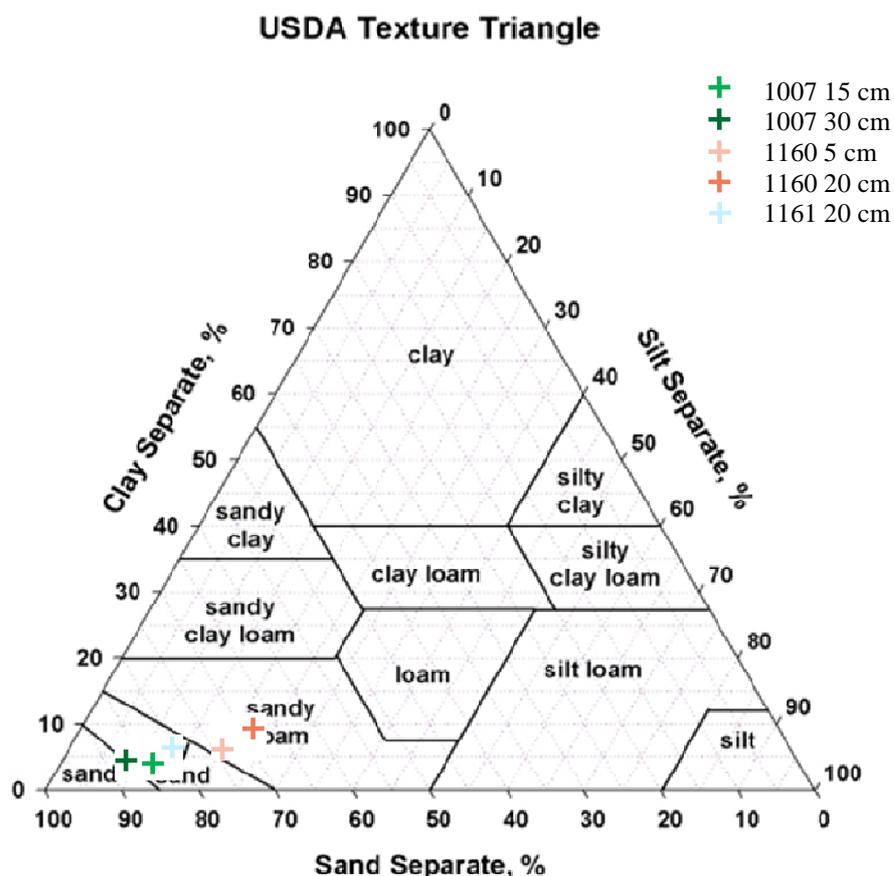


Figure 30 Comparaison des textures pour les 3 stations, classification USDA<sup>1</sup>

$\theta_h$	$\theta^*$	$\theta_{fc}$	$\theta_w$	$\beta$	$n$	$K_s$ [cm/day]
0.08	0.31	0.52	0.11	12.7	0.42	100

Tableau 11 Paramètres de sol utilisés pour la station 1007

Il n'existe pas de données de ruissellement et d'interception à cette station (les seules équipées étant les stations 1160 et 1161).

Le sol n'est pas cultivé au dessus des capteurs (pour la station 1161, nous avons nous-mêmes cultivé le sol au dessus des capteurs, les agriculteurs préférant ne pas risquer d'endommager les installations ; les abords immédiats d'aucune autre station du bassin versants ne sont cultivés) ; La porosité, la conductivité hydraulique, la profondeur racinaire et la végétation sont donc très différents des stations 1160 et 1161. Les données d'humidité du sol, d'interception et de ruissellement de ces deux stations, ne sont donc pas transposables aux données de la station 1007.

L'absence de culture à la station 1007 n'empêche pas d'appliquer le modèle d'assèchement à ce sol puisque, contrairement à la station 1160, le sol est pourvu de végétation naturelle.

<sup>1</sup> Source : [www.wtamu.edu](http://www.wtamu.edu), Consulté le 14.07.2010

La profondeur moyenne des racines des végétaux le 11 juillet était de 20 cm (Figure 31).

Aucune mesure de ce paramètre n'ayant été faite avant le 11 juillet, on fixera  $Z_r=20$  cm sur toute la période.



**Figure 31 Végétation et mesure des racines à la station 1007, 11 juillet**

## 2. *Humidité du sol à la station 1007*

### a) Données

Les données d'humidité du sol pour la période d'étude sont représentées sur la Figure 32.

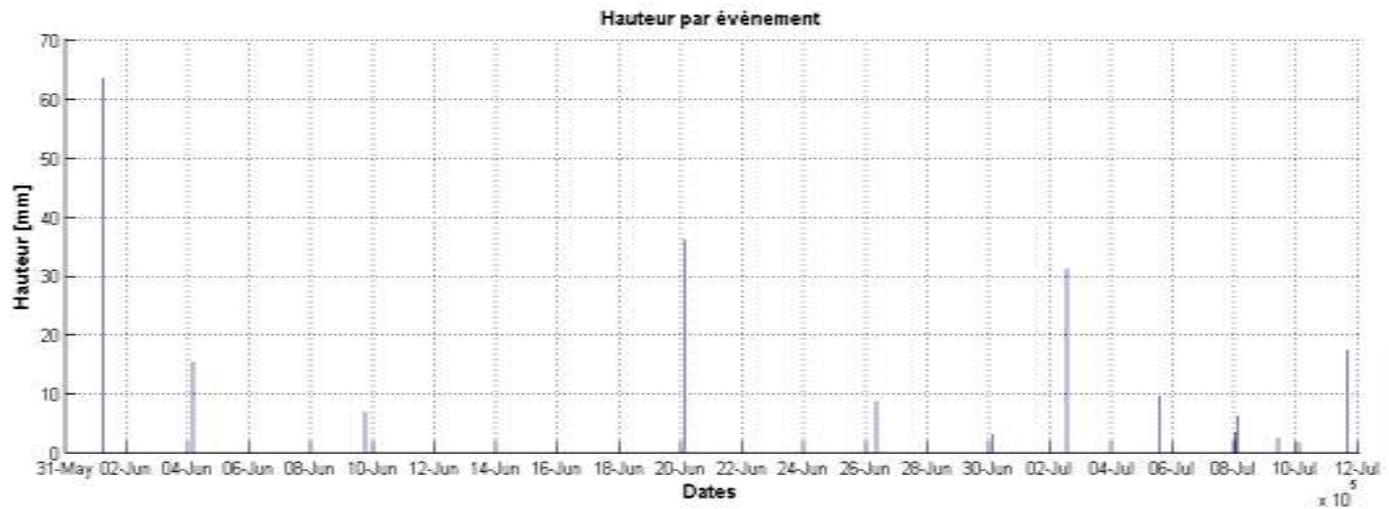
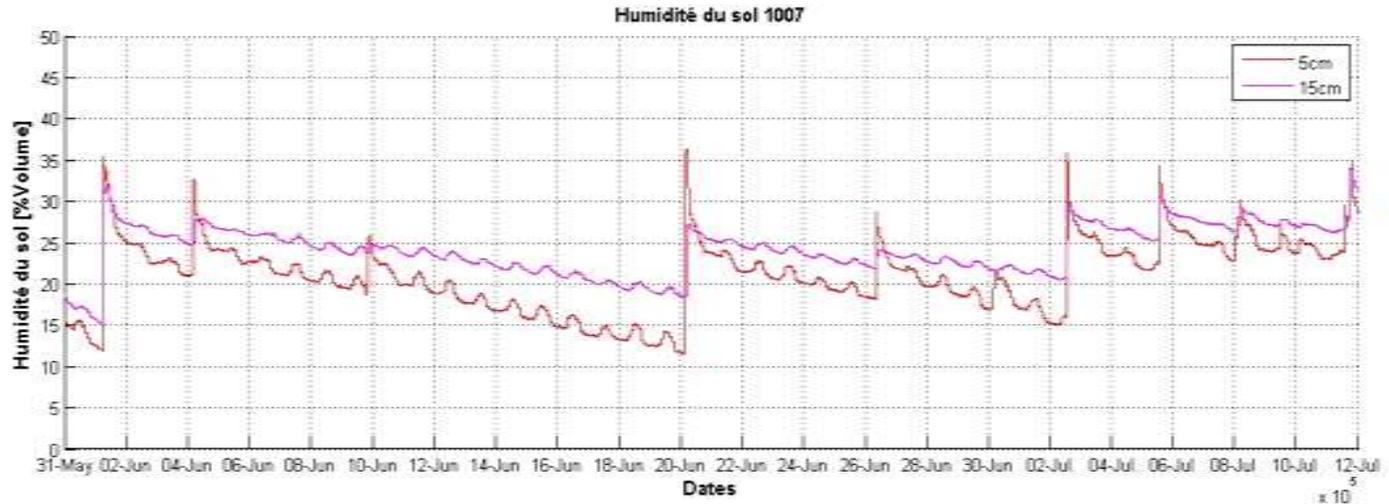


Figure 32 Evolution de l'humidité du sol du 30 mai au 12 juillet-station 1007

## b) Modèle d'assèchement du sol

On a défini de façon arbitraire une « réaction » comme expliqué au paragraphe B.1.b). Le capteur placé à 5 cm a réagi à toutes les pluies de plus de 3 mm.

Comme il a été expliqué au paragraphe II.C,  $E_{max}$  correspond à la valeur maximale de l'évapotranspiration journalière, pour chaque période d'assèchement. On propose de fixer  $Z_r$  à 20 cm (profondeur racinaire mesurée) ; il faudra alors tenir compte du fait qu'en réalité,  $Z_r$  est inférieur à 20 cm au début de la période de mesures (les racines sont très peu profondes lorsque la plante est petite, comme c'est le cas au début de la saison des pluies). Comme pour la station 1161, il n'a pas été nécessaire de pondérer les valeurs des paramètres du sol (homogénéité de la texture : voir Figure 30).

La « Moyenne pondérée des données » correspond à l'humidité du sol théorique sur la profondeur racinaire, telle qu'expliquée dans la partie II.C.

Le temps  $t=0$  correspond au temps immédiatement après la fin de la pluie. Le dernier temps correspond au temps juste avant le début de la pluie suivante, sauf pour le dernier graphique (Figure 44), puisque la période considérée s'arrête le 12 juillet à minuit.

A cause du retard de réponse du sol par rapport à la fin de la pluie, on commence le modèle pour un  $\theta_0$  égal au maximum, et non égal au  $\theta$  juste après la fin de la pluie.

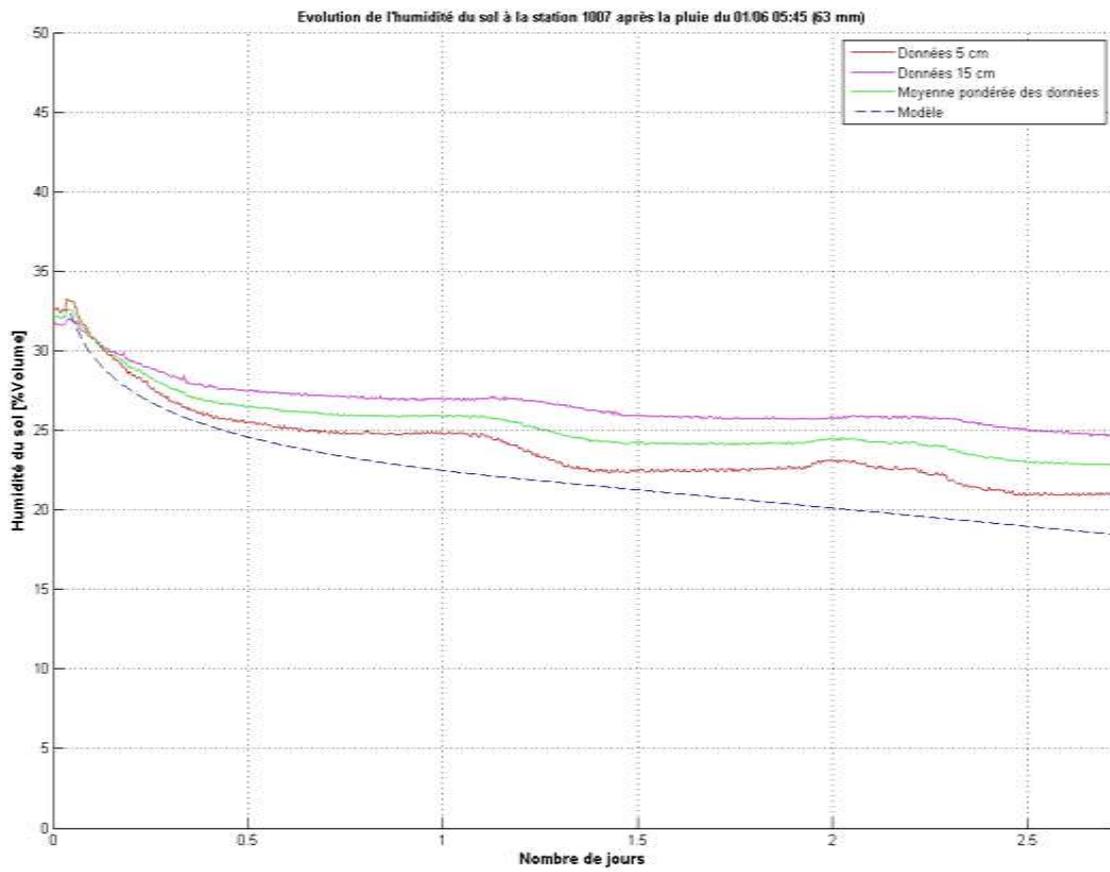


Figure 33 Modèle d'assèchement du sol après la pluie du 1 juin station 1007

$E_{\max}$  [mm/jour] 0.458  
 $Z_r$  [cm] 20

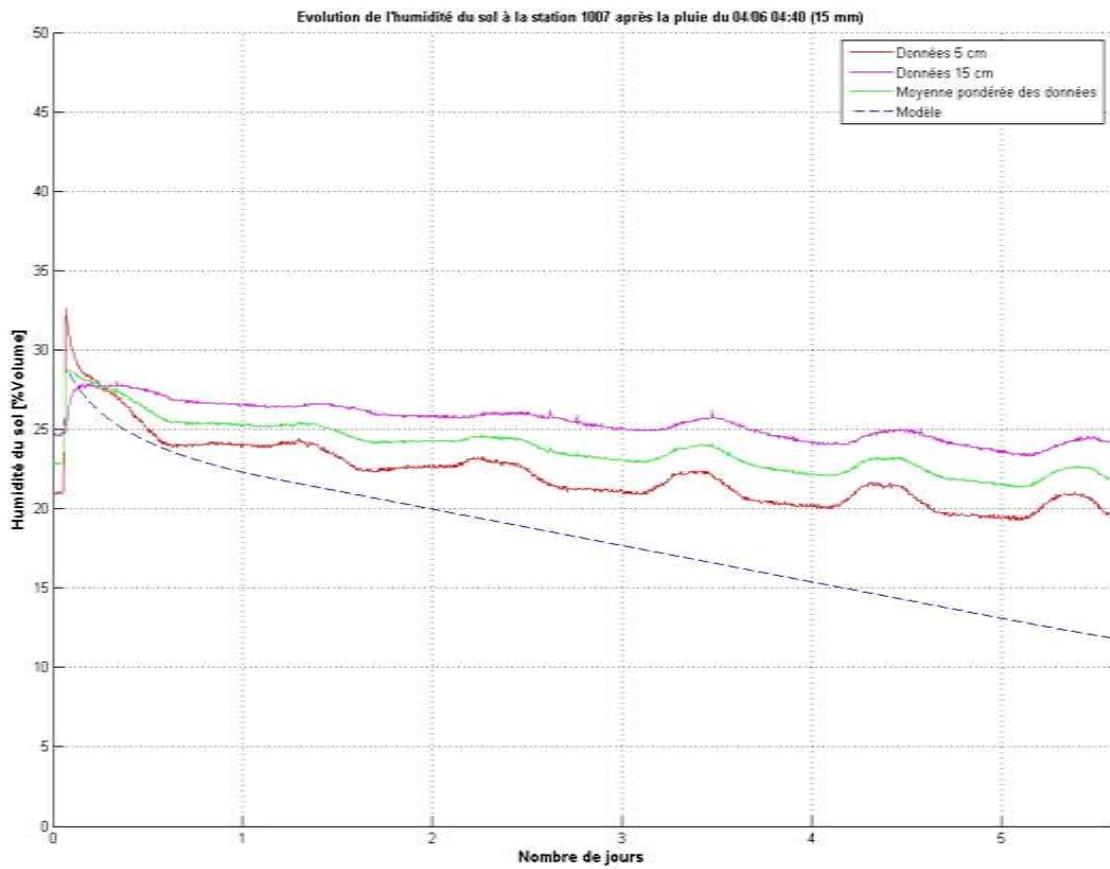
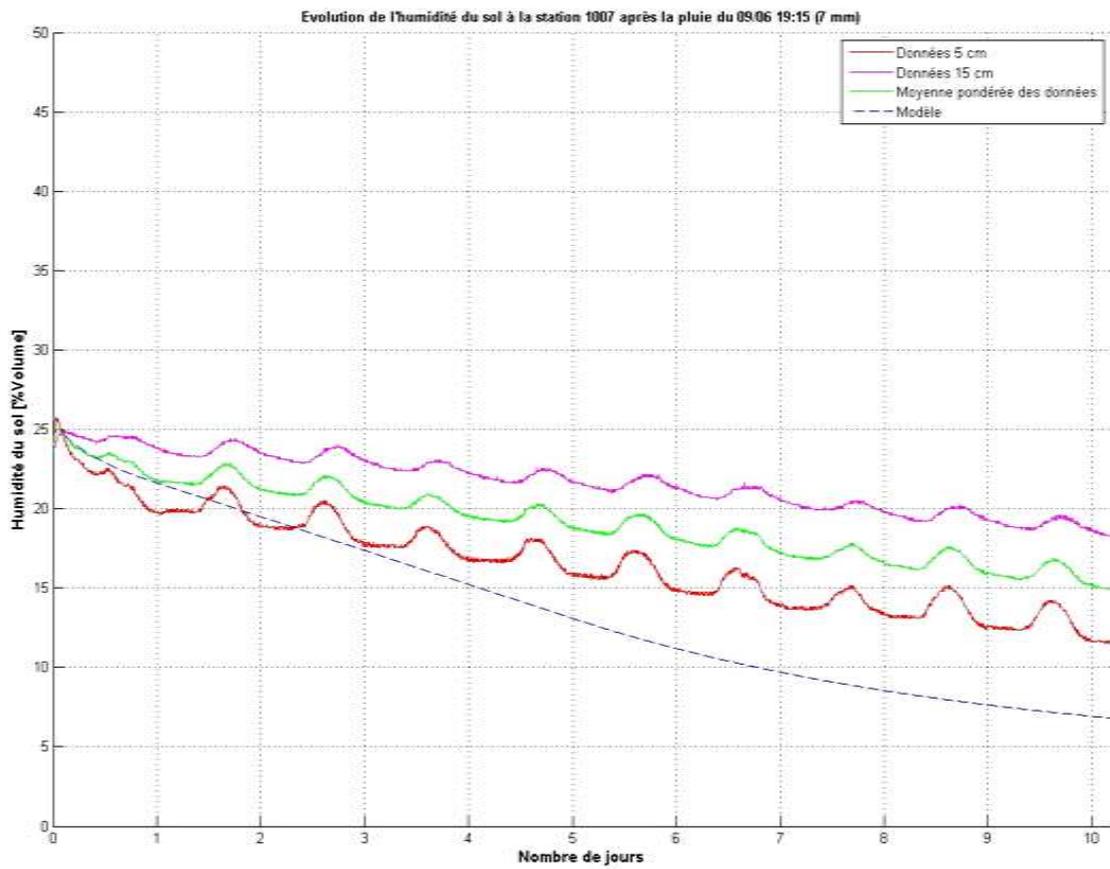


