



Mise en place d'un dispositif de suivi hydrique de jardins urbains

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER EN INGÉNIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT
OPTION : **EAUX AGRICOLES**

Présenté par :

SEID AGGREY

Travaux dirigés par :

David RAMIER

Hydrologue, chargé de recherche au CEREMA

Philippe BRANCHU

Chef de l'unité qualité des eaux et des sols au CEREMA

Dial NIANG

Enseignant chercheur au CCREC

Jury d'évaluation du stage :

Président :

Membres et correcteurs :

Promotion 2012/2014



“Le travail de la pensée ressemble à un forage de puits, l’eau est trouble d’abord puis elle se clarifie.”

Proverbe chinois

REMERCIEMENTS

Mon projet de fin d'études (PFE) représente une période importante de ma vie à laquelle je ne serais parvenu sans les aides de quelques personnes.

Je me tourne tout d'abord vers les personnes, qui scientifiquement, m'ont permis de réaliser mon stage puis mon PFE. Je remercie tout particulièrement Monsieur David Ramier pour m'avoir proposé un sujet très formateur résultant d'un projet d'une grande envergure. Ces remerciements qui lui sont adressés sont d'autant plus justifiés qu'il a accepté par ailleurs d'être mon tuteur et à ce titre il m'a encadré, guidé et conseillé tout au long de ce PFE. . Son suivi hebdomadaire et sa disponibilité ont été déterminants.

Je tiens également à remercier l'ensemble de l'équipe du CEREMA Ile-de-France et plus particulièrement le personnel du site de Trappes (78). Son accueil et sa disponibilité m'ont permis de m'intégrer rapidement au sein du laboratoire où des réponses promptes et satisfaisantes ont été apportées à toutes mes sollicitations. Merci pour les cafés collectifs, pour les parties de foot, pour le trophée des entreprises !!! J'en garderai des souvenirs inoubliables.

Un merci tout particulier à Jeremie Cholet, mon binôme de terrain, son expérience, ses conseils et son aide ont été très précieux et à Yinghao Li pour sa bonne humeur au quotidien.

Je remercie Monsieur Philippe Branchu qui en dépit de ses charges a trouvé à chaque fois des réponses à mes sollicitations.

Je ne peux oublier de dire MERCI aux autres stagiaires du CEREMA, Mathilde, Claire, Khalil et Djiba dont la compagnie cordiale et l'accueil chaleureux ont constitué pour moi une aide inestimable. Celle-ci s'est traduite tout au long de notre stage par une ambiance cordiale de travail. Entre les lignes N et U en votre compagnie et les journées finalement beaucoup trop courtes je n'ai pas vu les cinq mois passer. Mon seul regret, c'est d'être parfois parti plus tôt.

Je tiens plus largement à remercier l'ensemble du personnel de l'Institut International d'ingénierie de l'eau et de l'environnement pour les enseignements dispensés et l'encadrement offert au cours des deux années passées à l'Ecole.

Merci également au jury de projet de fin d'études qui a bien voulu se réunir pour ma soutenance et pour ses pertinentes observations.

D'un point de vue personnel, je tiens surtout à remercier ma famille qui est toujours auprès de moi, dont les conseils m'ont permis d'arriver là où je suis. J'ai donc une pensée pour chacun :

- Mes parents pour leur dévouement, leur courage et l'ouverture vers les autres dont ils ont toujours fait preuve ; ils m'ont dès mon jeune âge inculqué la valeur du travail.
- Mes frères et sœurs dont la présence permanente à mes cotés apporte une sécurité et une joie de vivre très importante pour moi ;
- Tous mes amis de tout âge et de tout horizon qui m'ont soutenu.

RÉSUMÉ

La question du comportement de l'eau sur des surfaces particulières en milieu urbain notamment les jardins urbains se pose de plus en plus. Pour répondre à cette question, les mesures de la consommation en eau, des transferts dans le sol et du niveau de la nappe d'eau s'avèrent donc nécessaires. Pour ce faire, dans le cadre de ce rapport des parcelles de jardins ont été instrumentées pour un suivi en continu des paramètres (teneur en eau et succion) qui contrôlent les lois des écoulements en milieux non saturés.

Le travail de synthèse bibliographique préalablement réalisé sur la mesure de transfert hydrique dans le sol a permis de vérifier et de confirmer le choix du type d'instruments adapté aux conditions expérimentales qui prévoient notamment un suivi en continu pour une durée d'au moins une année des teneurs en eau et du déplacement de l'eau dans le sol à des profondeurs différentes.

Les premiers résultats obtenus dans cette étude montrent l'influence des conditions en surface sur ces paramètres qui se traduisent par les cycles de stockage/déstockage de l'eau et la propagation verticale des fronts d'humidité dans la zone non saturée ce qui peut être un gage de fiabilité des résultats observés.

Ces résultats ont permis de paramétrer la courbe de rétention hydrique du modèle de Van Genuchten (A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, 1980).

Mots-clefs:

- 1- Teneur en eau volumique
- 2- Zone non Saturée
- 3- Instrumentation
- 4- Succion
- 5- Courbe de rétention
- 6- Jardins associatifs urbains

ABSTRACT

The understanding of the water behavior on particular surfaces in urban environment notably the urban gardens arises more and more. To answer this question, the measures of the consumption in water, transfers in soil and the level of the underground water are necessary. To help with this process, in the setting of this report, parcels of gardens have been orchestrated for a non-stop follow-up of the parameters (soil water content and suction) that control the laws of the out-flows in unsaturated soil.

The bibliographic synthesis work previously achieved on the water transfer measure in soil permitted to verify and to confirm the choice of the type of instruments adapted to the experimental conditions that plan a non-stop follow-up notably for a length of at least one year of the contents in water and the displacement of water in soil to different depths.

The first results gotten in this survey show the influence of the conditions in surface on these parameters that it shows by the cycles of water clearance storage/clearance and the vertical propagation of the humidity fronts in the unsaturated zone what can be a pledge of reliability of the results observed.

These results were used to parameterize the water retention curve of the model of Van Genuchten.