Figure 34 Modèle d'assèchement du sol à la après la pluie du 4 juin-station 1007

$E_{\max}$  [mm/jour] 0.458  
 $Z_r$  [cm] 20



**Figure 35** Modèle d'assèchement du sol après la pluie du 9 juin-station 1007

$E_{\max}$  [mm/jour] 0.423  
 $Z_r$  [cm] 20

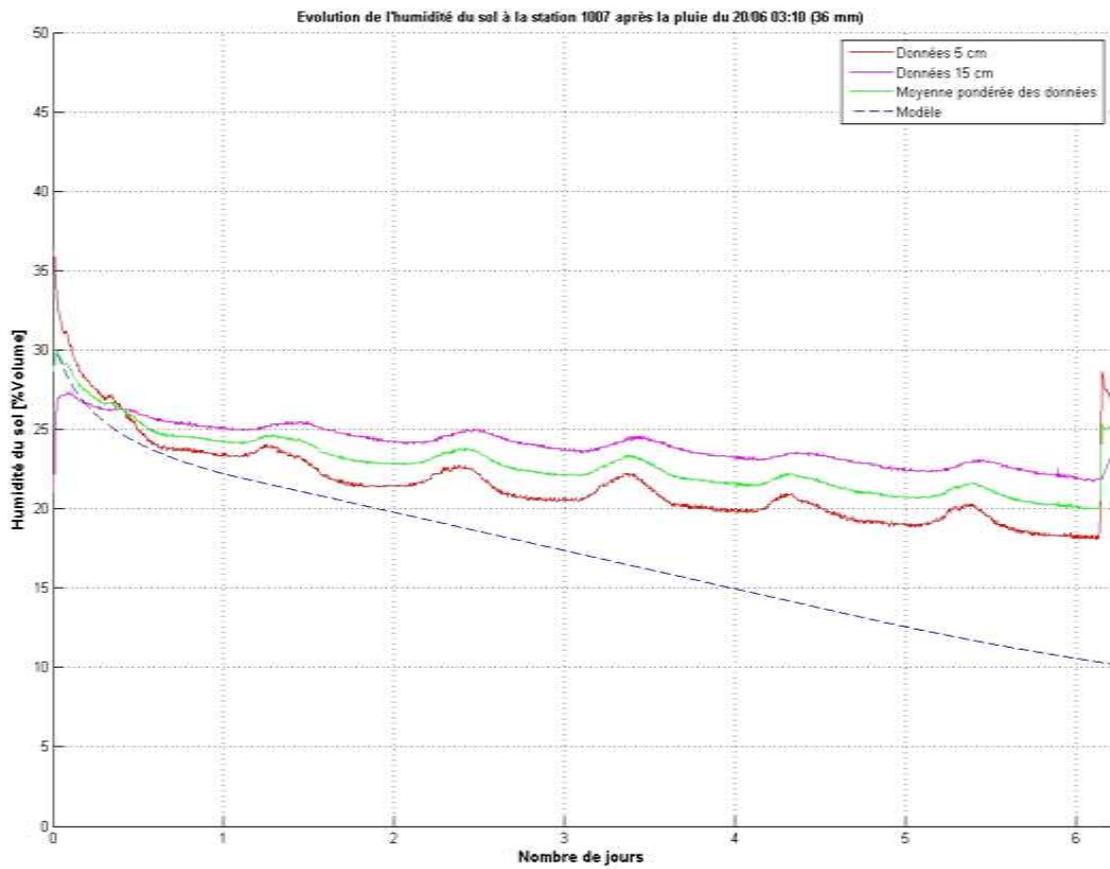


Figure 36 Modèle d'assèchement du sol après la pluie du 20 juin-station 1007

$E_{\max}$  [mm/jour] 0.482  
 $Z_r$  [cm] 20

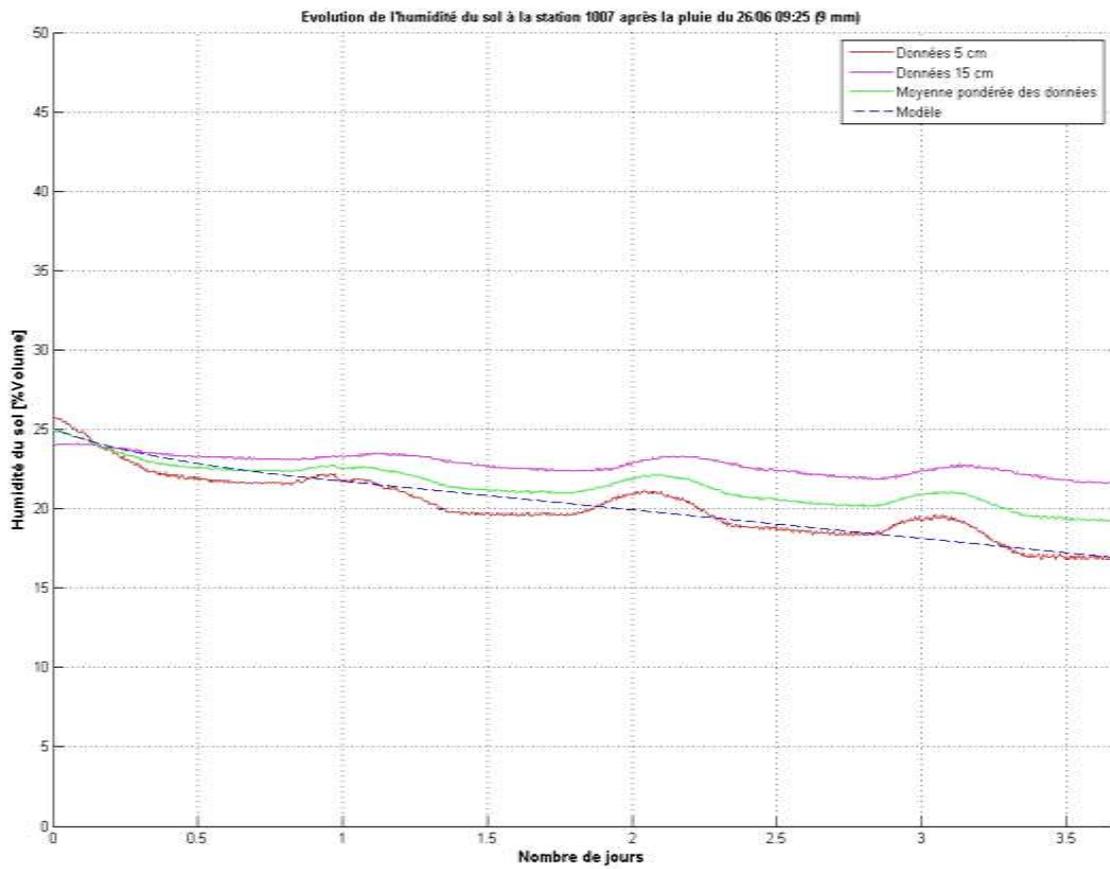


Figure 37 Modèle d'assèchement du sol après la pluie du 26 juin-station 1007

$E_{\max}$  [mm/jour] 0.361  
 $Z_r$  [cm] 20

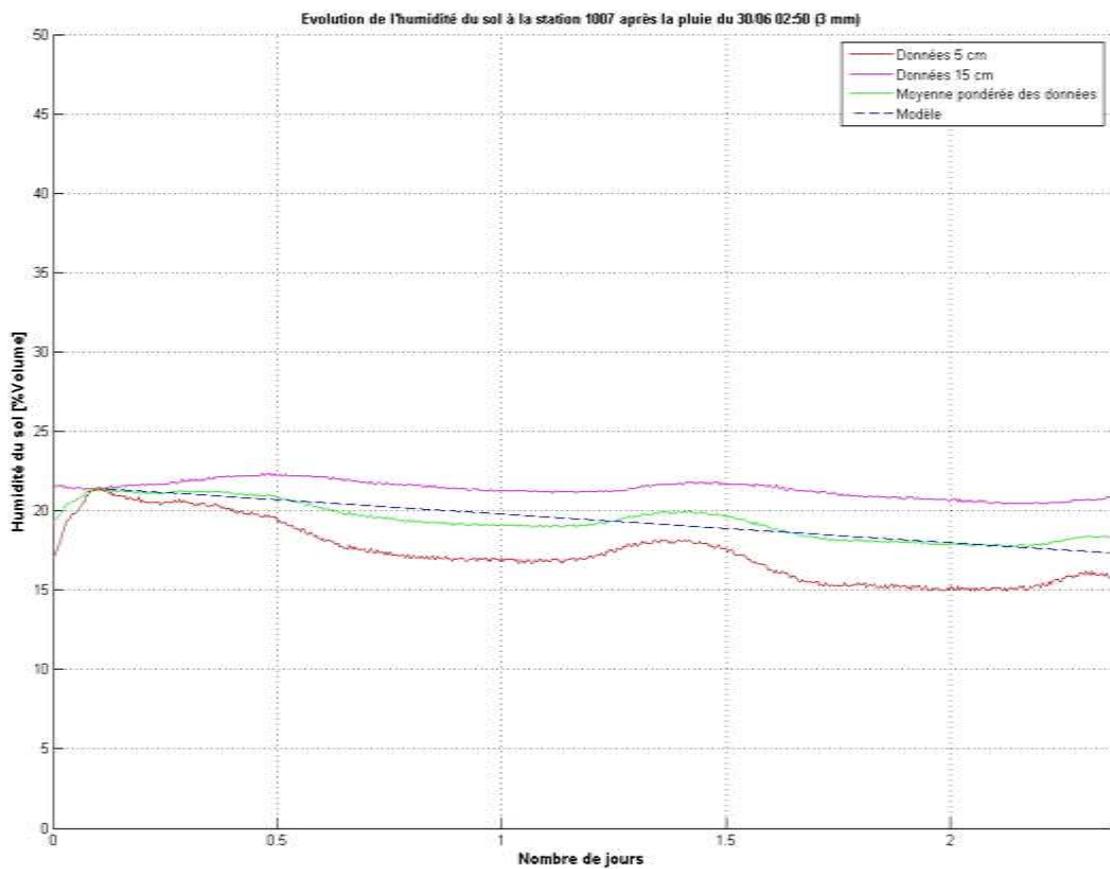


Figure 38 Modèle d'assèchement du sol après la pluie du 30 juin-station 1007

$E_{\max}$  [mm/jour] 0.361  
 $Z_r$  [cm] 20

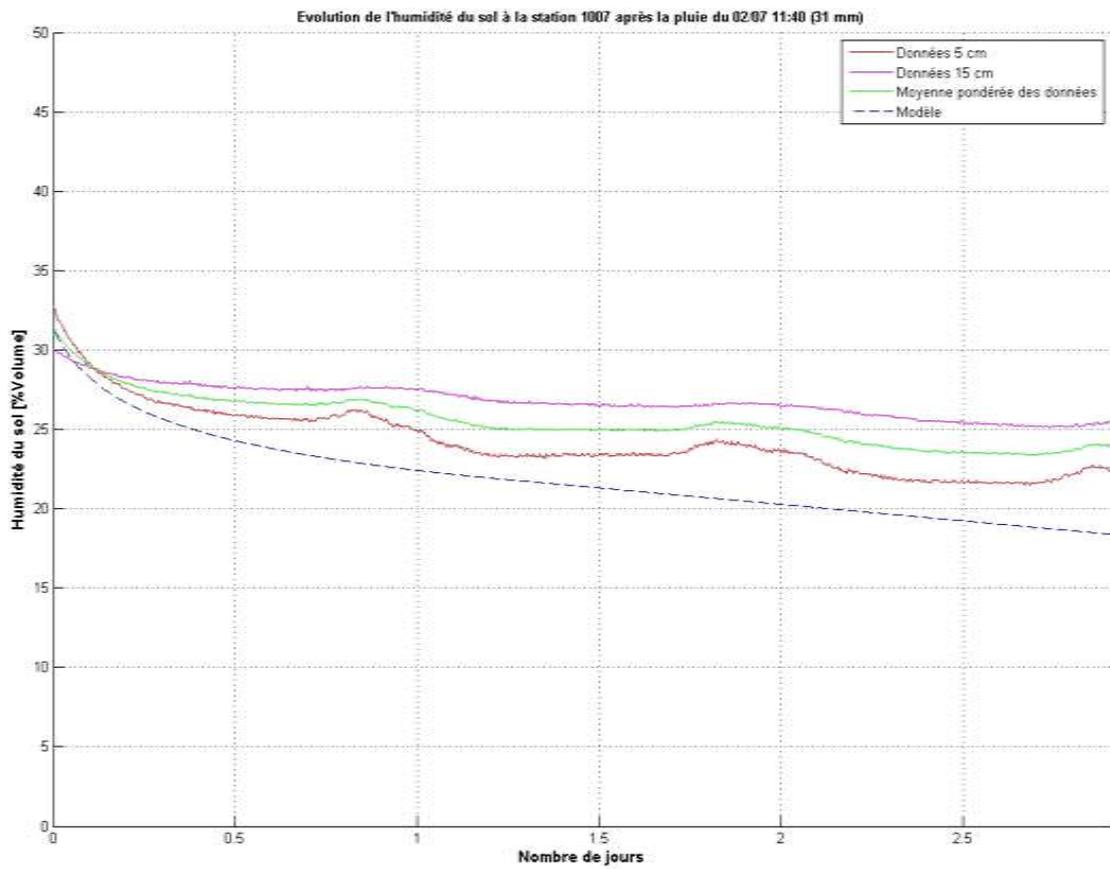


Figure 39 Modèle d'assèchement du sol après la pluie du 2 juillet-station 1007

$E_{\max}$  [mm/jour] 0.415  
 $Z_r$  [cm] 20

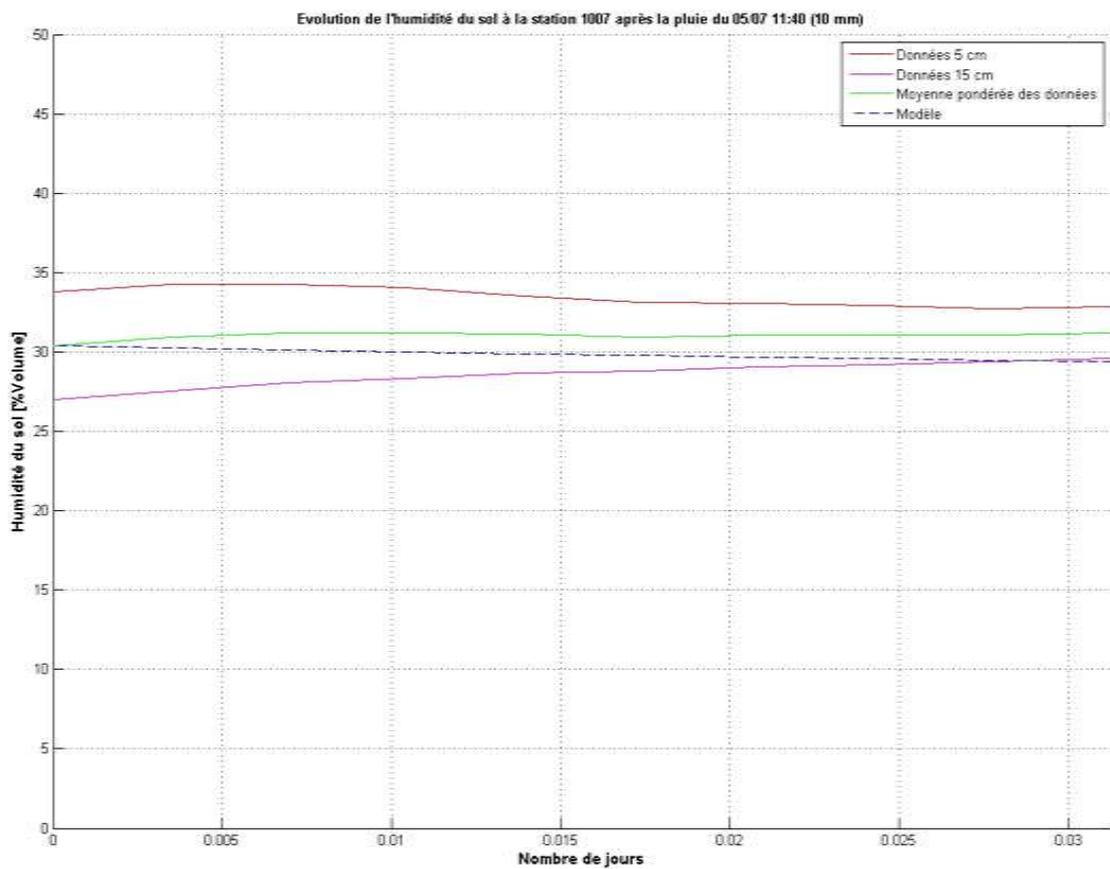


Figure 40 Modèle d'assèchement du sol après la première pluie du 5 juillet-station 1007

$E_{\max}$  [mm/jour] 0.169  
 $Z_r$  [cm] 20

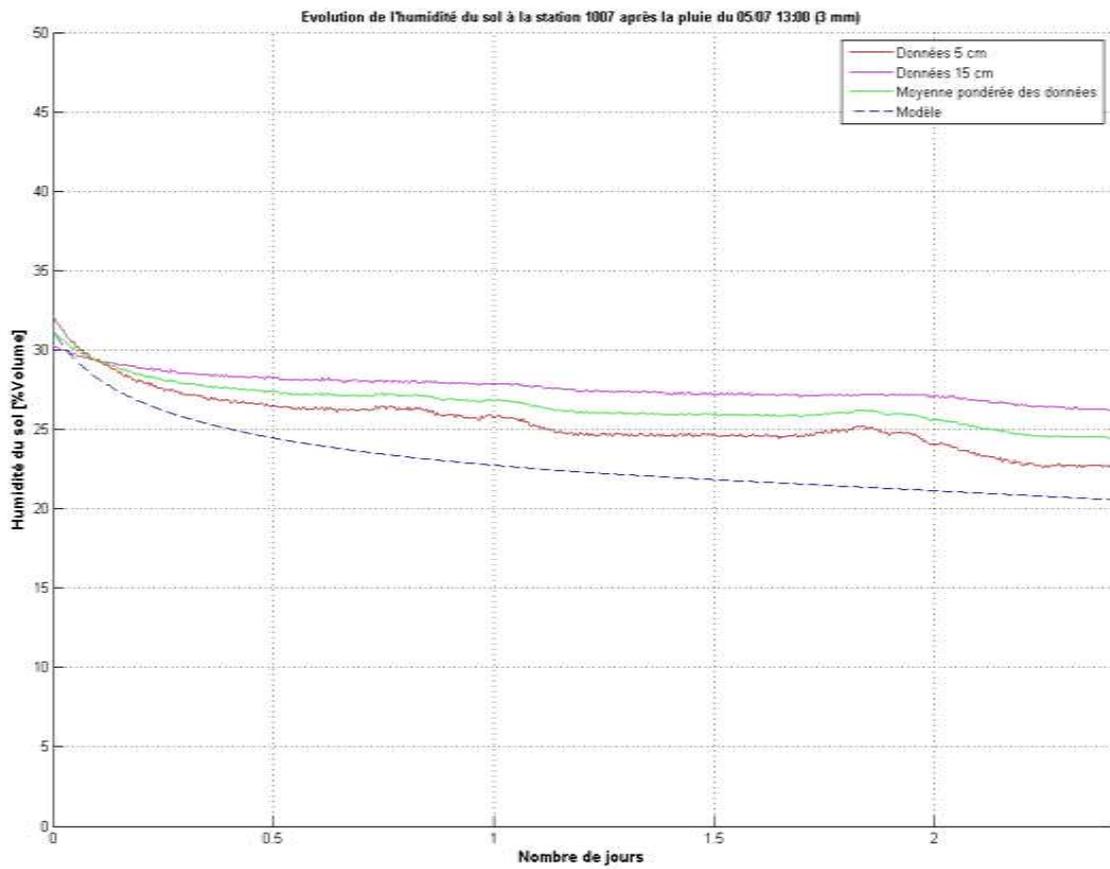


Figure 41 Modèle d'assèchement du sol après la deuxième pluie du 5 juillet-station 1007

$E_{\max}$  [mm/jour] 0.280  
 $Z_r$  [cm] 20

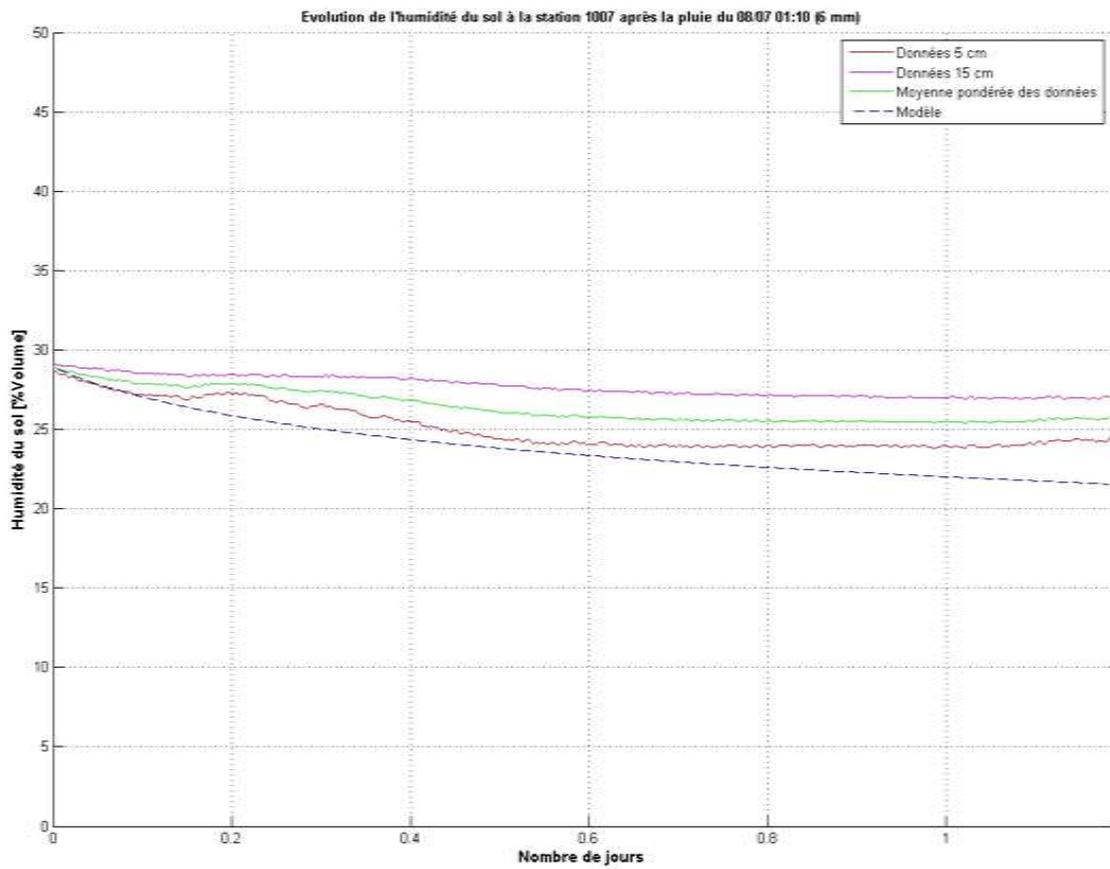
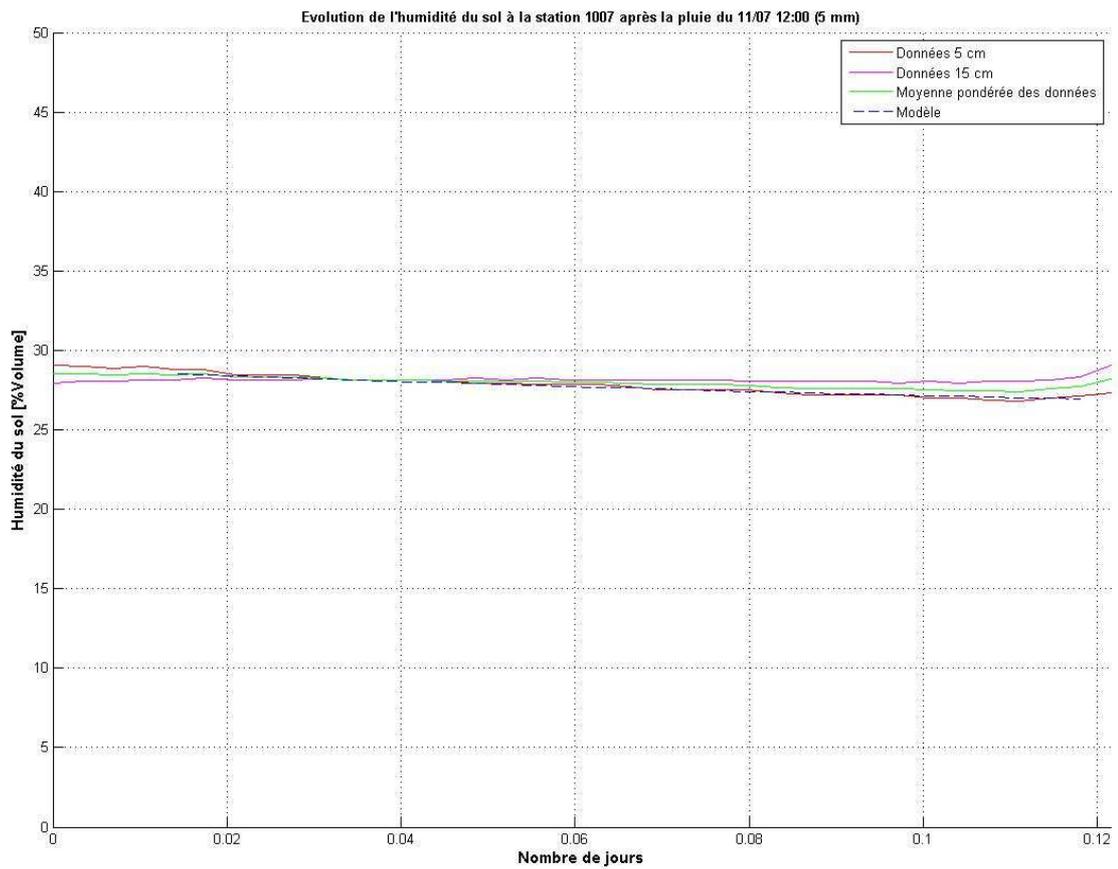


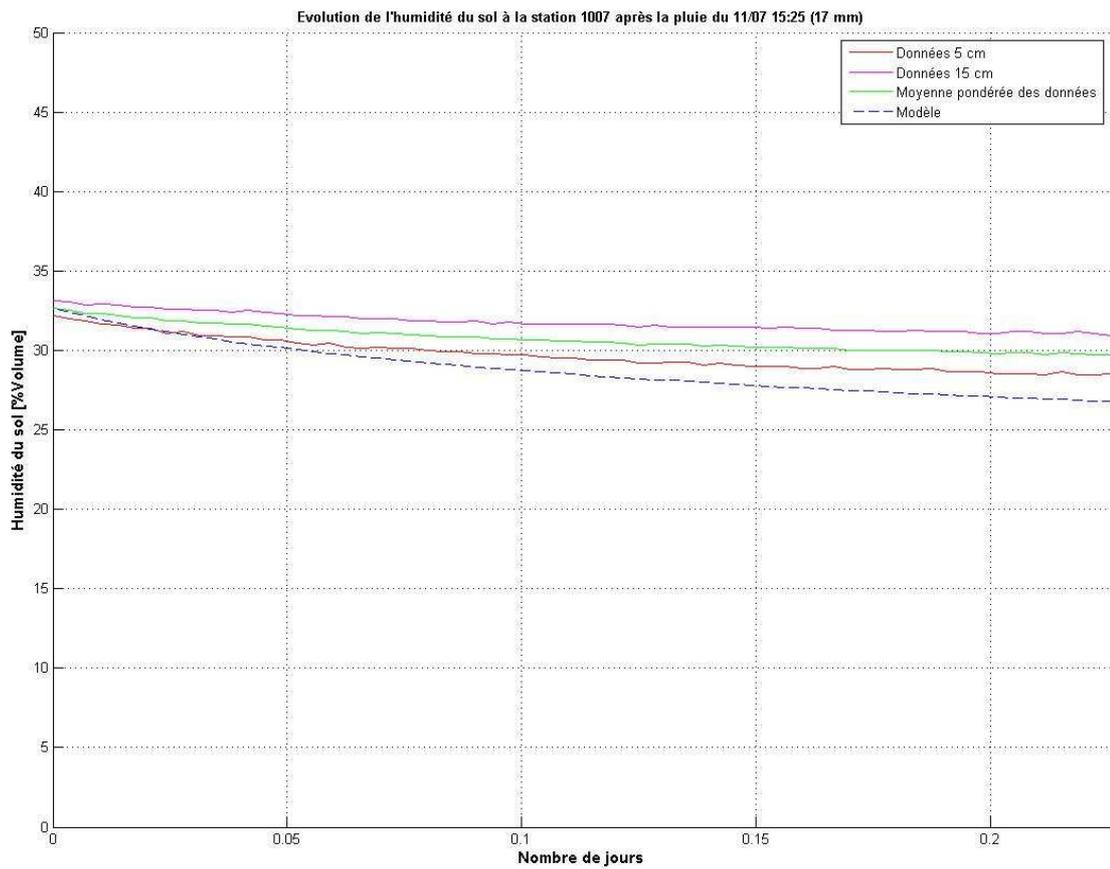
Figure 42 Modèle d'assèchement du sol après la pluie du 8 juillet-station 1007

$E_{\max}$  [mm/jour] 0.498  
 $Z_r$  [cm] 20



**Figure 43** Modèle d'assèchement du sol après la première pluie du 11 juillet-station 1007

$E_{\max}$  [mm/jour] 0.129  
 $Z_r$  [cm] 20



**Figure 44** Modèle d'assèchement du sol après la deuxième pluie du 11 juillet-station 1007

$E_{\max}$  [mm/jour] 0.129  
 $Z_r$  [cm] 20

### c) Résultats

Comme pour la station 1161, le modèle sous-estime globalement l'humidité du sol de 26.7% en moyenne par rapport aux données -Tableau 12- (on ne tient pas compte des modélisations pour moins de 1 jour de données : en effet compte tenu de la très courte période de simulation et des fluctuations des données au cours de la journée –paragraphe V.B.3-, la différence entre le modèle et les données n'est pas représentative du fonctionnement du modèle).

Après la pluie du...	Différence moyenne $\theta_{\text{modèle}} - \theta_{\text{données}}$ sur la période d'assèchement [%]	Différence $\theta_{\text{modèle}} - \theta_{\text{données}}$ à la fin de la période d'assèchement [%]	Durée de la période d'assèchement [j]
1 <sup>er</sup> juin Figure 44	-19.6	-12.8	2.7
4 juin Figure 34	-45.2	-24.4	5.6
9 juin Figure 35	-54.8	-30.8	10.2
20 juin Figure 36	-47.8	-24.2	6
26 juin Figure 37	-11.9	-5.9	3.7
30 juin Figure 38	-5.8	-0.2	2.4
2 juillet Figure 39	-23.3	-14.3	2.9
5 juillet 13h00 Figure 41	-16.0	-13.5	2.4
8 juillet Figure 42	15.9	-9.6	1.2
<b>Moyenne pour toutes les périodes d'assèchement</b>	<b>-26.7</b>	<b>-15.1</b>	<b>4.1</b>

Tableau 12 Résultats du modèle d'assèchement-station 1007

Il semblerait donc que les capteurs de la station 1161 ne soient pas l'origine de la sous-estimation observée au paragraphe V.B.1.c), mais plutôt que le modèle soit inadapté au contexte.

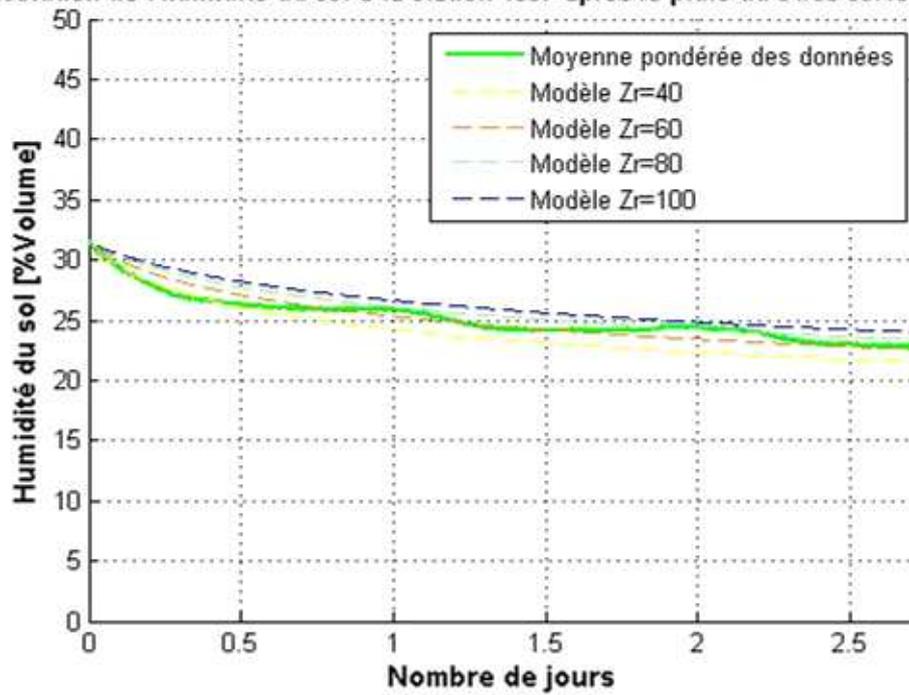
On cherche désormais à savoir quel paramètre est mal adapté pour le modèle ; Les deux seuls paramètres du modèle d'assèchement qui sont directement mesurés ici sont aussi ceux qui influencent le plus le modèle (Rodriguez-Iturbe and Porporato, 2004),  $E_{max}$  et  $Z_r$ .

- Modélisation pour 4  $Z_r$  différents-stationn1007

De la Figure 45 à la Figure 53 on a modélisé l'assèchement du sol pour 4 paramètres  $Z_r$  différents, en conservant la même pondération des données que précédemment (donc avec une profondeur racinaire de 20 cm). Pour chaque figure, le graphique du bas représente les mêmes éléments, mais sur une échelle d'ordonnées différente (zoom).

Pour plus de clarté, les données des capteurs ne sont pas représentées, seule les données moyennées le sont.

Evolution de l'humidité du sol à la station 1007 après la pluie du 01/06 05:45 (63 mm)



Evolution de l'humidité du sol à la station 1007 après la pluie du 01/06 05:45 (63 mm)

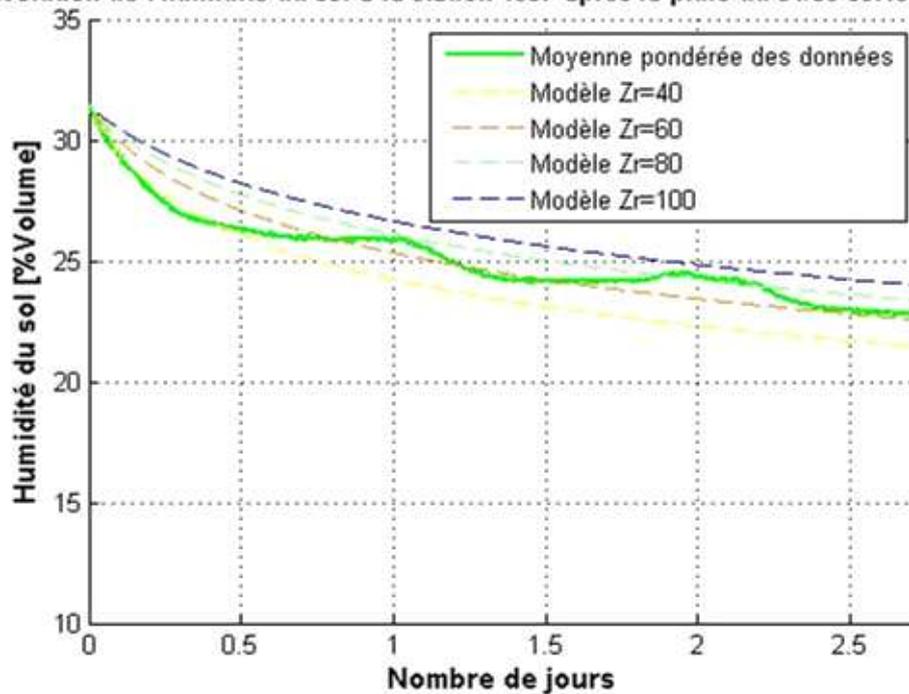
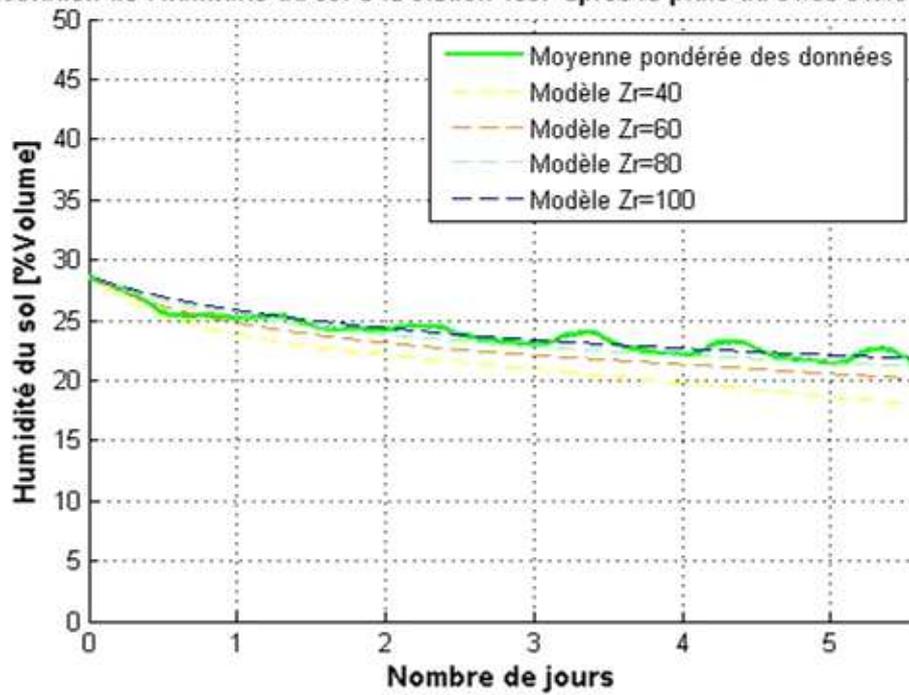