Keywords:

- 1- Volumetric Water Content
- 2- Unsaturated zone
- 3- Instrumentation
- 4- Suction
- 5- Retention curve
- 6- urban community gardens

Avant propos

Le projet JASSUR, cadre du présent rapport, a été monté à l'initiative de l'Agence Nationale de Recherche (ANR). Il se propose d'éclairer de façon interdisciplinaire les fonctions, les usages, les modes de fonctionnement, les avantages ou les dangers potentiels qu'induisent les jardins associatifs au sein de villes durables en émergence. Ces **Jardins ASSociatifs URbains** sont, sous des appellations, des statuts et des formes variés, en pleine expansion dans de nombreux pays industrialisés et notamment en France. Le projet JASSUR entend identifier les modes d'action nécessaires au maintien voire à la restauration, au développement ou à l'évolution de ces jardins associatifs sur des territoires urbains confrontés aux défis de la durabilité. Pour ce faire, il s'appuie sur un consortium de 12 partenaires de la recherche (diverses institutions) et du monde associatif dans sept agglomérations françaises (Lille, Lyon, Marseille, Nancy, Nantes, Paris et Toulouse).

Le projet se fonde sur une question centrale : quels services assurent les jardins associatifs urbains dans le développement durable des villes ? Ces services éco-systémiques rendus à la ville, dans la complétude de l'acception de ce terme proposée par le Millenium Ecosystem Assessment (approvisionnement, régulation, soutien, services culturels) sont encore très mal connus.

Le programme scientifique du projet est organisé en une tâche de coordination (tâche 1) et quatre taches de production de connaissances. La tâche 2 traite des acteurs impliqués dans la mise en place et le fonctionnement des jardins, de la gouvernance et de leur place dans l'urbanisme. La tâche 3 analyse le service d'approvisionnement alimentaire (pratiques culturelles, productions et destinations des produits, mesures des quantités consommées et des apports nutritionnels, représentations des jardiniers quant aux intérêts et aux dangers des jardins). La tâche 4 traite des services éco-systémiques de régulation et de soutien, en privilégiant ceux liés à la biodiversité et à la régulation hydrique. Cette tâche traite aussi de la métrologie des dangers à travers deux sources majeures de pollution potentielle, le sol et l'atmosphère. La tâche 5 proposera en lien avec les tâches 3 et 4, des modes de gestion des pollutions envisageables par les collectivités (dont bioremédiation et phytoremédiation).

Le présent rapport intervient dans le cadre de la tache 4 et rend compte de l'instrumentation installée pour les mesures en continu des paramètres (teneur en eau et succion) qui contrôlent les lois d'écoulements dans la zone non saturée (ZNS).

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : appareillage utilisé et schéma de principe d'une sonde à neutrons (Melounou, 1998) source Vincent M (2003)	7
Figure 2 : différentes sondes TDR et appareil de mesure (Pereira dos Santos, 1997)	8
Figure 3 : coefficient α pour deux géométries de sonde capacitive (Pereira dos Santos, 1997)	9
Figure 4 : Méthode du papier filtre (Delage & CUI Y, 2000).....	10
Figure 5 : Schéma d'un tensiomètre	12
Figure 6 : dispositif expérimental classique utilisant les bougies poreuses (site INRA).....	13
Figure 7 : localisation du site et des parcelles pressenties	17
Figure 8 : Schéma conceptuel de l'installation pour la mesure des flux d'eaux et des polluants dans une parcelle de jardin	19
Figure 9 : Photo du site tensiomètre, bougies poreuses et humidimètre	19
Figure 10: coupe schématique d'un tensiomètre T8 avec photo d'installation de ces tensiomètres...	20
Figure 11: Sonde WaterScout et la photo de sa mise en place	21
Figure 12: préleveurs PTFE/quartz et la photo de leur mise en place.....	22
Figure 13: le pluviomètre sur le site de Garches	23
Figure 14: Schéma de principe du pluviomètre installé à Garches	24
Figure 15: courbe de calibration du sol.....	27
Figure 16: Evolution de la pluie et de la succion	28
Figure 17: Evolution des profils de succion	30
Figure 18 : Evolution de la teneur en eau	31
Figure 19: courbes de rétention d'eau du sol à 30 cm paramètre hydrus 1D.....	33
Figure 20 : courbes de rétention d'eau du sol à 30 cm paramètres calés	34
Figure 21 : courbes de rétention d'eau du sol à 50 cm paramètres calés	34

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : comparaison succincte des différentes méthodes de mesure de teneur en eau des sols (à partir des données constructeurs).....	14
Tableau 2 : Ordre de grandeur des suctions pour différentes méthodes, FREDLUND et al (1993)	15
Tableau 3 : Liste des capteurs du site de Garches.....	24
Tableau 4 : calcul de la densité sèche du sol de la parcelle instrumentée	26
Tableau 5: jeux de paramètres du modèle de van Genuchten (1980)	33
Tableau 6 : jeux de paramètres du modèle de van Genuchten (1980).....	34

LISTE DES ABRÉVIATIONS

2iE : Institut International d'Ingénierie

AFNOR : Association Française de la Normalisation

ANR : Agence Nationale de la Recherche

CCREC : Centre Commun de Recherche « Eau et Climat »

Cerema : Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

JASSUR : Jardins ASSociatifs Urbains

PVC : Polychlorure de Vinyle

RMP : Résonance Magnétique Protonique

TDR : Réflectométrie en domaine temporelle

VWC : Volumetric Water Content

ZNS : Zone Non Saturée

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	ii
RÉSUMÉ.....	iii
ABSTRACT.....	iv
Avant propos	v
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	vii
TABLE DES MATIERES.....	1
Introduction.....	3
1 ^{ère} Partie : Synthèse bibliographique.....	5
I. Introduction de la synthèse bibliographique.....	5
II. Méthodes de mesure et suivi	6
2.1 Méthodes de mesure et suivi des teneurs en eau du sol	6
2.1.1 Mesure de la résistivité électrique	6
2.1.2 Mesure par sonde à neutrons	6
2.1.3 Mesure par sonde TDR.....	7
2.1.4 Mesure par sondes capacitives	8
2.1.5 Mesure par pesée (teneur en eau pondérale)	9
2.2 Méthodes de mesure et suivi de la succion.....	10
2.2.1. Définition de la succion.....	10
2.2.2. Mesure par la méthode du papier filtre.....	10
2.2.3. Mesure psychométrique	11
2.2.4. Mesure tensiométrique	11
2.2.5. Autres méthodes	12
2.3 Prélèvement par bougie poreuse.....	12
2.3.1 Définition.....	12
III. Comparaison des méthodes de mesure	13
3.1 Méthodes de mesure de teneur en eau	13
3.2 Méthodes de mesure de la succion.....	14
3.3 Conclusion et méthodes choisies	15
2ème Partie : Matériel et méthodes.....	16
IV. Equipement du site de Garches et suivi de la ZNS.....	16