Figure 45 Modèle d'assèchement du sol pour différents Zr après la pluie du 1er juin-station 1007

$E_{max}$  [mm/jour] 0.458

Evolution de l'humidité du sol à la station 1007 après la pluie du 04/06 04:40 (15 mm)



Evolution de l'humidité du sol à la station 1007 après la pluie du 04/06 04:40 (15 mm)

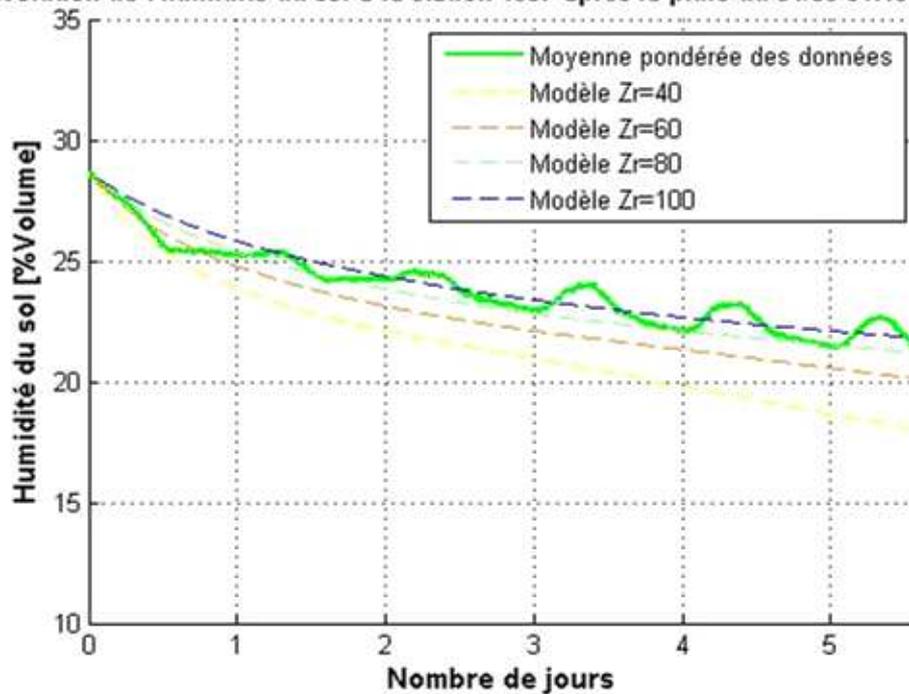
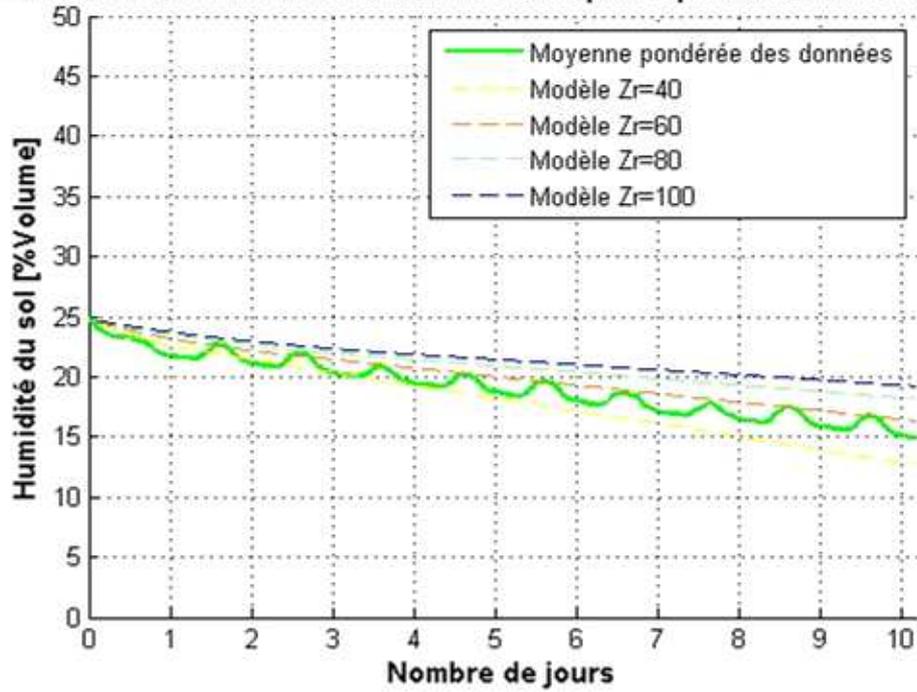


Figure 46 Modèle d'assèchement du sol pour différents Zr après la pluie du 4 juin-station 1007

$E_{max}$  [mm/jour] 0.458

Evolution de l'humidité du sol à la station 1007 après la pluie du 09/06 19:15 (7 mm)



Evolution de l'humidité du sol à la station 1007 après la pluie du 09/06 19:15 (7 mm)

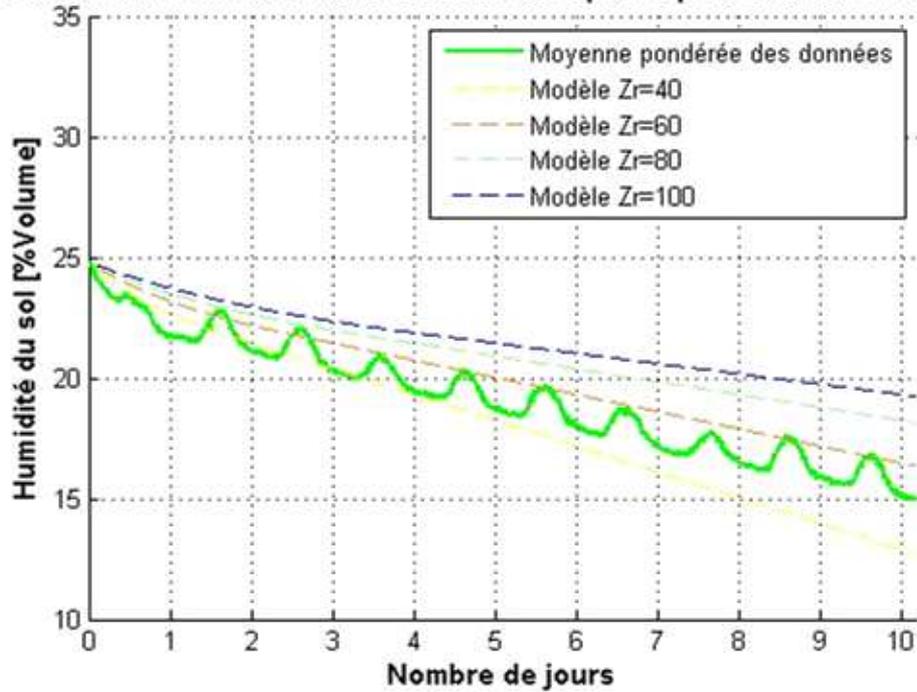
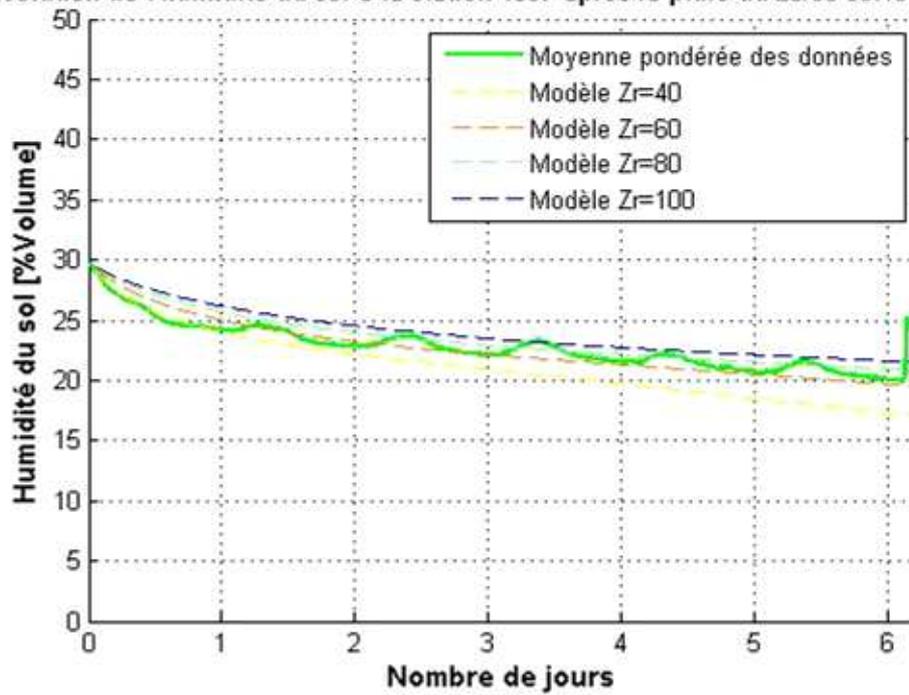


Figure 47 Modèle d'assèchement du sol pour différents Zr après la pluie du 9 juin-station 1007

$E_{\max}$  [mm/jour] 0.427

Evolution de l'humidité du sol à la station 1007 après la pluie du 20/06 03:10 (36 mm)



Evolution de l'humidité du sol à la station 1007 après la pluie du 20/06 03:10 (36 mm)

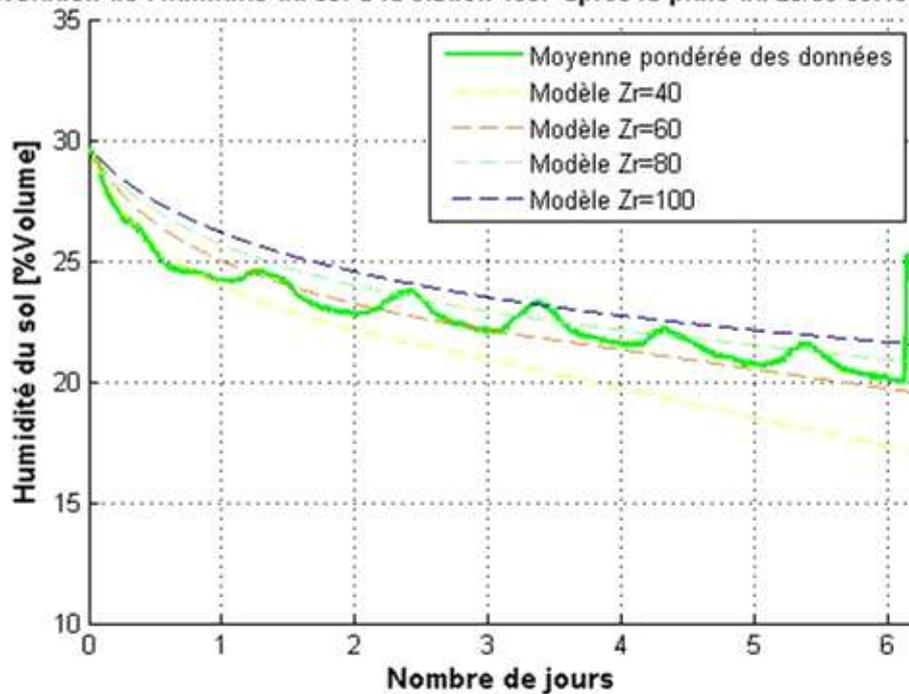
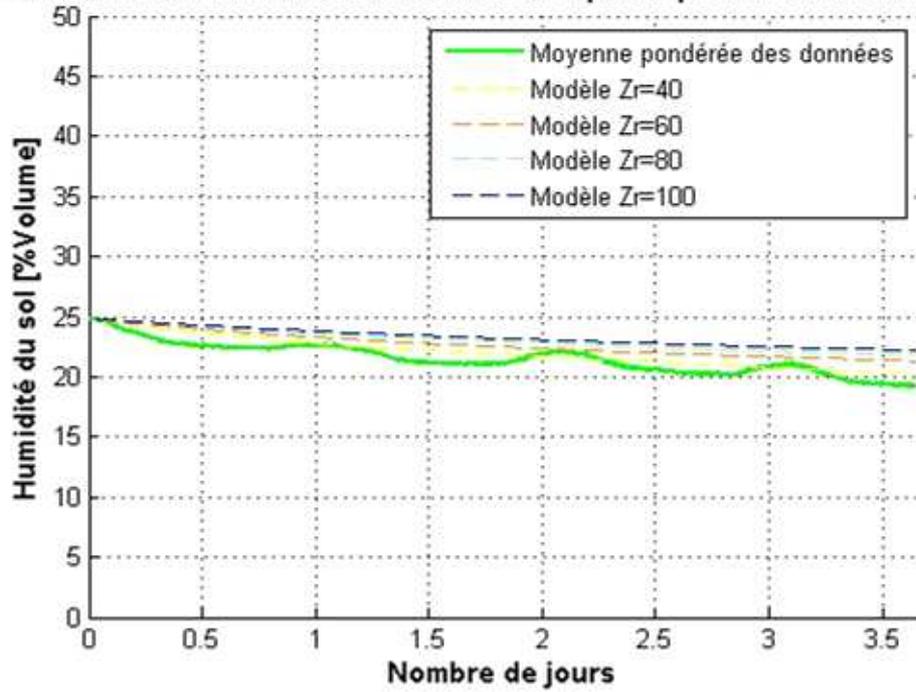


Figure 48 Modèle d'assèchement du sol pour différents Zr après la pluie du 20 juin-station 1007

$E_{max}$  [mm/jour] 0.482

Evolution de l'humidité du sol à la station 1007 après la pluie du 26/06 09:25 (9 mm)



Evolution de l'humidité du sol à la station 1007 après la pluie du 26/06 09:25 (9 mm)

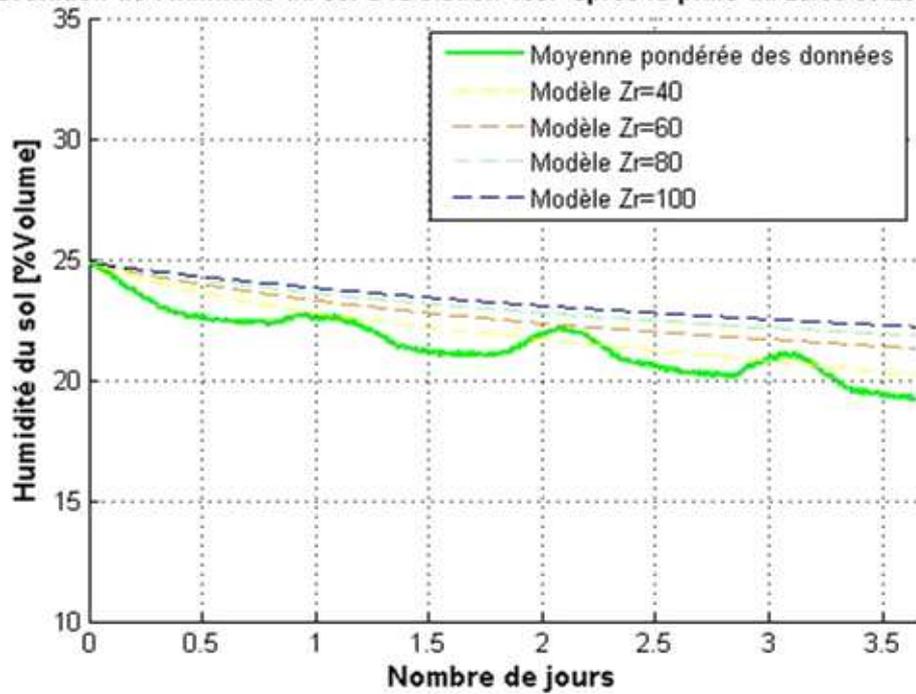
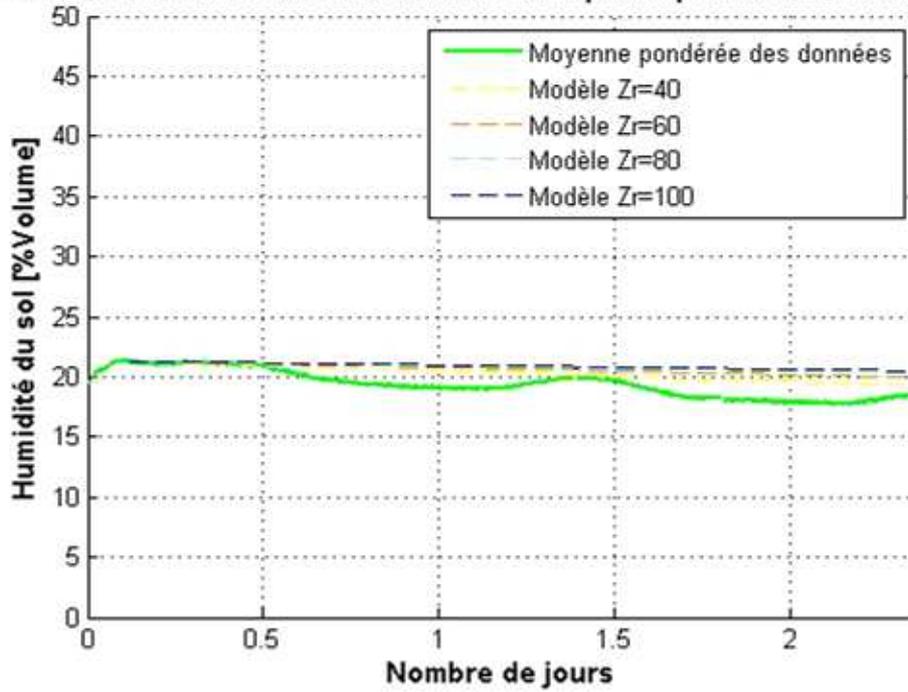


Figure 49 Modèle d'assèchement du sol pour différents Zr après la pluie du 26 juin-station 1007

$$E_{\max} [\text{mm/jour}] \quad 0.361$$

Evolution de l'humidité du sol à la station 1007 après la pluie du 30/06 02:50 (3 mm)



Evolution de l'humidité du sol à la station 1007 après la pluie du 30/06 02:50 (3 mm)