Mise en place d'un dispositif de suivi hydrique de jardins urbains

4.1	Objectifs du suivi et vue d'ensemble sur l'instrumentation mise en place	16
4.2	Dispositif de suivi de la succion.....	20
4.2.1	Tensiomètres T8	20
4.3	Dispositif de suivi in situ de la teneur en eau	21
4.3.1	Sondes WaterScout SM100.....	21
4.4	Dispositif de suivi du flux de polluants	21
4.4.1	Les bougies poreuses	21
4.5	Autres équipements	23
4.5.1	Station météorologique	23
4.5.2	Centrale d'acquisition des données.....	24
4.5.3	Tableau récapitulatif des matériels installés.....	24
4.6	Etalonnage des sondes WaterScout SM100	25
3ème Partie : Résultats		27
V. Interprétation des premiers résultats.....		27
5.1	Evolution de la succion dans la zone non saturée.....	28
5.2	Evolution de la teneur en eau dans le zone non saturée	30
5.3	Paramétrisation de la courbe de rétention hydrique expérimentale- modèle de Van Genuchten (1980)	32
Conclusions et perspectives		35
Bibliographie		36
Annexes.....		37
Annexe 1 : Relevé des données d'une centrale Campbell		38
Matériel nécessaire :		38
1.	Connection à la centrale	38
2.	Vérifier la cohérence des données	38
3.	Sauvegarde des données	38
Annexe 2 : Relevé des données d'une centrale Hobo.....		39
1.	Matériel nécessaire	39
2.	Lancement.....	39
3.	Lecture de l'enregistreur.....	41
4.	Lecteur d'un fichier .Hobo	44
'CR800 Series - Programme Calibration Sonde		48

Introduction

Le développement des jardins associatifs en milieu urbain a amené le milieu scientifique à évaluer leur potentiel à répondre à différents services écosystémiques tels que la production de biomasse, le soutien à la biodiversité et la régulation des flux d'eau et de polluants. En effet, ces jardins font partie des rares surfaces urbaines perméables et à ce titre pourraient modifier le bilan hydrologique des villes. Cependant, les pratiques liées au jardinage posent questions. Les problématiques qui nous intéressent ici sont :

- Quel est le rôle des jardins urbains sur les transferts des polluants ? Les flux de polluants vers les nappes d'eau urbaines et les cours d'eau péri-urbains seront-ils augmentés du fait de la perméabilité de la surface des jardins et de la possible utilisation d'intrants par les jardiniers ou au contraire, la baisse des volumes d'eau ruisselée associés à la diminution des surfaces imperméables et à la capacité épuratoire du sol contribueront à une diminution des transferts de polluants vers le milieu récepteur ?
- Les jardins ont-ils leur place dans les stratégies de gestion des eaux pluviales des villes au même titre que d'autres techniques alternatives ?

Pour cela, il est nécessaire de quantifier les flux d'eau et de polluants sur des parcelles de jardin associatif urbain afin de pouvoir réaliser des bilans hydriques.

L'objectif de cette approche est de comprendre le comportement de l'eau sur ces surfaces particulières par rapport au reste du milieu urbain. Les mesures de la consommation en eau, des transferts dans le sol et du niveau de la nappe d'eau sont donc nécessaires.

Pour atteindre les objectifs du projet, la mise en place du site expérimental était la première tâche à effectuer. Pour cela différents travaux ont été réalisés, en particulier :

- La recherche de l'emplacement du futur site sur la base de critères d'accessibilités, de diversité de pratiques culturelles (choix de culture et mode de production), de l'acceptation des contraintes des enquêtes et des suivis et de la concertation établie avec les autres tâches en lien avec le projet. Sur une vingtaine de sites potentiels expertisés sur la base des critères ci-haut cités, le choix s'est finalement porté sur Garches, à l'Ouest de Paris.

Mise en place d'un dispositif de suivi hydrique de jardins urbains

- L'instrumentation du site pour le suivi en continu des paramètres caractéristiques de la zone non saturée à différentes profondeurs (suctions et teneur en eau) et des paramètres météorologiques (la pluviométrie, la température, l'humidité...).
- Le relevé, le contrôle, l'analyse et l'interprétation à intervalles réguliers (15 jours environ) des données ; les profils de teneur en eau et de succion sont établis afin de suivre l'état de saturation de la ZNS en lien avec les conditions météorologiques.

Le présent rapport rend compte des instruments utilisés (choix des méthodes de mesure, étalonnage) et de leur instrumentation sur site pour les mesures en continu des paramètres (teneur en eau et succion) qui contrôlent les lois d'écoulements dans la zone non saturée (ZNS).

Il présentera les premiers bilans hydriques mais il faut noter que l'acquisition des données et l'analyse de l'évolution des profils de saturation et des teneurs en eau au droit du site se poursuivront au delà de ce rapport, au moins pour un cycle hydrologique complet.

1^{ère} Partie : Synthèse bibliographique

I. Introduction de la synthèse bibliographique

La problématique posée en introduction du présent rapport rappelle la nécessité de mesurer les paramètres hydrodynamiques (teneur en eau et la succion) du sol non saturé. L'analyse de leurs évolutions et l'éventuelle corrélation qu'ils peuvent avoir avec les conditions climatiques en surface sera un pas important vers l'atteinte de l'objectif du projet. Le lien entre ces deux paramètres qui est caractérisé par la courbe de rétention hydrique sera particulièrement observé.

Outre ces paramètres, une analyse qualitative des eaux présentes dans les interstices des pores constituera une première approche vers l'atteinte de l'autre objectif du projet.

C'est pour ces raisons qu'une synthèse des travaux déjà réalisés s'est imposée.

La présente synthèse bibliographique fait état des connaissances de la mise en œuvre d'un système d'instrumentation sur des sites expérimentaux, comme celui qui est prévu dans le projet JASSUR. Elle rassemble les principales méthodes et outils, qui permettent la mesure in situ, déjà menées dans des conditions semblables à celles projetées dans le cadre de notre stage, avec suivi des teneurs en eau et des déplacements de l'eau dans le sol.

Depuis des décennies, diverses techniques de mesure de l'humidité du sol ont été expérimentées et développées pour suivre le transfert d'eau et de solutés en laboratoire ou in situ. L'inventaire des techniques de mesure qui suit s'appuie principalement sur les travaux de Vincent *et al.* (2006) et de Amraoui *et al.* (2008) et sur d'autres références bibliographiques plus anciennes.

II. Méthodes de mesure et suivi

2.1 Méthodes de mesure et suivi des teneurs en eau du sol

2.1.1 Mesure de la résistivité électrique

Les méthodes électriques sont utilisées non seulement pour la prospection de formations géologiques et d'aquifères (Keller et Frischknecht, 1966 ; Mac Neill 1980) mais également pour une évaluation indirecte de la teneur en eau du sol, sachant que la résistance électrique d'un sol dépend certes de sa nature lithologique, de sa texture, de sa concentration en sel soluble mais aussi de sa teneur en eau. Cette méthode de suivi de la teneur en eau dans le sol a l'avantage d'être non destructrice et propose une mise en œuvre simple et peu coûteuse.

Par ailleurs, elle requiert des interventions régulières sur sites pour l'acquisition des mesures, ce qui constitue un handicap pour un suivi en continu sur une longue période quand bien même des expériences dans ce sens ont déjà été effectuées. Ainsi, pendant un an Brunet *et al* (2003) ont suivi un système de sondages électriques verticaux avec des mesures à chaque épisode climatique particulier. Cette technique a surtout été appliquée en agronomie pour évaluer la dessiccation du sol en fonction du type de culture. Les résultats obtenus renseignent sur la faible corrélation entre les variations de résistivités électriques mesurées (qui diminuent lorsque la teneur en eau augmente) et la teneur en eau. Cette corrélation n'est pas assez flagrante même après corrections des valeurs de résistivité en fonction de la température.

2.1.2 Mesure par sonde à neutrons

La sonde à neutrons est constituée d'une source radioactive et d'un détecteur. On la place à différentes profondeurs sur le long du tube mis dans le sol. Elle est exclusivement utilisée pour les mesures in-situ. Les neutrons radialement émis à haute énergie par la sonde sont réfractés dès qu'ils heurtent les atomes d'hydrogène de l'eau présents dans un certain volume appelé sphère d'influence dont le rayon est de l'ordre de 10 cm dans un sol humide et peut atteindre 25 cm dans un sol sec. Au niveau de la sonde un détecteur compte à intervalle de temps régulier le nombre des neutrons lents qui reviennent vers la sonde. Ce nombre est proportionnel à la teneur en eau volumique du sol. Ces deux grandeurs sont reliées par une loi définie lors d'une calibration effectuée au laboratoire (mesures classiques par pesées). Les

Mise en place d'un dispositif de suivi hydrique de jardins urbains

mesures sont effectuées en glissant la sonde neutronique dans un tube en alliage d'aluminium enfoncé verticalement dans le sol et laissé en place (figure 2).

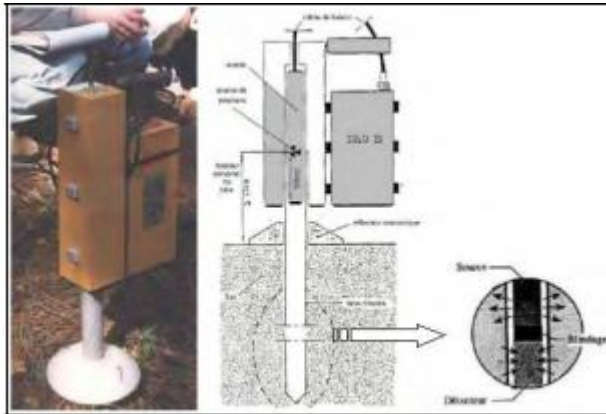


Figure 1 : appareillage utilisé et schéma de principe d'une sonde à neutrons (Melounou, 1998) source Vincent M (2003)

Cette technique permet une obtention rapide et récursive des mesures (de précision très acceptable) sans risque d'altération du milieu. Toutefois la nécessité de mettre en place un tube d'accès pour la réalisation des mesures rend difficile la spatialisation et impossible l'automatisation des mesures. La grande difficulté de cette technique est l'utilisation des sources radioactives qui impose des règles drastiques de sécurité.

2.1.3 Mesure par sonde TDR

Comme la méthode précédente, la réflectométrie en domaine temporelle (TDR) permet une mesure indirecte et non destructive de l'humidité et de la conductivité électrique des sols. Le principe de mesure est basé sur le contraste de permittivité électrique apparente du milieu : à savoir la mesure du temps de propagation d'une onde électromagnétique à haute fréquence (1MHz à 1 GHz). Ce temps est fonction de la constante diélectrique relative ϵ du milieu, elle-même étroitement dépendante de l'humidité θ du sol selon la relation suivante :

$$\theta = 4.310^{-6}\epsilon^3 - 5.5.10^{-4}\epsilon^2 + 2.92.10^{-2}\epsilon - 5.3.10^{-2}$$

La technique TDR est relativement ancienne car les travaux nécessaires pour développer le concept ont été menés dans les années 70. Selon Topp *et al.* (2003) les premières expériences

Mise en place d'un dispositif de suivi hydrique de jardins urbains

in-situ ont eu lieu en 1979 dans trois sols à granulométries contrastées (sol limoneux, limono-argileux et argileux).

De manière générale plusieurs auteurs conviennent que l'utilisation des sondes TDR pour l'évaluation des teneurs en eau d'un sol in-situ présente moins de difficultés pratiques que celle de sonde à neutrons et conduit à une meilleure précision des mesures. Il faut aussi noter qu'outre ces avantages, la mise en œuvre de la sonde TDR (figure 1) au delà d'une certaine profondeur s'avère fastidieuse.