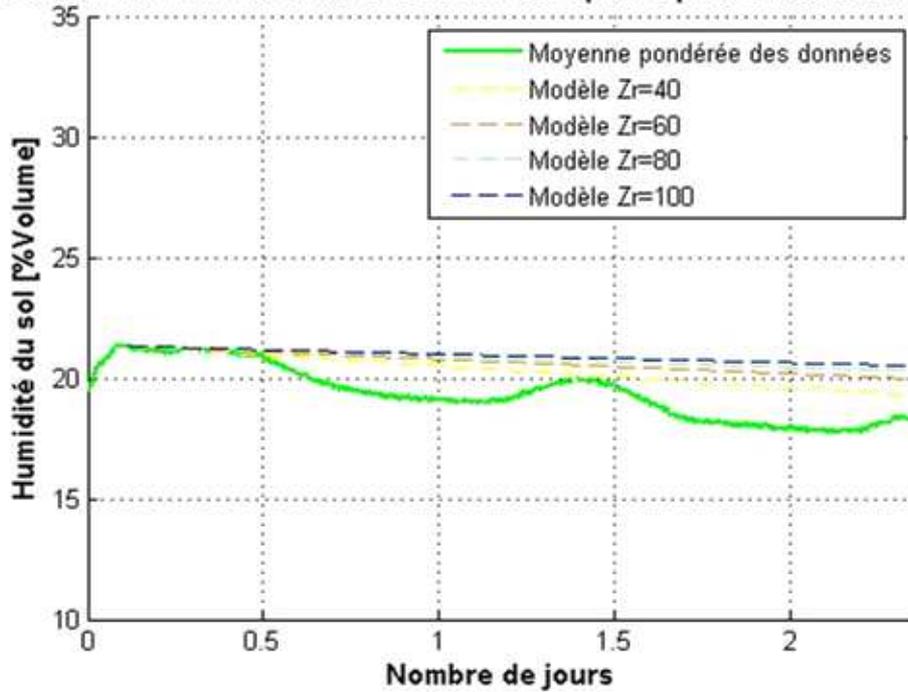
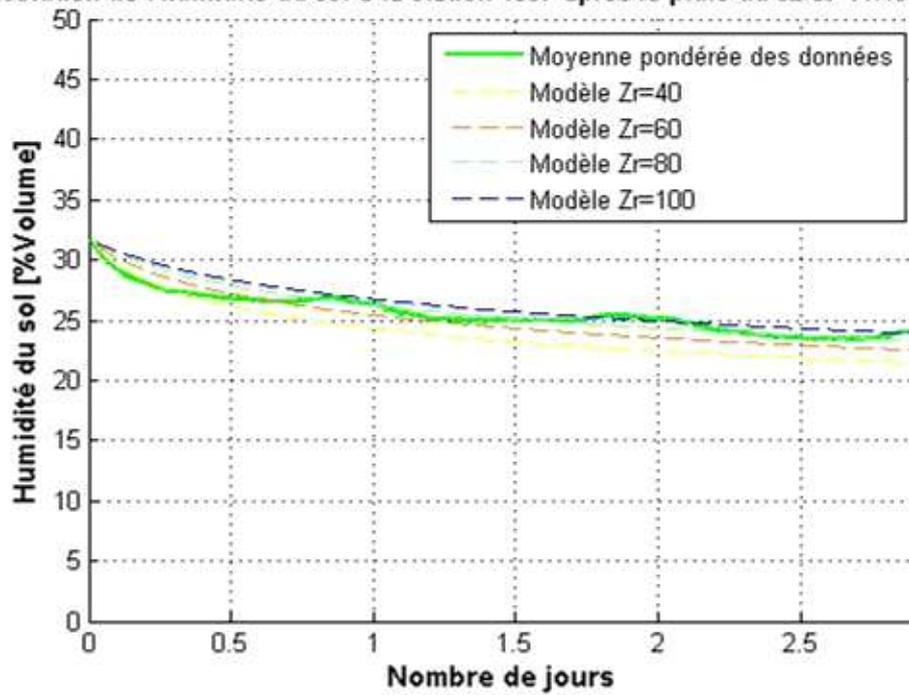


Figure 50 Modèle d'assèchement du sol pour différents Zr après la pluie du 30 juin-station 1007

$$E_{\max} [\text{mm/jour}] \quad 0.361$$

Evolution de l'humidité du sol à la station 1007 après la pluie du 02/07 11:40 (31 mm)



Evolution de l'humidité du sol à la station 1007 après la pluie du 02/07 11:40 (31 mm)

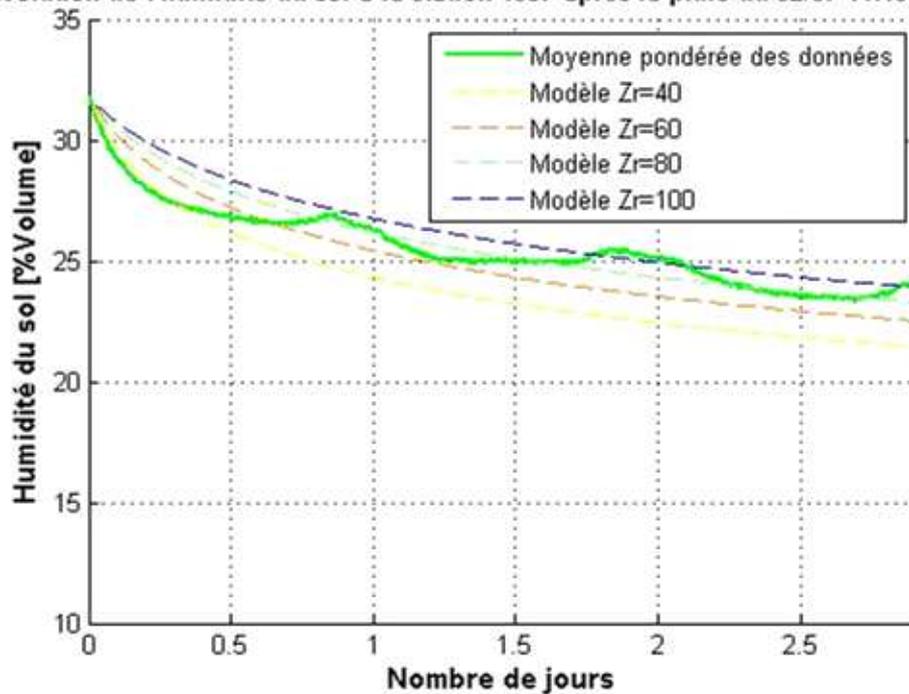
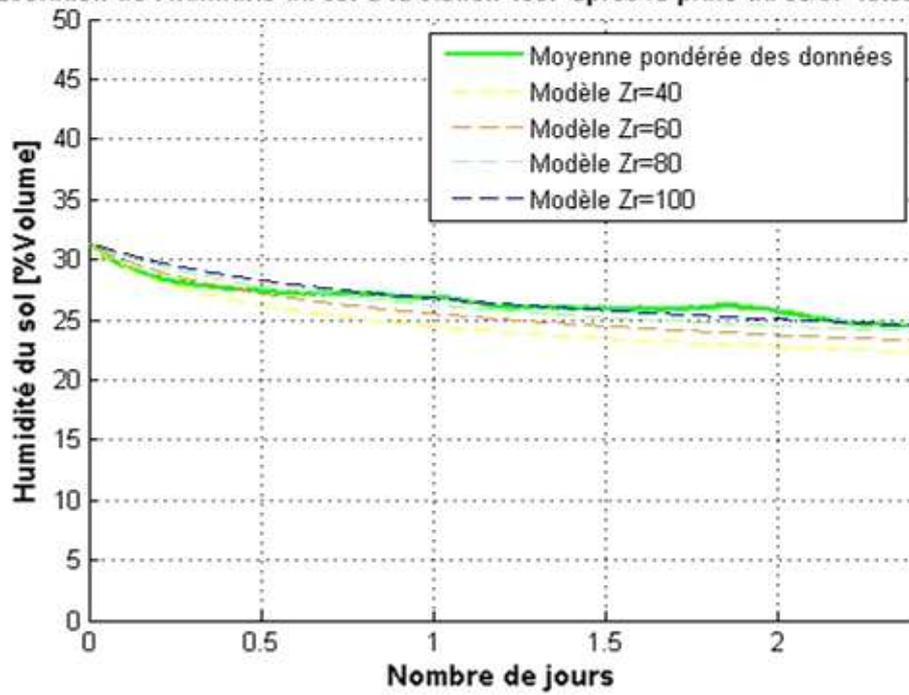


Figure 51 Modèle d'assèchement du sol pour différents Zr après la pluie du 2 juillet-station 1007

$E_{max}$  [mm/jour] 0.415

Evolution de l'humidité du sol à la station 1007 après la pluie du 05/07 13:00 (3 mm)



Evolution de l'humidité du sol à la station 1007 après la pluie du 05/07 13:00 (3 mm)

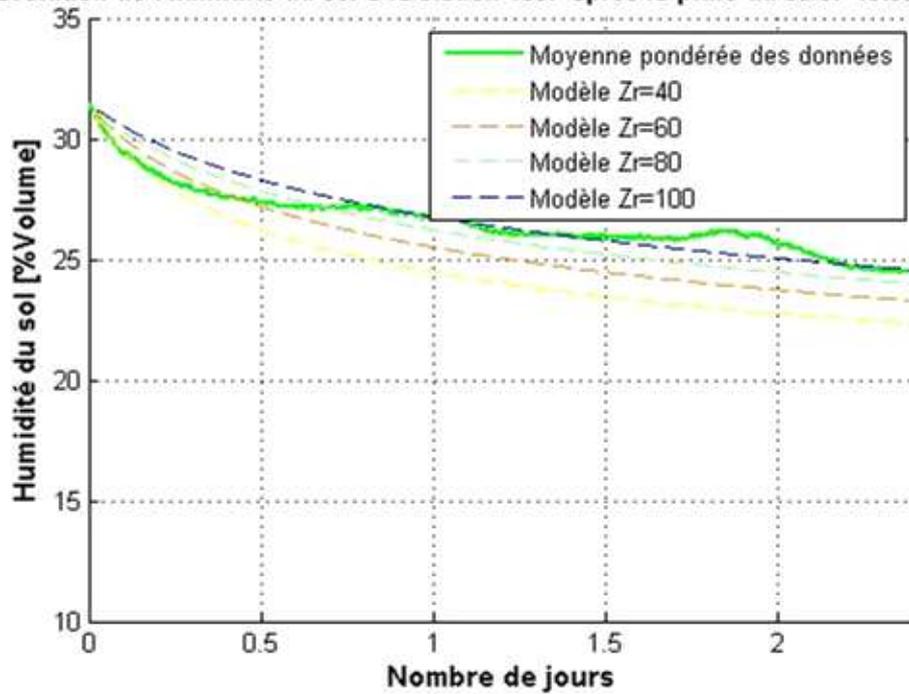
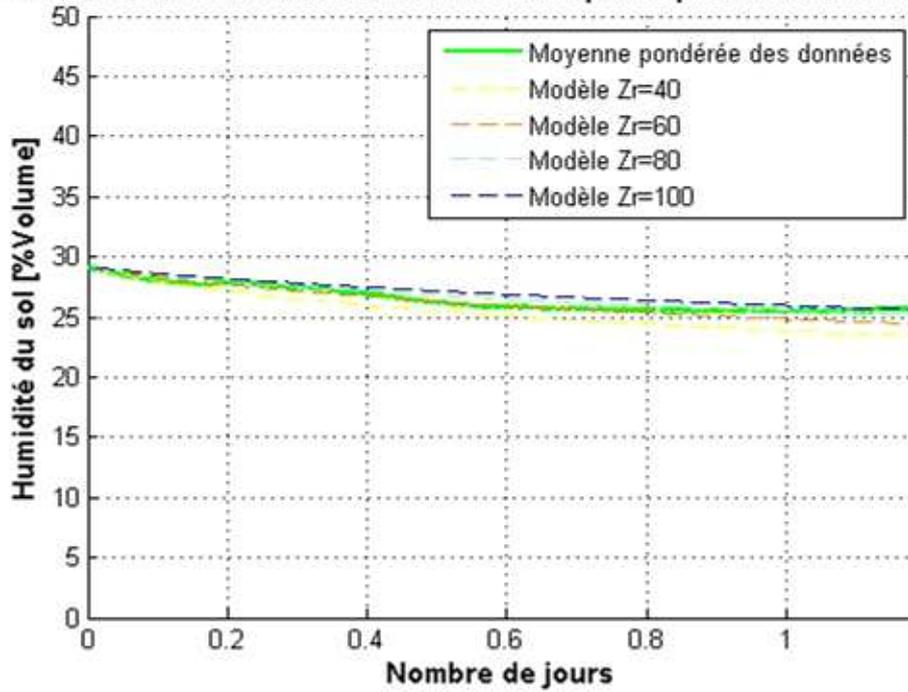


Figure 52 Modèle d'assèchement du sol pour différents Zr après la deuxième pluie du 5 juillet-station 1007

$E_{max}$  [mm/jour] 0.280

Evolution de l'humidité du sol à la station 1007 après la pluie du 08/07 01:10 (6 mm)



Evolution de l'humidité du sol à la station 1007 après la pluie du 08/07 01:10 (6 mm)

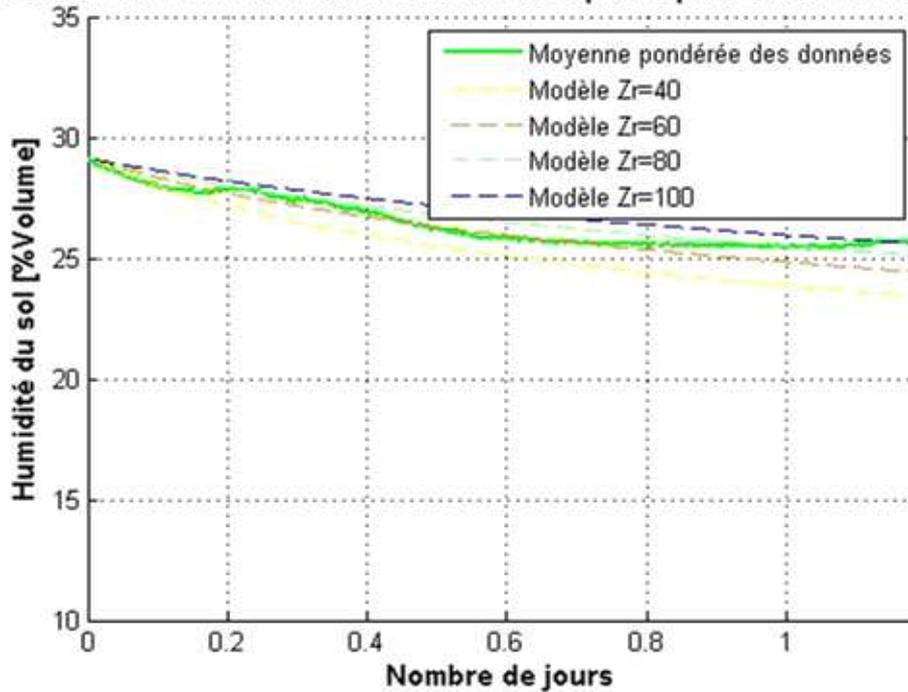


Figure 53 Modèle d'assèchement du sol pour différents Zr après la pluie du 8 juillet-station 1007

$E_{\max}$  [mm/jour] 0.498

Après la pluie du...		Différence moyenne $\theta_{\text{model}} - \theta_{\text{données}}$ sur la période d'assèchement [%]	Différence $\theta_{\text{model}} - \theta_{\text{données}}$ à la fin de la période d'assèchement [%]	Durée de la période d'assèchement [j]
1 <sup>er</sup> juin Figure 45	$Z_r = 40$ cm	-4.32	-5.9	2.7
	$Z_r = 60$ cm	-0.1	-0.9	
	$Z_r = 80$ cm	2.8	2.6	
	$Z_r = 100$ cm	4.9	5.3	
4 juin Figure 46	$Z_r = 40$ cm	-9.8	-16.0	5.6
	$Z_r = 60$ cm	-4.4	-6.1	
	$Z_r = 80$ cm	-1.4	-1.1	
	$Z_r = 100$ cm	0.8	1.9	
9 juin Figure 47	$Z_r = 40$ cm	-5.5	-15.0	10.2
	$Z_r = 60$ cm	4.8	9.1	
	$Z_r = 80$ cm	10.1	21.3	
	$Z_r = 100$ cm	13.3	28.4	
20 juin Figure 48	$Z_r = 40$ cm	-7.0	-14.3	6
	$Z_r = 60$ cm	-0.8	-2.4	
	$Z_r = 80$ cm	2.8	3.6	
	$Z_r = 100$ cm	5.3	7.7	
26 juin Figure 49	$Z_r = 40$ cm	2.5	5.2	3.7
	$Z_r = 60$ cm	5.7	11.0	
	$Z_r = 80$ cm	7.3	13.8	
	$Z_r = 100$ cm	8.5	15.7	
30 juin Figure 50	$Z_r = 40$ cm	5.2	5.3	2.4
	$Z_r = 60$ cm	7.0	9.0	
	$Z_r = 80$ cm	7.9	10.9	
	$Z_r = 100$ cm	8.5	12.0	
2 juillet Figure 51	$Z_r = 40$ cm	-6.9	-10.7	2.9
	$Z_r = 60$ cm	-2.1	-6.1	
	$Z_r = 80$ cm	0.8	-2.9	
	$Z_r = 100$ cm	2.9	-0.3	
5 juillet 13h00 Figure 52	$Z_r = 40$ cm	-7.4	-8.9	2.4
	$Z_r = 60$ cm	-3.9	-5.0	
	$Z_r = 80$ cm	-1.3	-2.0	
	$Z_r = 100$ cm	0.6	0.3	
8 juillet Figure 53	$Z_r = 40$ cm	-3.8	-8.7	1.2
	$Z_r = 60$ cm	-0.8	-4.7	
	$Z_r = 80$ cm	1.0	-2.1	
	$Z_r = 100$ cm	2.4	-0.2	
<b>Moyenne pour toutes les périodes d'assèchement</b>	<b><math>Z_r = 40</math> cm</b>	<b>-4.0</b>	<b>-7.7</b>	<b>4.1</b>
	<b><math>Z_r = 60</math> cm</b>	<b>0.6</b>	<b>0.4</b>	
	<b><math>Z_r = 80</math> cm</b>	<b>3.3</b>	<b>4.9</b>	
	<b><math>Z_r = 100</math> cm</b>	<b>5.2</b>	<b>7.8</b>	

Tableau page précédente :

Tableau 13 Résultats du modèle d'assèchement pour différents  $Z_r$ -station 1007

▪ Résultats

En faisant varier  $Z_r$  de 40 à 100 cm, on obtient les résultats présentés de la Figure 45 à la Figure 53 et dans le Tableau page précédente :

Tableau 13. Seules les périodes d'assèchement de plus de 1 jour ont été représentées, pour les raisons évoquées précédemment. La pondération (« moyenne pondérée des données ») prend en compte la réelle profondeur racinaire mesurée, c'est-à-dire 20 cm.