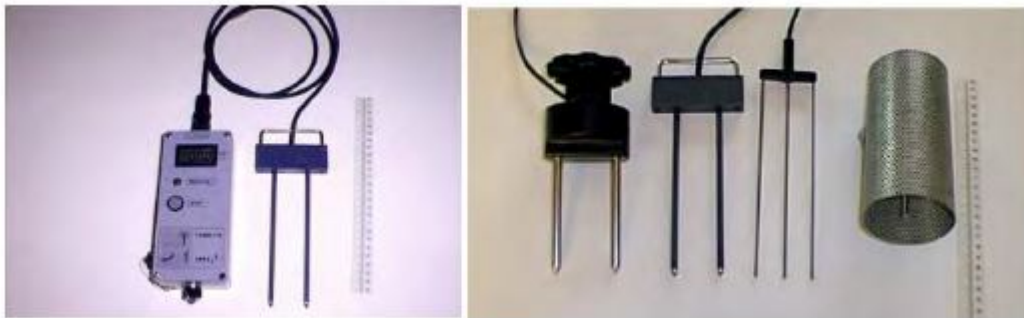


Figure 2 : différentes sondes TDR et appareil de mesure (Pereira dos Santos, 1997)

2.1.4 Mesure par sondes capacitives

Initialement conçues pour des usages agronomiques pour le suivi de l'évolution de l'humidité, dans des parcelles agricole, à des faibles profondeurs (Chanzy, Gaudu, & Chadoeuf, 1997) les techniques de mesure par sondes capacitives ressemblent aux techniques TDR. Elles sont basées également sur la caractérisation de la constante diélectrique du sol. L'introduction d'électrodes dans le sol, par l'intermédiaire desquels on applique un champ électrique sinusoïdal, conduit à la formation d'un condensateur de capacité C mesurable. Selon Pereira dos Santos (1997) cité par Vincent *et al* (2006) la capacité est donnée par la relation suivante $C = a \times k^{\epsilon_0}$ où ϵ_0 est la constante diélectrique du vide, k la permittivité électrique relative du sol et a un coefficient lié à la géométrie de la sonde capacitive employée (figure 3). La grande différence entre la permittivité électrique de la plupart des minéraux (comprise entre 2 et 12) et celle de l'eau (80) indique que la capacité est très dépendante de la teneur en eau du sol (Baran, 2005)

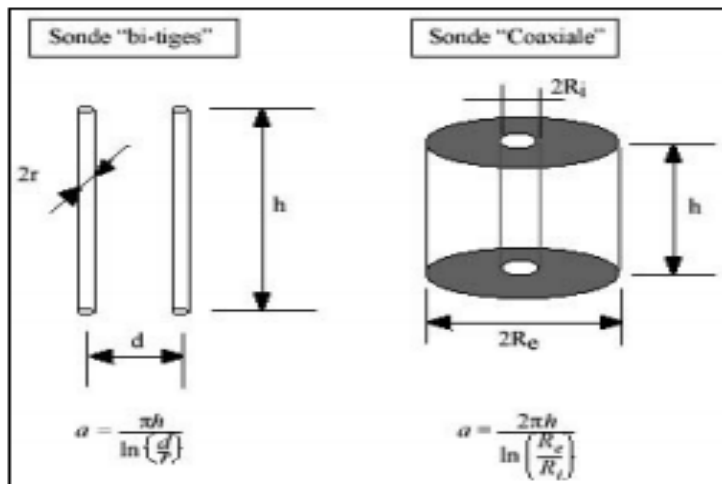


Figure 3 : coefficient a pour deux géométries de sonde capacitive (Pereira dos Santos, 1997)

Les sondes capacitatives sont très peu utilisées sans que de réelles limites d'utilisation soient clairement avancées. Toutefois, la tendance laisse croire que son utilisation limitée peut s'expliquer par la suspicion d'un défaut de précision de mesure.

Elles semblent plus performantes et précises pour suivre la variation de salinité du sol plutôt que les mesures de teneur en eau (Robinson, et al., 2003).

2.1.5 Mesure par pesée (teneur en eau pondérale)

Cette méthode couramment utilisée, se base sur un prélèvement d'échantillon de sol avant des mesures au laboratoire. Le principe consiste à prélever un échantillon (humide) qu'on pèse dans un court délai après son prélèvement. L'échantillon est ensuite placé à l'étuve à 105 °C pendant au moins 24h puis de nouveau pesé. Une comparaison des masses humides et sèches permet d'estimer la teneur en eau pondérale des sols. Cette méthode normalisée (NF P 94-050 : AFNOR, 1995) quoique destructrice, car elle nécessite un prélèvement, permet d'obtenir un résultat assez fiable mais pas en temps réel (délai d'au moins 24 heures). Il faut donc à cet effet veiller à ce que la dessiccation soit complète et qu'il n'y ait pas de perte par évaporation lors du prélèvement et du transport.

Cette méthode, dont le suivi en continu semble impossible ou à tout le moins très fastidieux, est intimement liée aux autres techniques développées car elle est indispensable pour leur calage.

2.2 Méthodes de mesure et suivi de la succion

2.2.1. Définition de la succion

Dans les sols non saturés, l'existence conjointe d'une phase gazeuse et d'une phase liquide provoque le développement de ménisques capillaires, ce qui se traduit par le fait que la pression de l'eau est négative, du fait de la tension gravitaire exercée par l'eau. Cette pression négative est appelée succion (Vincent, Bouchut, Le Roy, & Surdyk, 2006).

2.2.2. Mesure par la méthode du papier filtre

La méthode du papier filtre est une méthode indirecte dont la mise en œuvre est simple et peu coûteuse. Elle permet de mesurer la succion dans une très large gamme mais elle n'est pas adaptée aux mesures in situ. Elle se base sur l'emploi d'un papier filtre dont la courbe de rétention est préalablement définie. Selon Mouroux *et al.* (1988) cité par Vincent *et al.* (2006) à l'équilibre, le potentiel du sol est égal à celui du papier filtre avec lequel il est en contact et la succion du sol peut alors être évaluée par la détermination de la teneur en eau du papier filtre.

Elle consiste à insérer une triple épaisseur de papier-filtre (figure 4) dans un sol de forme cubique d'environ 3 cm d'arête placé dans une éprouvette et attendre l'équilibre des succions, en évitant toute évaporation (on peut paraffiner l'éprouvette ou l'envelopper soigneusement d'un sac plastique). On extrait ensuite les papiers filtres de l'éprouvette et l'on détermine la teneur en eau de la feuille centrale, non polluée, par une pesée au 1/10 000^e gramme près. La lecture sur la courbe d'étalonnage permet d'obtenir directement le pF (le log décimal de la succion exprimée en cm ; $pF = \log h$) de l'échantillon.



Figure 4 : Méthode du papier filtre (Delage & CUI Y, 2000)

2.2.3. Mesure psychométrique

Les techniques psychométriques permettent les mesures de l'humidité relative (HR) à proximité de l'eau interstitielle du sol non saturé, ce qui permet la déduction de la succion par application de la loi de Kelvin. Cette méthode assez sophistiquée très peu utilisée en physique de sol est limitée à des mesures de succion jusqu'à une valeur maximale de 7 MPa au-delà de laquelle les molécules de l'eau se raréfient pour arriver à la condensation. Cette limite est repoussée jusqu'à une dizaine de MPa par l'utilisation du psychomètre à miroir.

Le psychomètre à thermocouple, généralement utilisé, fonctionne comme suit : le passage d'un courant continu par la jonction thermocouple permet de créer un contraste de température entre les deux thermomètres (sec et humide) par effet Peltier. Cet écart de température permet la création d'une force électromotrice au niveau de la jonction (effet Seebeck) qui permet d'accéder à la valeur de l'humidité relative.

2.2.4. Mesure tensiométrique

Le tensiomètre est le plus ancien appareil de mesure de succion. Il est constitué d'un petit réservoir d'eau désaéré et déminéralisé dont une extrémité est recouverte par une couche de céramique poreuse qui reste saturée à tout niveau de succion et qui assure la continuité entre le sol non saturé et la chambre du capteur (figure 5). Il est connecté à un manomètre ou piézomètre pour mesurer la pression négative du sol.

Le tensiomètre est introduit dans un trou foré à la tarière dans le sol ou placé dans une éprouvette contenant l'échantillon. Lorsque l'eau du réservoir est en équilibre avec celle du sol, la pression négative du tensiomètre renseigne sur la pression de l'eau du sol. Les tensiomètres permettent des mesures maximales de succion de l'ordre de 80 Kpa, valeur au-delà de laquelle peut apparaître le phénomène de cavitations. Des systèmes permettant une extension de la gamme de mesure jusqu'à 3 Mpa sont développés par des chercheurs en 1993 puis améliorés en 1999.

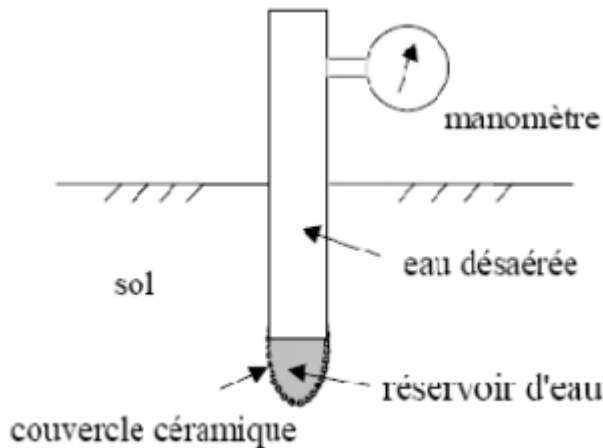


Figure 5 : Schéma d'un tensiomètre

2.2.5. Autres méthodes

Il existe d'autres méthodes de mesure de la succion du sol. Notamment la plaque de succion, la méthode de la suppression d'air et la méthode osmotique qu'on passera car elles sont très peu utilisées.

2.3 Prélèvement par bougie poreuse

Le suivi du flux de polluant dans le sol des parcelles de jardins nécessite un prélèvement d'échantillon d'eau représentatif qui sera par la suite analysé. La méthode qui minimise le risque d'introduction de polluants potentiels lors de sa mise en place et qui permette de prélever de l'eau présente dans les interstices du sol est le prélèvement par bougie poreuse.

2.3.1 Définition

Sur le site internet de l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) (2006)), Balif et Muller (1990) ont défini la bougie poreuse comme un dispositif de prélèvement de l'eau libre du sol, formé d'une tête de prélèvement en céramique poreuse et d'un tube en PVC fonctionnant comme une chambre de mie en dépression, pour récolter l'eau du sol à travers la céramique (figure 6).

L'utilisation des bougies poreuses pour prélever la solution du sol est devenue fréquente dans les recherches sur la qualité des eaux et sur l'environnement selon Addiscott (1990) cité par Bouarfa *et al.* (1993).

Mise en place d'un dispositif de suivi hydrique de jardins urbains

Cette méthode a l'avantage d'être une méthode de faible destruction de la structure, faible perturbation du système racinaire des plantes en places, faible modification de la composition chimique des eaux du sol et peu coûteuse.

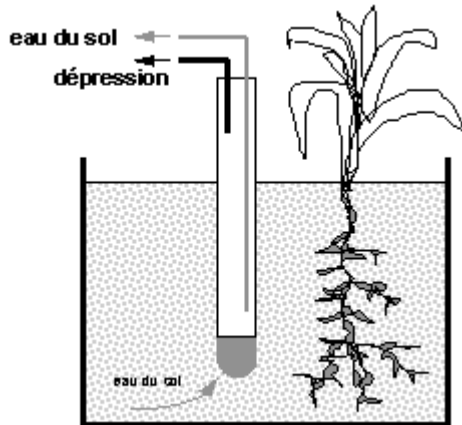


Figure 6 : dispositif expérimental classique utilisant les bougies poreuses (site INRA)

III. Comparaison des méthodes de mesure

3.1 Méthodes de mesure de teneur en eau

Le tableau 1 ci-dessous résume les différentes méthodes de mesure de teneur en eau dans le sol et en présente une comparaison succincte. La précision de la mesure, le volume de mesure, la calibration, la reproductibilité ... font l'objet d'une comparaison dans le tableau.

Cette comparaison permettra en accord avec les conditions expérimentales de tirer une conclusion et de choisir la méthode qui serait la mieux adaptée aux conditions projetées.

Les cases non remplies dans le tableau signifient que peu ou pas d'informations sur l'élément comparé ne sont clairement identifiées dans les travaux antérieurs.