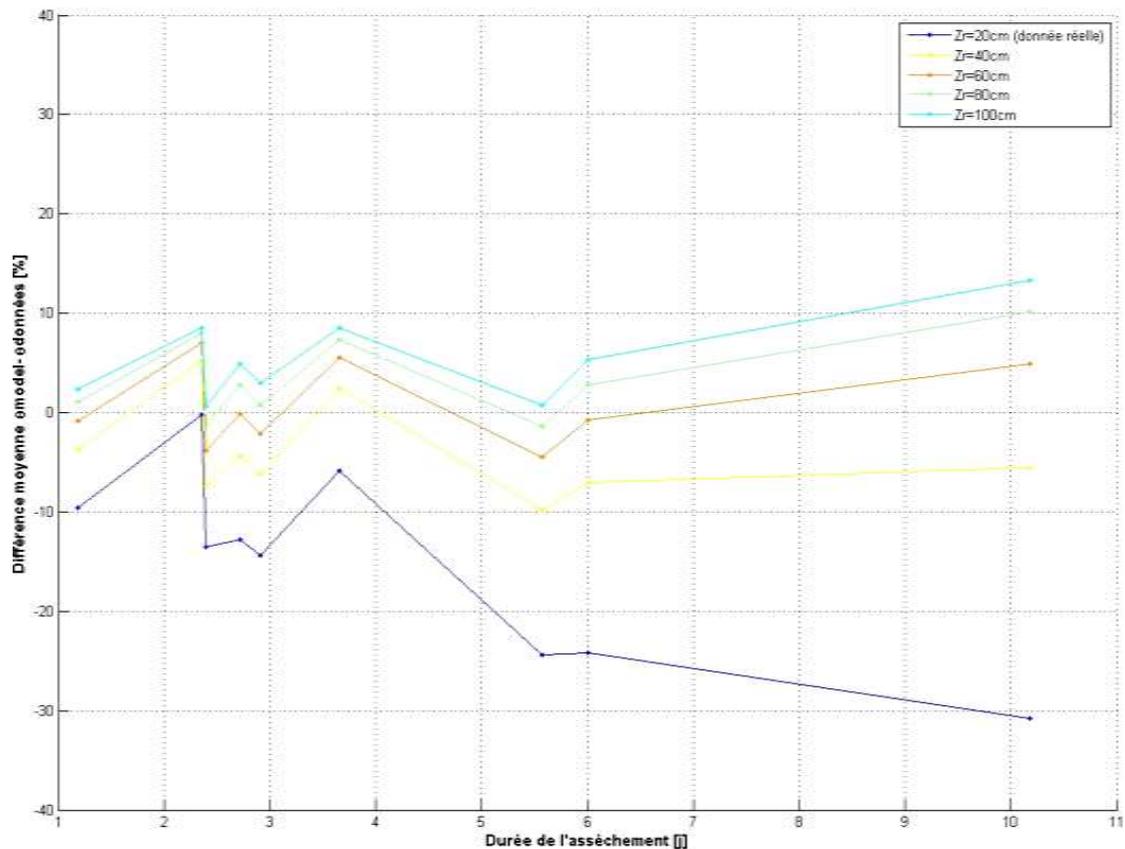


Figure 54 Différence moyenne entre les données et le modèle pour différents  $Z_r$ -station 1007

C'est pour une profondeur  $Z_r = 60$  cm que le modèle correspond le mieux aux données (moyenne sur l'ensemble des données, pour toutes les période d'assèchement : le modèle surestime de seulement 0.6% les données).

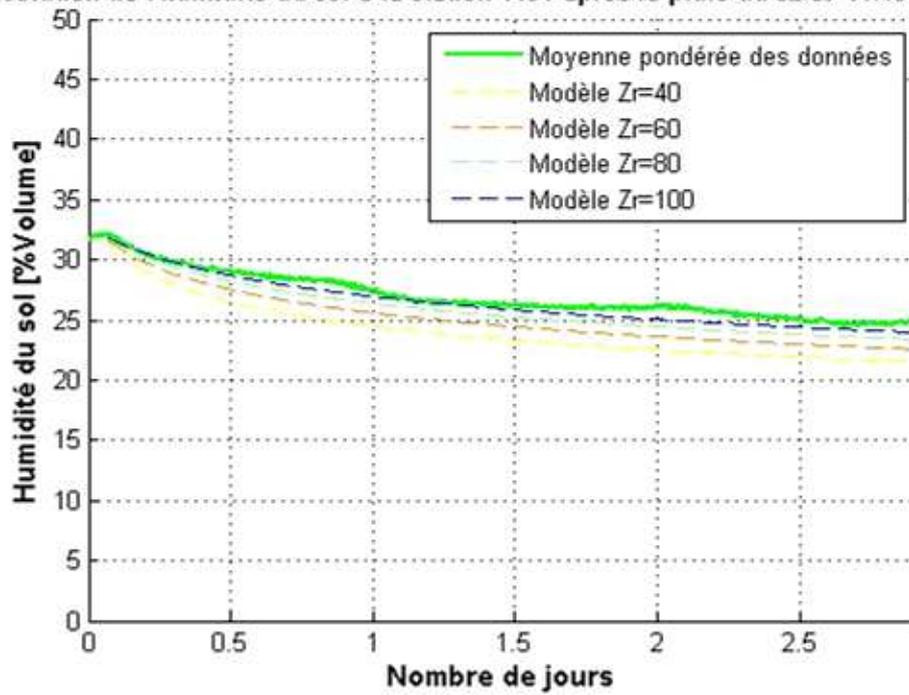
Le modèle ne semble pas correspondre pour des faibles profondeurs racinaires, puisqu'alors il sous-estime l'humidité du sol (il surestime l'intensité de l'assèchement).

Remarque : Avoir pris une valeur fixe pour  $Z_r$  ( $Z_r = 20$  cm, Figure 33 à Figure 44) n'influence pas cette conclusion, puisqu'en réalité,  $Z_r$  devrait être bien inférieur à 20 cm au début de la saison des pluies (allongement des racines pendant la saison des pluies), ce qui amènerait à une sous-estimation de l'humidité du sol encore plus accentuée.

- Modélisation pour 4  $Z_r$  différents-station 1161

De la Figure 55 à la Figure 57 sont représentées les données de la 1161 avec différents  $Z_r$ , de la même façon que pour la 1007, uniquement pour des périodes d'assèchement de plus de 1 jour.

Evolution de l'humidité du sol à la station 1161 après la pluie du 02/07 11:40 (31 mm)



Evolution de l'humidité du sol à la station 1161 après la pluie du 02/07 11:40 (31 mm)

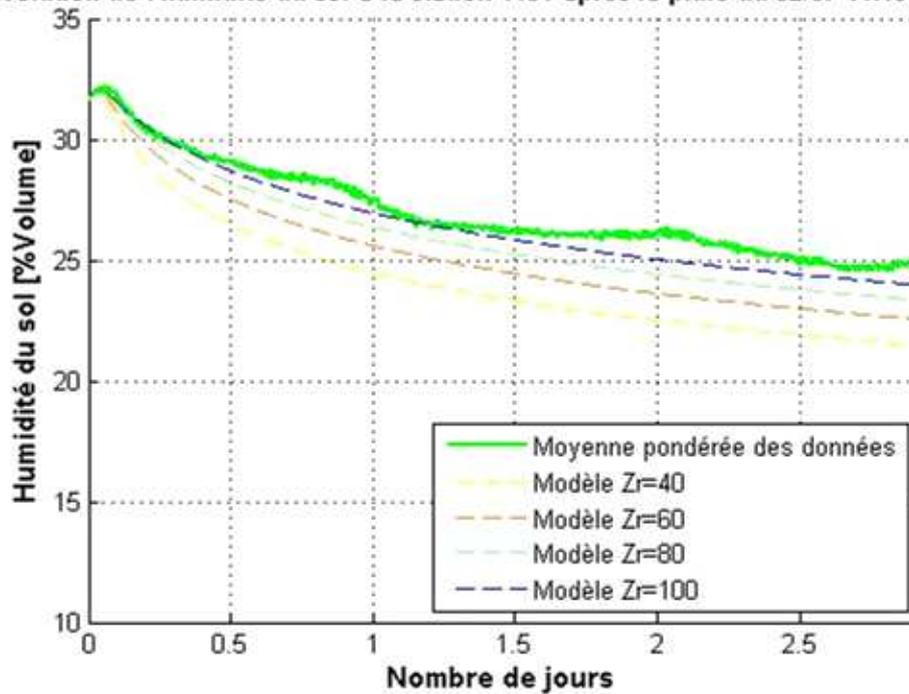
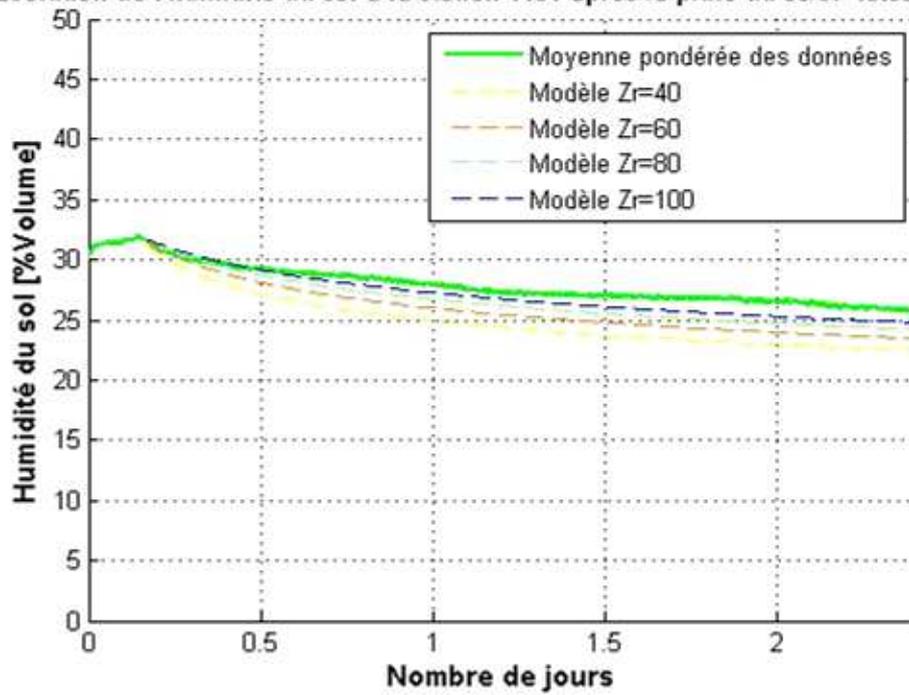


Figure 55 Modèle d'assèchement du sol pour différents Zr après la pluie du 2 juillet-station 1161

Evolution de l'humidité du sol à la station 1161 après la pluie du 05/07 13:00 (3 mm)



Evolution de l'humidité du sol à la station 1161 après la pluie du 05/07 13:00 (3 mm)

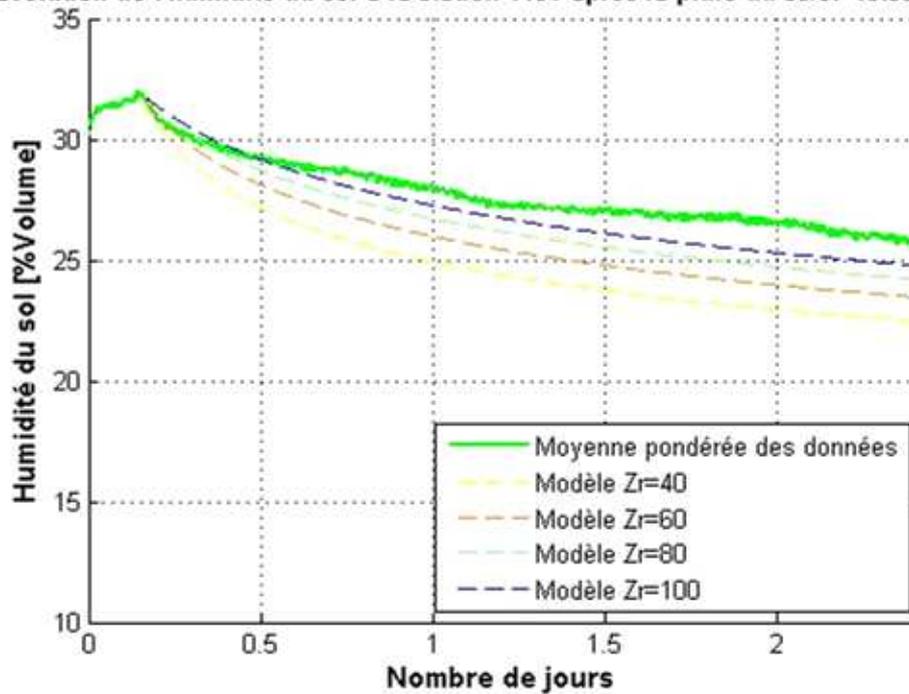
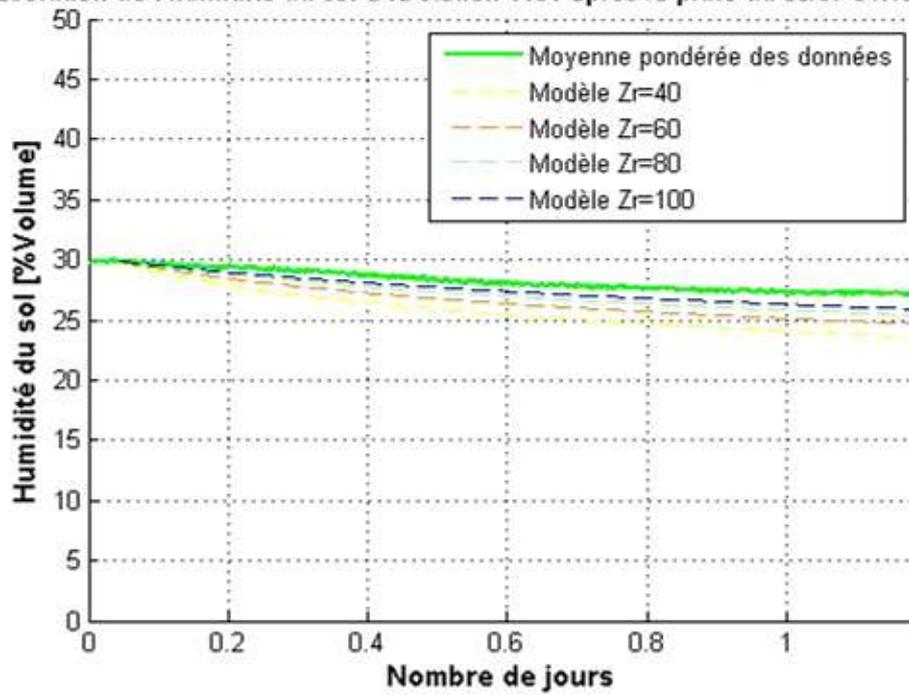


Figure 56 Modèle d'assèchement du sol pour différents Zr après la deuxième pluie du 5 juillet-station 1161

Evolution de l'humidité du sol à la station 1161 après la pluie du 08/07 01:10 (6 mm)



Evolution de l'humidité du sol à la station 1161 après la pluie du 08/07 01:10 (6 mm)

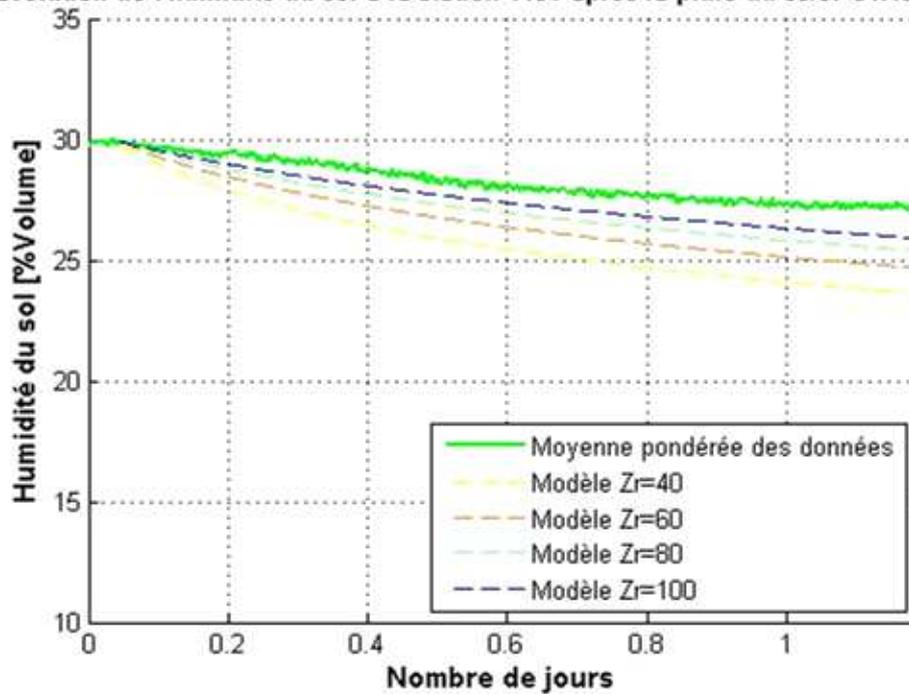


Figure 57 Modèle d'assèchement du sol pour différents Zr après la pluie du 8 juillet-station 1161

Après la pluie du...		Différence moyenne $\theta_{\text{modél}} - \theta_{\text{données}}$ sur la période d'assèchement [%]	Différence $\theta_{\text{modél}} - \theta_{\text{données}}$ à la fin de la période d'assèchement [%]	Durée de la période d'assèchement [j]
2 juillet Figure 51	$Z_r = 40$ cm	-10.7	-13.3	2.9
	$Z_r = 60$ cm	-6.8	-8.9	
	$Z_r = 80$ cm	-4.0	-5.7	
	$Z_r = 100$ cm	-1.9	-3.2	
5 juillet 13h00 Figure 52	$Z_r = 40$ cm	-10.3	-12.6	2.4
	$Z_r = 60$ cm	-6.8	-8.9	
	$Z_r = 80$ cm	-4.3	-5.9	
	$Z_r = 100$ cm	-2.4	-3.6	
8 juillet Figure 53	$Z_r = 40$ cm	-8.7	-12.7	1.8
	$Z_r = 60$ cm	-5.7	-8.9	
	$Z_r = 80$ cm	-3.7	-6.1	
	$Z_r = 100$ cm	-2.5	-4.3	
Moyenne pour toutes les périodes d'assèchement	$Z_r = 40$ cm	-9.9	-12.9	2.2
	$Z_r = 60$ cm	-6.4	-8.9	
	$Z_r = 80$ cm	-4.1	-5.9	
	$Z_r = 100$ cm	-2.3	-3.7	

Tableau 14 Résultats du modèle d'assèchement pour différents  $Z_r$ -station 1161

- Résultats

Pour  $Z_r = 100$  cm, on obtient les meilleurs résultats (Tableau 14 et Figure 58).

Il faut rappeler que pour la station 1161, la profondeur racinaire augmente sur la période de mesure (contrairement à la station 1007, où on a fixé cette profondeur à 20 cm). Il est intéressant de noter que la surestimation de la sécheresse par le modèle pour les 3 périodes de sécheresse : -1,9% après la pluie du 2 juillet, -2,4% après la pluie du 5 juillet et -2,5% après la pluie du 8 juillet (Tableau 14). Il semble donc que le paramètre  $Z_r$  du modèle ne doive pas être considéré comme constant, et augmente lorsque la profondeur des racines augmente.

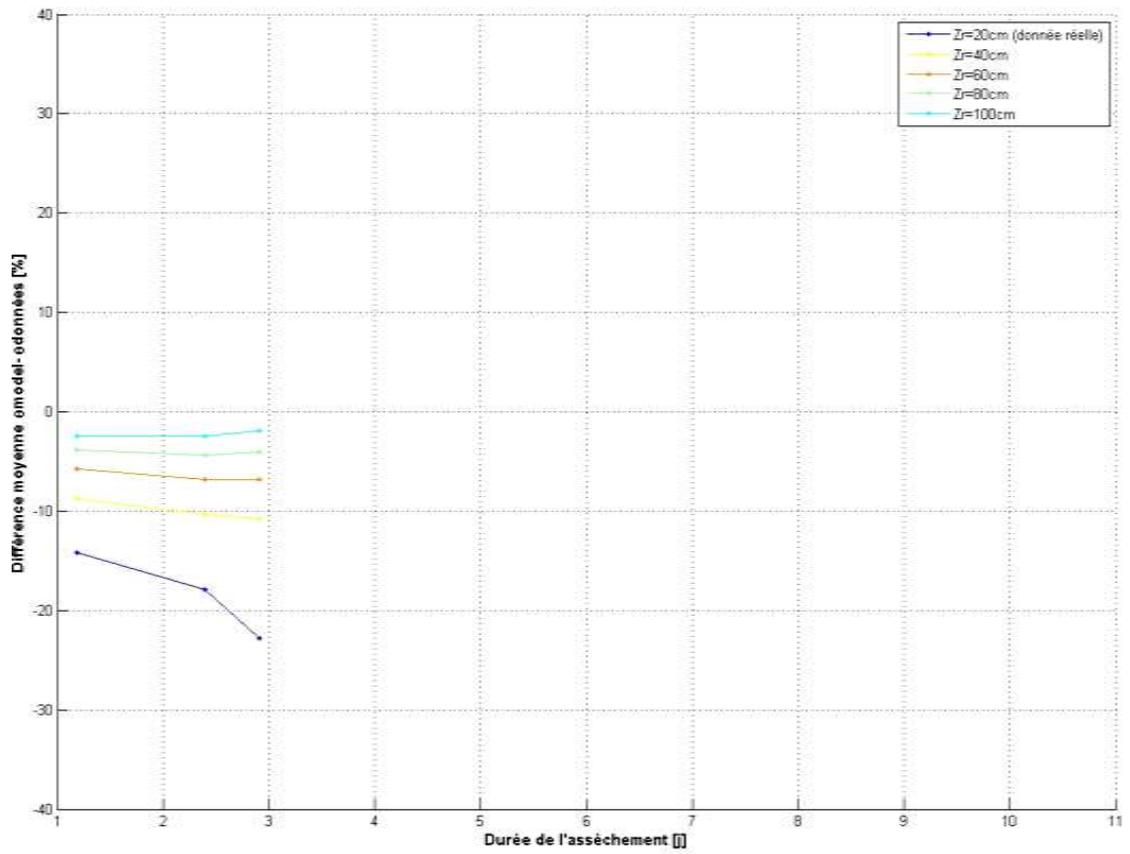


Figure 58 Différence moyenne entre les données et le modèle pour différents Zr - station 1161

## D. Discussion des résultats

### ▪ Assèchement du sol

Le modèle d'assèchement du sol ne représente pas correctement les données d'humidité du sol, ni à la station 1161, ni à la station 1007. Il surestime l'intensité de l'assèchement du sol par rapport aux données à disposition, c'est-à-dire à des données d'humidité du sol relativement proches de la surface.

A priori, le facteur qui provoque ce problème est la profondeur racinaire  $Z_r$ , trop faible dans le cas de nos données. En effet, l'évapotranspiration et la profondeur du sol sont étroitement liées ; en augmentant la profondeur racinaire dans le modèle, on augmente en réalité l'épaisseur de sol affectée par l'évapotranspiration  $E_{max}$ .

Pour des faibles profondeurs de racine, le paramètre  $Z_r$  du modèle doit donc être plutôt considéré comme l'épaisseur de sol affectée par l'évaporation. La pondération des données correspondante se fait par contre avec la réelle profondeur des racines observée.

En d'autres termes, on peut proposer de définir un nouveau paramètre  $e$  pour le modèle, qui correspondrait à l'épaisseur de sol à prendre en compte.  $Z_r$  reste alors la réelle profondeur racinaire, qui permet de moyenniser les données.  $e$  remplace  $Z_r$  dans les équations du modèle d'assèchement (II.C) pour  $Z_r < e$ . Puis pour  $Z_r \geq e$  (lorsque les racines du mil atteignent la profondeur  $e$ ), les équations du modèle d'assèchement prennent en compte  $Z_r$  et non plus  $e$ .

Il serait intéressant de tester cette proposition pour la fin de la saison des pluies, en sachant que  $e$  ne semble pas rester constant, et évolue avec la profondeur des racines).

Par ailleurs, on a pu remarquer qu'à partir de 20 cm pour les stations 1160 et 1161, le sol réagit très lentement à une pluie (plus de 24h pour la 1160, à 5 cm, et plus de 7 jours à la 1161 à 15 cm, pour la pluie du 1<sup>er</sup> juin). Dans la suite la saison des pluies, si des données plus en profondeur montrent également une humidification très retardée, il se pourrait alors que le modèle « en seau » ne soit plus adapté et que le modèle de Richards soit plus pertinent. Comme expliqué au paragraphe IV.B, le modèle de Richards nécessite beaucoup plus de données.

On pourrait envisager de n'utiliser que le modèle « en seau », mais en modélisant systématiquement l'assèchement du sol pour chaque profondeur de capteur, et non pour une profondeur moyennée.

### ▪ Réaction du sol à une pluie

L'absence de données de ruissellement sur la période d'étude n'a pas permis de développer une modélisation de la réaction du sol cultivé à une pluie.

- Problématique de la date de semis

Enfin, il faut souligner que la problématique de la date de semis à été mise de côté au court du travail.

Les cultivateurs de la région sahélienne ont tendance à semer beaucoup plus tôt (en moyenne 20 jours) que ce que les modèles existants définissent comme le début de la saison des pluies (Ati et al, 2002). Ceci pose donc souvent le problème des « faux départs » et les cultivateurs doivent semer plusieurs fois, comme il a été le cas cette année. Mais les discussions avec des agriculteurs du village de Tambarga ont confirmé des hypothèses émises dans un précédent travail (Verrot, 2009) ; les cultivateurs préféreront choisir de perdre un peu d'argent en semant plusieurs fois, plutôt que de risquer de manquer le début de la saison des pluies en semant trop tard et de perdre la récolte (le mil n'a alors pas le temps d'arriver à maturité).

Par ailleurs, le lien entre la date de semis et le rendement des cultures n'est pas clairement établi (Sivakumar, 1990). Il n'y aurait donc pas de bénéfice particulier en termes de rendements à se conformer aux définitions scientifiques du début de la saison des pluies.

## E. Proposition d'amélioration de la qualité et de la fiabilité des données

Les données de ruissellement et d'interception (pluviomètres enterrés) doivent être plus fiables pour modéliser la réponse du sol aux pluies. Des pistes pour améliorer ces données sont décrites respectivement aux paragraphes V.A.3 et V.A.4.

Il serait utile d'étudier plus spécifiquement la fiabilité des capteurs d'humidité du sol utilisés.

On peut proposer le protocole suivant :

### 1. *Dans des conditions climatiques « standards »*

On propose de faire une première phase de tests sur sol naturel, dans un lieu géographique (climat et sol) où les capteurs ont déjà permis d'obtenir des bonnes données (en Suisse par exemple) et dans des conditions qui permettent une analyse immédiate des échantillons de sol (balance de précision et four à disposition).

1. On installe le capteur à une profondeur donnée.  
L'humidité et la texture du sol sont connus (pesée et séchage à 105°C et analyse granulométrique d'échantillons en différents endroits, à la profondeur du capteur)
2. Chronomètre en main, on verse un volume d'eau connu à la surface du sol, et de façon uniforme.
3. On analyse la teneur en eau du sol (pesée et séchage à 105°C de plusieurs échantillons).
4. On compare les données du capteur à celles des prélèvements.

Les tests doivent permettre de connaître la réaction du capteur :

- Pour différentes intensités de pluie (hauteur totale de pluie / durée de la pluie)
- Pour différentes structures de pluie (relation hauteur cumulée / temps)
- Pour différentes textures de sol (dont les textures de sol sur le terrain d'étude)
- Pour différentes profondeurs

Sur le terrain d'étude (village de Tambarga), il n'est pas possible de peser et sécher les échantillons (pas de balance ni de four). Les échantillons sont donc stockés selon la méthode décrite par Andraski et Scanlon (2002). Cette méthode a été éprouvée pour certaines conditions de stockage des échantillons ; température extérieure minimisant les pertes en eau par évaporation à travers les sachets plastiques.

Mais on peut penser que dans les conditions climatiques du terrain d'étude (fortes températures, variation d'humidité de l'air), les pertes d'eau des échantillons, malgré les sachets plastiques, ne sont pas négligeables.

Donc pour que les tests sur le terrain, il faut s'assurer que le stockage des échantillons permet une évaluation fiable de leur contenu en eau.

Lors des prélèvements des échantillons, on propose donc d'en stocker une partie, et de les analyser 1 semaine après. Le stockage doit se faire dans des conditions (température, humidité) les plus proches possibles de celles rencontrées au village de Tamabarga

On comparera ensuite les résultats obtenus avec ces échantillons stockés et ceux obtenus avec les échantillons analysés immédiatement après les prélèvements.

## 2. *Sur le terrain d'étude, village de Tambarga*

Sur le terrain d'études, les capteurs sont soumis notamment à de fortes températures du sol ( $> 45^{\circ}\text{C}$ ).

Comme il n'y a pas de balance ni de four à disposition, on stockera les échantillons selon la méthode décrite par Andraski et Scanlon (2002). On tiendra compte des résultats précédents (comparaison échantillons stockés/non stockés) pour l'analyse de l'humidité du sol des échantillons.

On déterminera donc si la pluie, la profondeur, le type de sol la température du sol, et les fluctuations des conditions climatiques sur le terrain influencent le fonctionnement du capteur.



## VI. Perspectives d'exploitation des résultats pour l'information des communautés locales ou des organismes régionaux

### A. Obtenir un modèle prédictif de l'assèchement du sol avec les installations Sensorscope ?

Les données utilisées ici sont issues de plusieurs types d'installations. Dans une perspective d'utilisation des données ou du modèle par les communautés locales à long terme, il est envisageable d'utiliser les stations Sensorscope et les appareils de mesure qui y sont liés (pluviomètre enterré, capteurs d'humidité du sol), mais pas les données d'évapotranspiration de la station sonic-LiCor. Le coût de cette installation est en effet bien trop élevé.

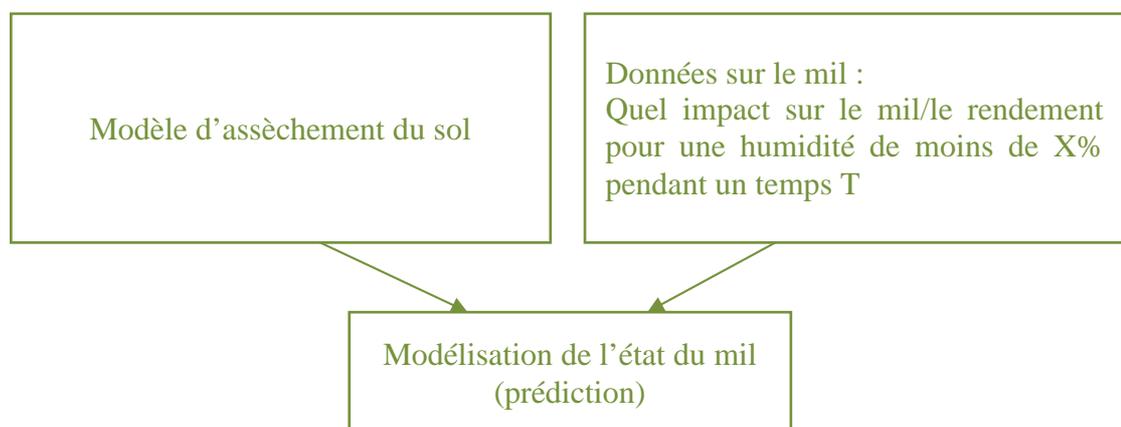
Les données d'évapotranspiration sont indispensables pour le modèle ; on peut envisager d'utiliser, à la place de la station sonic-LiCor, 3 instruments reliables à des stations Sensorscope : un capteur de radiation solaire, un capteur de vitesse du vent, et un capteur de l'humidité de l'air. En utilisant la relation de Penman, on obtient une bonne estimation de l'évapotranspiration.

Il faudrait étudier, dans la zone d'étude spécifiquement, les différences entre de les mesures de l'évapotranspiration obtenues par la station sonic-LiCor et par de tels capteurs de façon à conclure sur cette possibilité de remplacement de la station sonic-LiCor.

En plus du faible coût, il faut aussi que le matériel soit simple d'entretien (personnel peu qualifié).

Les stations Sensorscope ont également l'avantage de ne pas nécessiter de téléchargement direct des données sur le terrain via un ordinateur (téléchargement des données sur internet, pas de nécessiter de vider la mémoire par exemple). Ainsi il est possible de consulter et d'utiliser les données en temps réel.

D'un point de vue pratique, un modèle d'assèchement du sol n'est pas utile en lui-même pour les cultivateurs. Il faudrait le coupler à des données sur la réaction du mil à l'humidité du sol.



## B. Quel type d'informations fournir aux populations locales ?

La question est complexe, particulièrement dans le milieu rural ouest-africain ; les personnes ont un très bas niveau d'éducation ; seulement 29% des adultes sont alphabétisés au Burkina Faso<sup>1</sup>.

Par ailleurs, on peut imaginer diffuser les informations Sensorscope à des fins de recherche (scientifiques), mais aussi à des organismes publics, à différentes échelles; les données Sensorscope facilitent la prise de données, et peuvent être un outil majeur d'aide à la définition de politiques sectorielles publiques (agriculture, aménagement du territoire etc..)

L'information transmise aux cultivateurs peut être de plusieurs type : données brutes des stations, résultat d'un modèle basé sur les données Sensorscope, conseil aux cultivateurs sur la base d'un modèle.

Dans tous les cas, il est nécessaire de former une ou plusieurs personnes (agents administratifs ou villageois) au fonctionnement et à l'entretien des stations, pour changer les batteries par exemple, et de s'assurer que ces personnes peuvent vérifier, au moins périodiquement –accès à internet- le bon fonctionnement des stations (niveau des batteries, dysfonctionnement d'une station etc...).

---

<sup>1</sup> Source : Unicef, données 2003-2008, [www.unicef.org/french/infobycountry/burkinafaso\\_statistics.html](http://www.unicef.org/french/infobycountry/burkinafaso_statistics.html), consulté le 29 juillet 2010

## 1. *Données brutes des stations Sensorscope*

Exemple : pluie [mm], radiation solaire [ $\text{W}/\text{m}^2$ ], humidité du sol [%Volume], vitesse du vent [m/s].

### a) Avantages

Les cultivateurs sont en interaction constante avec le matériel d'une part, et leur environnement d'autre part. Dans une optique de développement durable, cela contribue à l'appropriation du matériel de la part des communautés locales et permet une meilleure compréhension du fonctionnement de leur environnement.

On peut imaginer la possibilité de consulter des données antérieures (comparaison avec les données actuelles).

D'un point de vue organisationnel, cette solution présente aussi l'avantage de ne nécessiter aucun travail et aucun réglage entre les données et les destinataires.

### b) Inconvénients

Il est évident que la compréhension de certains de ces paramètres, principalement au niveau des unités, nécessite un niveau de scolarité assez élevé, et réduit de ce fait le public susceptible de comprendre le fonctionnement de l'environnement.

Par exemple, la compréhension de «  $800 \text{ W}/\text{m}^2$  » pour la radiation solaire nécessite une formation assez poussée des personnes, alors que la « 25 mm » pour la pluie est compréhensible par tout le monde.

Pour palier à ce problème, on pourrait par exemple imaginer de ramener les valeurs de certains paramètres sur une échelle de 0 à 100, 100 étant le maximum rencontré en un an.

Par exemple, la radiation solaire ne serait plus «  $800 \text{ W}/\text{m}^2$  » mais « 70 sur 100 ». Cette solution ne nécessite pas beaucoup plus de traitement des données, et les stations Sensorscope pourraient tout à fait effectuer directement les conversions.

La prise de décision sur la base de données à un instant T peut poser problème dans le cadre d'une gestion durable des ressources.

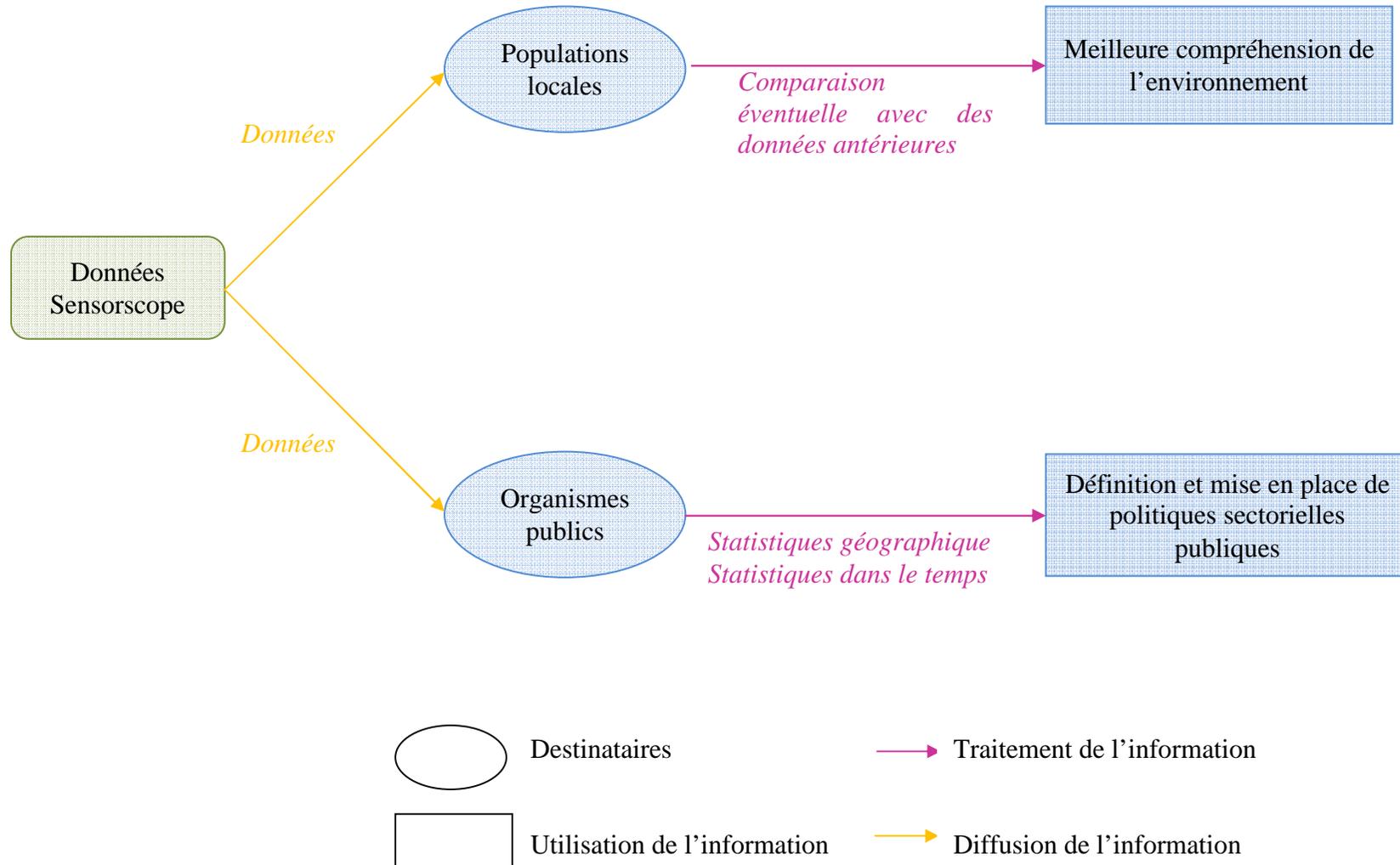


Figure 59 Schéma de l'exploitation des données brutes des stations

## 2. *Résultats d'un modèle appliqué aux données des stations*

Les modèles peuvent être prédictif ou non. Si il n'est pas prédictif (par exemple l'évapotranspiration, obtenue sur la base de certaines données et de constantes empiriques, ou encore l'état de santé du mil, sur la base des données d'humidité du sol), alors on peut les diffuser de la même façon que les données brutes.

Ci-dessous sont expliqués les avantages et les inconvénients liés à la diffusion d'un modèle prédictif.