Mise en place d'un dispositif de suivi hydrique de jardins urbains

Tableau 1 : comparaison succincte des différentes méthodes de mesure de teneur en eau des sols (à partir des données constructeurs)

Caractéristiques	Sonde à neutron	TDR	Sonde capacitive	Résistivité électrique	Pesée échantillon
Précision	Fonction du temps de comptage et de l'étalonnage (+/- 0,002 g/cm ³)	+/- 2%	+/- 2%	+/- 2%	Précise si mise en œuvre respectée
Volume de mesure	Sphères de rayon 10 à 25 cm				Volume souhaité
Calibration	Oui	Souhaitable	Oui	Non	Non
Reproductibilité	Oui				
Profondeur de mesure	Pas de mesure en proche surface (inférieur à 5-10 cm)-quelques centimètres à plusieurs suivant la nature du sol : contrainte d'installation				Profondeur souhaitée
Remarques	Forte contrainte réglementaire (source neutron)	Mesure en continu-difficultés d'installation	Mesure en continu-difficultés d'installation	Mise en œuvre simple et peu coûteux, pas de suivi en continu	Fastidieux-pas de suivi en continu

3.2 Méthodes de mesure de la succion

Les différentes techniques de mesure de la succion présentées peuvent être scindées en deux grandes catégories avec chacune des avantages et des inconvénients. Les techniques de type tensiométrique et psychométrique qui permettent une mesure réelle et directe de la succion, et les techniques du type suppression d'air, méthode osmotique, qui imposent et maintiennent une succion à une valeur prédéterminée.

Masekanya (2008) précise que chaque technique est adaptée en une gamme de succion particulière en reprenant le tableau (tableau 2) de Fredlund *et al.* (1993) précisant les ordres de grandeurs de la succion relatifs à chacune des méthodes.

Mise en place d'un dispositif de suivi hydrique de jardins urbains

Tableau 2 : Ordre de grandeur des suctions pour différentes méthodes, FREDLUND et al (1993)

Méthode	Suction mesurée	Domaine d'application (kPa)	Temps d'équilibre	Paramètres sensibles
Psychomètre	Totale	100- 10000	Des heures	Température
Papier filtre	Totale ou matricielle	100- 10000	Des semaines	Température
Plaque de suction	Matricielle	< 90	Des heures	Bon contact
Tensiomètre	Matricielle	< 90	Des heures	Bon contact
Suppression d'air	Matricielle	0-1500	Des jours	Température
Osmotique	Matricielle	0-1500	Des jours	Température

3.3 Conclusion et méthodes choisies

L'inventaire des méthodes existantes pour la mesure de la suction et de la teneur en eau montre qu'il n'existe pas à l'heure actuelle de méthode de mesure unique, universelle et applicable à toutes les situations, mais au contraire, une gamme assez vaste de méthodes souvent complémentaires les unes par rapport aux autres. Un arbitrage au cas par cas s'impose selon qu'on soit à l'échelle d'un bassin versant ou d'une parcelle ou que l'on fasse des investigations dans les horizons superficielles du sol ou en profondeur par exemple.

- Les mesures d'humidités pondérales ne peuvent être envisagées dans le cas de ce projet. Les mesures ponctuelles et non immédiates (délai de séchage) ne permettront pas d'atteindre les objectifs fixés.
- Les fortes contraintes de sécurité liées à l'utilisation de la sonde à neutrons ne plaident pas pour cette technique.
- Les sondes TDR bien que plus fréquemment utilisées et ne présentant aucun inconvénient majeur identifié mais elles ne seront pas utilisées.
- Les sondes capacitatives auront donc notre préférence pour des bons résultats qu'elles offrent et pour leur coût peu élevé.
- Pour la mesure de la suction les tensiomètres, plus anciens et plus adaptés à la mesure in situ sont envisagés. Les expériences passées confirment la fiabilité des résultats obtenus.

2ème Partie : Matériel et méthodes

IV. Equipement du site de Garches et suivi de la ZNS

4.1 Objectifs du suivi et vue d'ensemble sur l'instrumentation mise en place

Deux parcelles de jardin ont été choisies à Garches pour être instrumentées ayant pour principale caractéristique une qui utilise un bac de récupération d'eaux pluviales et une autre qui ne possède pas un tel dispositif. La première parcelle est régulièrement jardinée et la deuxième fait l'objet d'un jardinage moins intensif.

Le site de Garches étant divisé en deux zones topographiques distinctes : une partie haute et une partie basse, le choix est fait de telle sorte qu'on ait une parcelle sur chacune des deux parties.

La situation du site choisi (figure 8), entre une voie ferrée (Saint-Cloud à St Nom la Bretèche) et une autoroute (A 13) peut être un facteur intéressant de l'étude menée.

La mise en place des instruments sur le site de Garches vise à répondre aux interrogations suivantes :

- Le rôle des jardins urbains sur le cycle hydrique de la collectivité, et leur développement peut-il être un outil de maîtrise du cycle de l'eau en ville ?
- Les surfaces de ces jardins urbains sont-elles des filtres vis-à-vis des polluants urbains ou des zones privilégiées de transfert, voire de production de ces polluants ?

C'est pour aborder ces questions, que le fonctionnement hydrique d'une parcelle jardinée sera suivi sur une longue durée avec pour objectif de mieux comprendre les échanges hydriques et les flux de polluants associés (depuis l'eau d'arrosage jusqu'à la nappe en passant par la solution du sol).



Figure 7 : localisation du site et des parcelles pressenties

Les parcelles ont été équipées de matériels permettant de mesurer des variables (teneur en eau et succion) qui contrôlent les lois d'écoulements dans la zone non saturée (ZNS). Ces équipements ont été placés à différentes profondeurs.

Dans cette zone la teneur en eau peut varier d'une valeur faible (teneur en eau résiduelle) à une valeur maximale à saturation égale à la porosité efficace.

La succion représente la pression capillaire égale à la différence de pression entre les phases air et eau ; cette pression peut être très élevée et comme la phase air est généralement à la pression atmosphérique, ceci entraîne que la phase eau à une pression négative qui peut atteindre plusieurs bars.

Pour la mesure de la succion, des tensiomètres à capteur de pression type T8 (fournis par Sols Mesures) ont été installés à des profondeurs différentes allant de 30 à 90 cm.

Des sondes capacitatives type SM100, fournies par SDEC France, permettant la mesure de la teneur en eau à différentes profondeurs ont été installées sur la parcelle.

Pour le suivi du flux des polluants, des bougies poreuses ont été installées à différentes profondeurs pour le prélèvement des eaux interstitielles pour leurs analyses qualitatives.