Il est nécessaire d'impliquer un autre groupe de personnes (scientifiques, agronomes, météorologues d'organismes privés ou publics) dans le schéma de diffusion ; les modèles doivent pouvoir être réajustés en cas de d'évènements particuliers. Ils sont basés sur des tests sur le terrain de quelques années, mais dans un contexte de forte variabilité climatique interannuelle, il n'est pas à exclure qu'ils ne correspondent plus aux données.

### a) Avantages

L'information apportée est d'une plus grande utilité que les données brutes. Elle peut amener à des prises de décision plus avisées de la part des communautés locales elles-mêmes. De ce fait l'implication des cultivateurs et des villageois dans leur environnement est renforcée, et permet une meilleure gestion de celui ci.

D'autre part, un modèle prédictif permet une meilleure gestion des ressources.

### b) Inconvénients

Le travail en amont est plus conséquent que pour la diffusion de données brutes. Il est nécessaire de mettre au point le modèle, et les études nécessaires sont plus longues.

Par ailleurs, la prise de décision sur la base d'un modèle prédictif et la prise en compte de la fiabilité d'une prédiction –incertitude- sont complexes. Au cours du travail sur le terrain, on a pu observer que la plupart des décisions liées à la vie dans le village faisaient l'objet d'un consensus. Il serait nécessaire de prévoir une phase d'étude sur les décisions que prendraient les personnes disposant de telles informations.

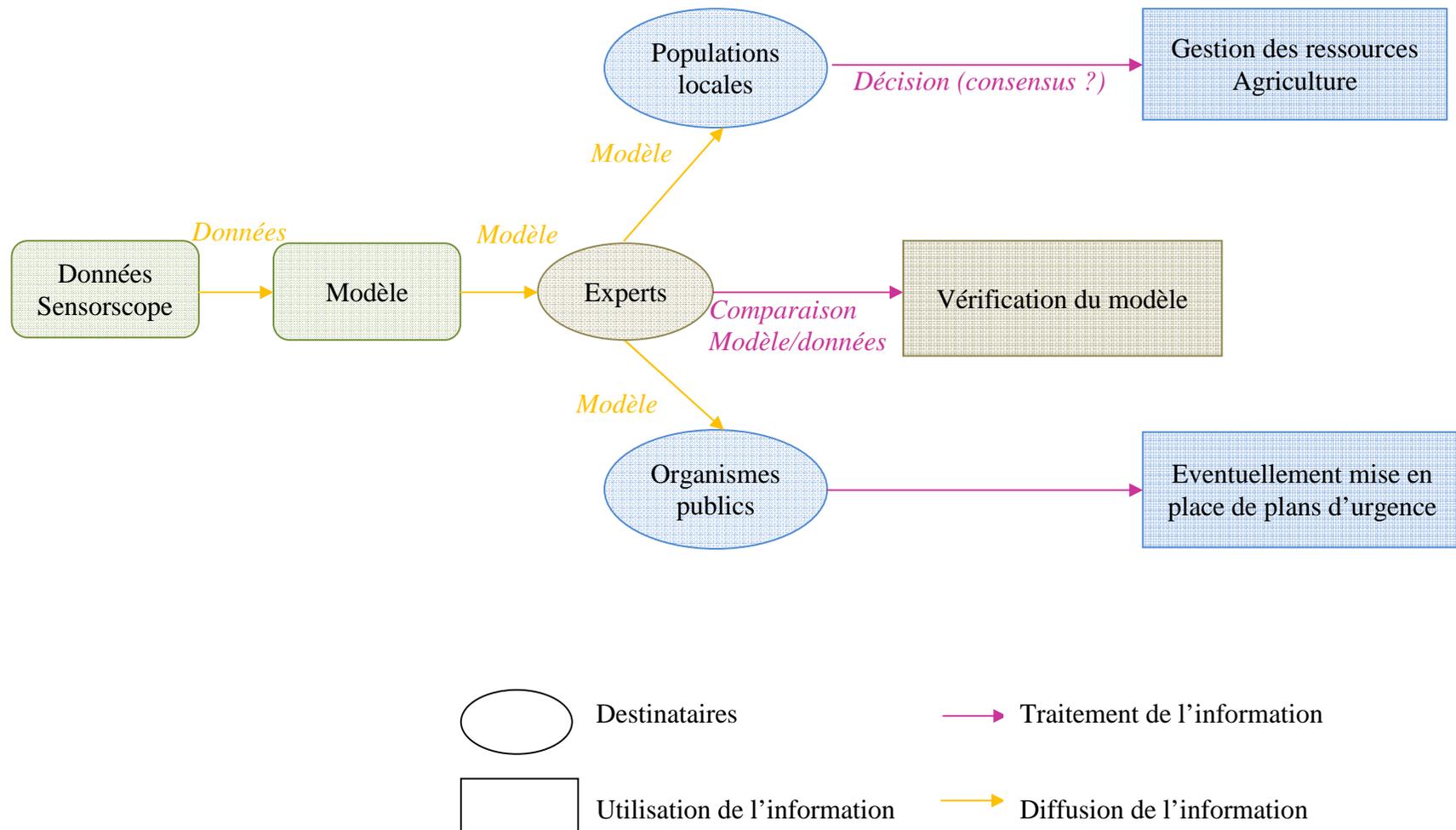


Figure 60 Schéma de l'exploitation des modèles prédictifs

### 3. *Conseil sur la base d'un modèle*

Là encore, il serait nécessaire d'impliquer un autre groupe de personnes ; leur rôle serait : premièrement de vérifier le modèle (qu'il soit prédictif ou non), comme pour le cas précédent, et deuxièmement de prendre et diffuser le conseil, sous une forme « binaire », à savoir « faites » ou « ne faites pas ».

#### a) Avantages

Il n'y a pas de difficultés pour les villageois à comprendre l'information reçue.

#### b) Inconvénients

Le groupe de personnes chargées de diffuser le conseil doit assumer l'incertitude liée aux modèles, et dédommager par exemple les villageois ou les organismes publics ayant reçu un mauvais conseil.

Le conseil peut être déconnecté des réalités sur place, par exemple les besoins quotidiens en eau du village, et apporter un conseil allant à l'encontre des intérêts des personnes ou de l'environnement.

Les populations locales ne prennent pas part à la décision, et pourraient être tentées de rejeter les conseils. D'autre part une distance se crée entre elle et leur environnement, ce qui va à l'encontre des principes pour une gestion durable des ressources.

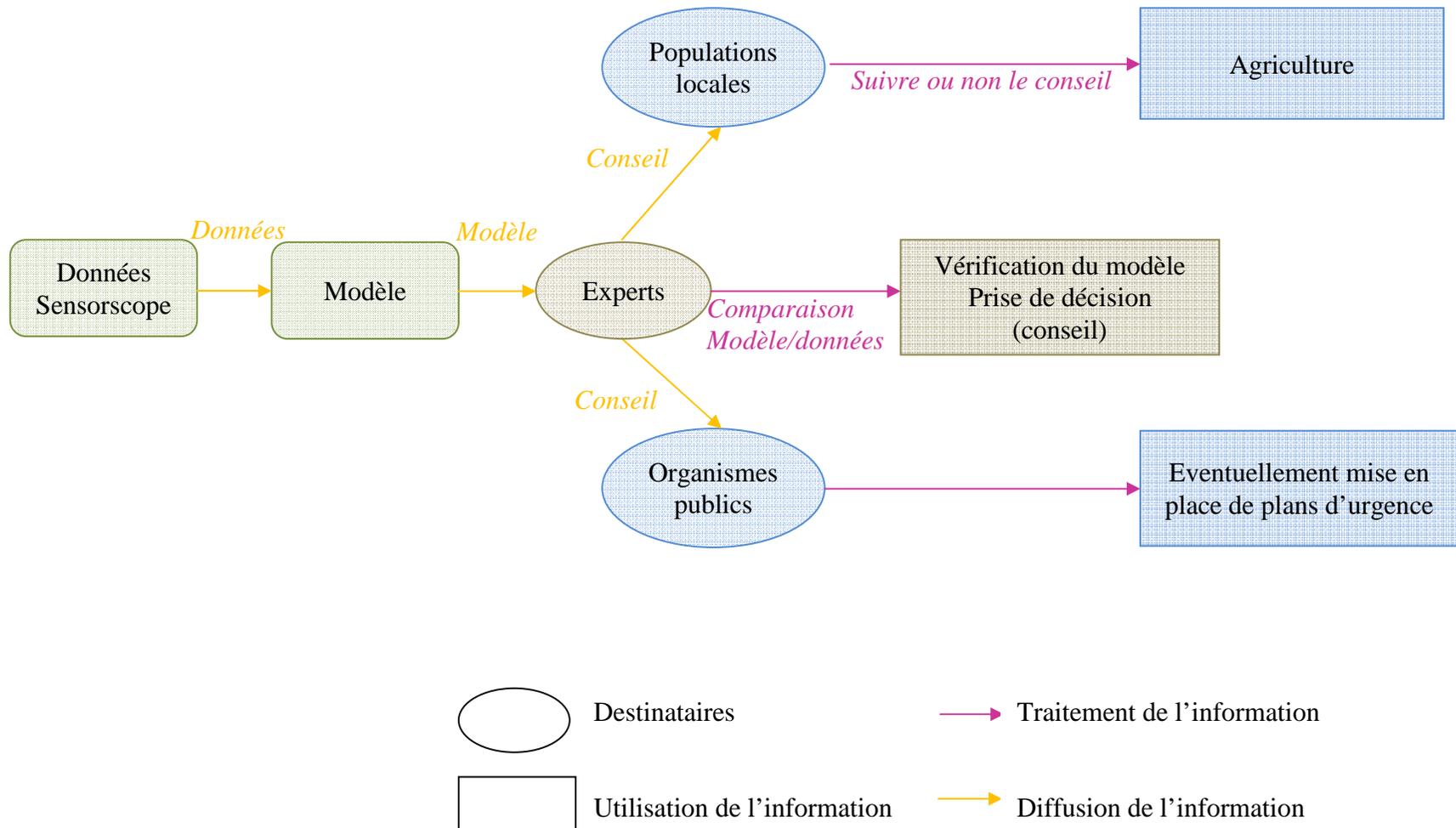


Figure 61 Schéma de l'exploitation des conseils

## VII. Conclusion

Un ensemble d'appareils de mesures des différents paramètres a été mis en place à deux endroits différents, dans des zones cultivées du village de Tambarga.

Le dysfonctionnement de la mesure du ruissellement ne permet pas de modéliser la réaction du sol à une pluie. D'autre part il paraît judicieux de revoir le protocole de mesure de l'interception.

Les mesures permettant de modéliser l'assèchement du sol ont toutes fonctionné, mais certaines réserves peuvent être avancées quant au fonctionnement des capteurs d'humidité du sol. On propose par ailleurs un protocole permettant la vérification de leur fiabilité.

Le modèle d'assèchement du sol ne semble pas être adapté pour des faibles profondeurs racinaires : il surestime l'assèchement. En définissant un paramètre supplémentaire  $e$  comme l'épaisseur de sol à prendre en compte pour le modèle, celui-ci donne de très bons résultats.

Pour la suite de la saison des pluies, il serait intéressant d'étudier plus en détails le comportement du modèle à mesure que la profondeur des racines du mil augmente.

D'un point de vue pratique, en combinant le modèle d'assèchement du sol et la réaction du mil à différentes périodes et intensités de sécheresse, on obtiendrait un modèle de prévision de l'état de santé du mil.

Ce type de prévisions, tout comme l'ensemble des données Sensorscope peut être diffusé et utilisé de différentes façons aux communautés locales et les organismes régionaux. Ces données pourraient permettre, à condition d'être judicieusement exploitées, un développement de l'agriculture, de la gestion des ressources, et également à une échelle plus large, une amélioration des politiques publiques en matière d'environnement et d'aménagement du territoire.



## VIII. Bibliographie

ANDRASKI B. J., SCANLON B. R., (2002), *Thermocouple psychrometry*, in DANE J. H., TOPP G. C., eds., *Methods of soil analysis, part 4, physical method*, Soil Science Society of America, Inc., N° 5: 609–642

ASSOULINE S., NARKIS K., TYLER S.W, LUNATI I., PARLANGE M.B, SELKER J.S, *On the diurnal soil water content dynamics during evaporation using dielectric methods, in press*

ATI O.F., STIGTER J., OLADIPO E.O. (2002), *A comparison of methods to determine the onset of the growing season in northern Nigeria*, International Journal of Climatology 22: 731-742

AUSTIN R.B., HENSON I.E., QUARRIE S.A. (1982), *Abscisic acid and drought resistance in wheat, millet, and rice*, Drought resistance in crops with emphasis on rice, International Rice Research Intitute p 171-180

BALME M., VISCHEL T., LEBEL T., PEUGEOT C., GALLE S., (2006), *assessing the water balance in the Sahel: Impact of small scale rainfall variability on runoff, Part 1: Rainfall variability analysis*, Journal of Hydrology 331: 336-348

BLENCOWE JPB, MOORE SD, YOUNG GJ, SHEARER RC, HAGERSTROM R, CONLEY WM, POTTER JS, (1960) Soil, Department of Agriculture Bulletin 462

BIDINGER F.R., MAHALAKSHMI V., TALUKDAR B.S., ALAGARSWAMY G. (1982), *Improvement of drought resistance in pearl millet*, Drought resistance in crops with emphasis on rice, International Rice Research Intitute p 368-374

BIELER P. (1992), *Agronomic and physiological aspects of postflowering drought tolerance of pearl millet (Pennisetum glaucum (L.)R.Br.) in the Sahel*, Diss ETH No 9791, Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich, Zurich, Suisse

BOHM W. (1979), *Methods of studying root systems*, Ecological studies 333

BORDES C., *La gestion des arbres par les paysans, étude d'une enclave au milieu des réserves forestières au sud-est du Burlina Faso*, Mémoire de fin d'études. Ecole d'Ingénieur en Agro-Développement International (ISTOM), Cergy-Pontoise, France

CLERGET B, HAUSSMANN BIG, BOUREIMA SS, WELTZIEN E, (2007) *Surprising flowering response to photoperiod: Preliminary characterization of West and Central African pearl millet germplasm*. Journal of SAT Agricultural Research vol 5 N°1.

COWAN I.R.,(1965), *Transport of water in the soil-plant-atmosphere system*, Journal of Applied Ecology Vol 2 N°1: 221-239

DANCETTE C. (1991), *Critiques des recherches sur le bilan hydrique en zone soudano-sahélienne*, IAHS n°99: 46-62

- DAVIDSON J.M., NIELSEN D.R., BIGGAR J.W., (1963), *The measurements and description of water flow through Columbia silt loam and Hisperia silt loam*, Hilgardia 34: 601-616
- DOORENBOS J., PRUITT W.O. (1977), *Guidelines for predicting crop water requirements*, FAO Irrigation and drainage paper 24
- D'ODORICO P., PORPORATO A. (2006), *Dryland Ecohydrology*, Springer
- DUTARTRE P., BARTOLI F., ANDREUX F., PORTAL J.M., ANGE A., (1993) *Influence of content and nature of organic matter on the structure of some sandy soils from West Africa*, Geoderma, 56 (1-4), p. 459-478.
- FAO (2005), *L'irrigation en Afrique en chiffre-Enquête Aguastat*, FAO Rapport sur l'eau N°29
- FELCH D. (1982), *Agrometeorology of Pearl Millet Production*, Guide to Agricultural Meteorological Practices (GAMP), Draft 3<sup>rd</sup> Edition (WMO-No.134), World Meteorological Organization
- FRANCA DA SILVA I., (1980), *Efeitos de sistemas de manejos e tempo de cultivo sobre as propriedades físicas de um Latossolo*, Thèse Faculdade de Agronomia (UFRGS), Porto Alegre, Brésil (non publiée)
- GREGORY P.J. (1982), *Interaction of shoot and root characteristics in the response of millet to drought*, Drought resistance in crops with emphasis on rice, International Rice Research Intitute p135-143
- GUERI LUS P.M. (2005), *Contribution à la réflexion sur la manière de documentation de Agrometshell (AMS) pour servir dans le suivi et la prévention*, Mémoire de Fin d'études, Université de Liège, Belgique
- HAJARE H.V., RAMAN N.S., JAYANT DHARKAR Er. (2009), *Evapotranspiration studies for Nagpur district*, WSEAS Transactions on Environment and Development Vol 5: 94-103
- JEEVANANDA REDDY S. (1996), *Measurements o soil, plant and total evaporation from millet in Niger*, Agricultural and Forest Meteorology 80: 289-294
- KASSAM A.H., KOWAL J.M. (1975), *Water use, energy balance and growth of Gero millet at Samaru, northern Nigeria*, Agricultural Meteorology 15: 333-342
- LAHIRI A.N., KHARABANDA B.C. (1965), *Studies on plant-water relationships: effects of moisture deficit at various developmental stages of bulrush millet*, Proc. Natl. Inst. Sci. India 31: 14-24
- MAHALAKSHMI V., BIDINGER F.R. (1987), *Effect of timing of water deficit on pearl millet (Pennisetum americanum)*, Field crops research 15: 327-339

- MAERTENS C. (1964) *Influence des propriétés physiques des sols sur le développement racinaire et conséquence sur l'alimentation hydrique et azotée des cultures*. Sciences de Sol 2
- NIANGADO O., (1989), *Production et amélioration variétale du mil au Mali*, Plantes vivrière tropicales, Ed. AUPELF-UREF. John libbey Eurotext. Paris, p 69-82
- NICHOLSON S.E., (1980), *The Nature of Rainfall Fluctuations in Subtropical West Africa*, American Meteorology Society 108:473-487
- NOURI M., REDDY K.C. (1991), *Utilisation de l'eau par le mil et le niébé en association et en culture pure*, IAHS n°99 : 421-429
- RADHOUANE L., MELLOULI H.J. (2007), *Effets d'un stress hydrique sur les rendements de deux écotypes locaux de mil (Pennistum glaucum (L.) R. Br.)*, Cahiers Agricultures Vol 16 n°1 : 17-22
- RADHOUANE L. (2008), *Caractéristiques du mil (Pennisetum glaucum (L.) R. Br.) en présence de contraintes hydriques*, C.R. Biologies 331 :206-214
- RAO A.S., SAXTON K.E. (1995), *Analysis of soil water stress for pearl millet in an Indian arid region using the SPAW Model*, Journal of arid environments 29:155-167
- RODRIGUEZ-ITURBE I., PORPORATO A. (2004), *Ecohydrology of water controlled ecosystems*, Cambridge University Press
- SISSON J.B., KLITTICH W.M., SALEM S.B. (1988), *Comparison of two methods for summarizing hydraulic conductivities of layered soil*, Water Resources Research 24(8):1271-1366
- SIVAKUMAR M.V.K. (1988), *Predicting rainy season potential from the onset of rains in southern sahelian and sudanian climatic zones of West Africa*, Agricultural and Forest Meteorology 42: 295-305
- SIVAKUMAR M.V.K. (1990), *Exploiting rainy season potential from the onset of rains in the Sahelian zone of West Africa*, Agricultural and Forest Meteorology 51: 321-332
- VAN OOSTEROM E.J., BIDINGER F.R., MAHALAKSHMI V., PAO K.P. (1996), *Effect of water availability pattern on yield of pearl millet in semi arid tropical environments*, Euphytica 89:165-173
- VERROT L., (2009), *Etude de la vulnérabilité de l'agriculture sahélienne face au changement climatique*, Rapport de stage, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Suisse
- WEISS A. (1983), *A quantitative approach to the Pruitt and Doorenbos version of the Penman equation*, Irrig Sci 4: 267-275