Par ailleurs, les piézomètres qui devraient être installés pour suivre la charge hydraulique dans la nappe (zone saturée) et pour évaluer le gradient hydraulique de la nappe dans ce secteur n'ont pu l'être pour des raisons matérielles. Toutefois des sondages à la tarière manuelle ont

Mise en place d'un dispositif de suivi hydrique de jardins urbains

été effectués pour avoir une idée sur le niveau de la nappe. La présence sur le site du ru de Vaucresson laissait penser que la nappe était proche de la surface mais les sondages à la tarière jusqu'à 1m80 de profondeur n'ont pas indiqué la présence de la nappe. Ce qui fait donc de l'installation des piézomètres une obligation.

Le site a été également équipé d'un pluviomètre et d'un capteur de mesure de la température et de l'humidité de l'air relative pour disposer de données concernant les conditions de surface.

Des centrales d'acquisition ont été également installées sur le site pour la collecte en continu des données des différentes variables suivies.

L'installation du matériel de suivi s'est déroulée le 17 Avril 2014. L'équipement du site sera complété lors d'une autre campagne par l'installation de matériel pour le suivi du niveau d'eau dans le bac de récupération d'eaux pluviales, d'un compteur sur le robinet d'arrosage et de matériel pour la mesure des paramètres météorologiques et le suivi automatique du niveau piézométrique.

Un schéma conceptuel de l'ensemble des dispositifs installés est présenté à la figure 8. Quelques différences existent entre ce schéma conceptuel initial et la réalisation finale.

La figure 9 représente une photo du site finalisé.

Mise en place d'un dispositif de suivi hydrique de jardins urbains

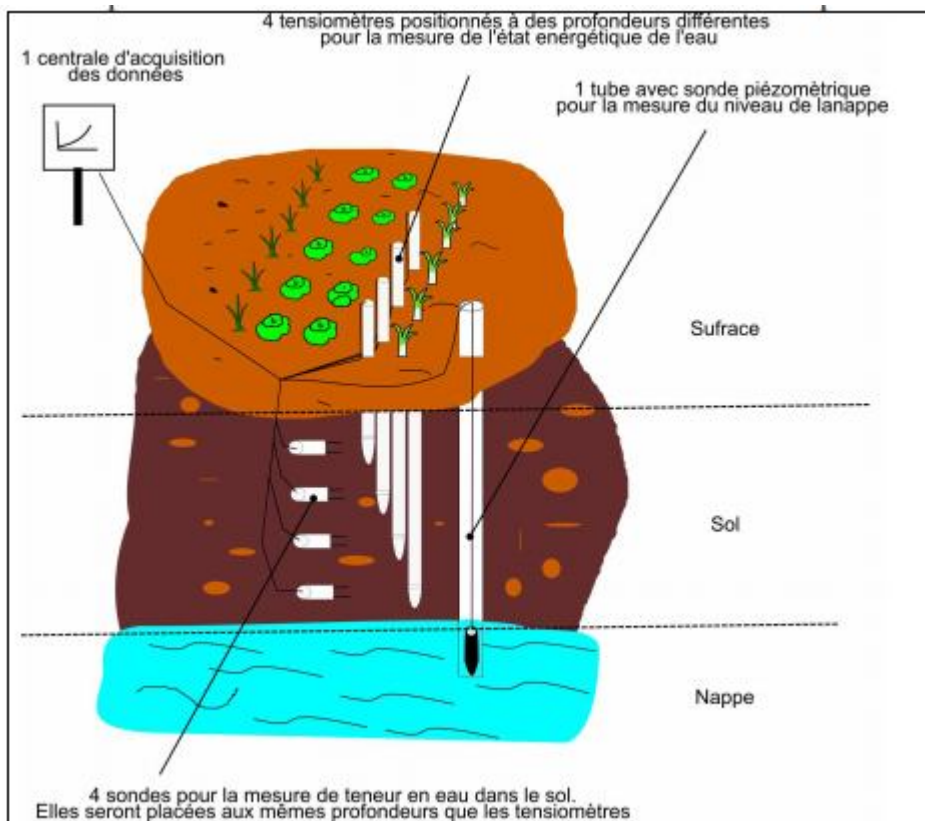


Figure 8 : Schéma conceptuel de l'installation pour la mesure des flux d'eaux et des polluants dans une parcelle de jardin



Figure 9 : Photo du site tensiomètre, bougies poreuses et humidimètre

4.2 Dispositif de suivi de la succion

4.2.1 Tensiomètres T8

Les tensiomètres utilisés sont du type T8 (figure 10) commercialisés par la société allemande UMS (www.ums-muc.de). Ce type de tensiomètre intègre un capteur de température permettant de mesurer la température de l'eau dans le sous sol en même temps que la pression. Il est aussi équipé d'un système de remplissage externe et d'un indicateur d'état de remplissage du tensiomètre. Le capteur de pression permet de mesurer des valeurs entre -1000 hPa et 800 hPa avec une incertitude de + ou – 5 hPa. Le capteur de température peut mesurer des valeurs entre -30 et 70.

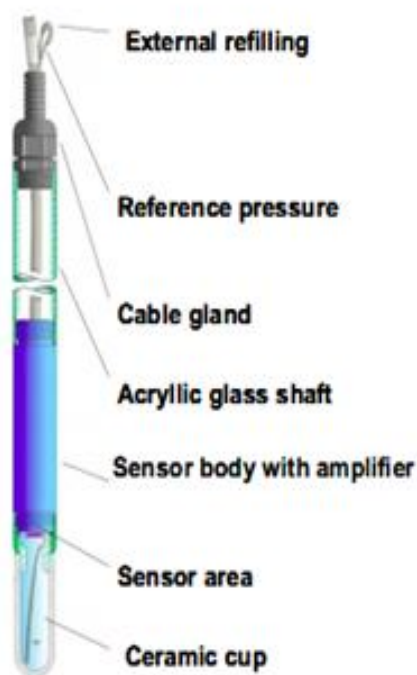


Figure 10: coupe schématique d'un tensiomètre T8 avec photo d'installation de ces tensiomètres

Trois tensiomètres ont été installés dans 3 petits forages séparés (figure 13) pour suivre l'évolution de la pression dans le sol. Ils ont été placés à des profondeurs de 0.3 m ; 0.5 m et 0.9 m par rapport à la surface du sol. Ces tensiomètres ont été branchés à une centrale

Mise en place d'un dispositif de suivi hydrique de jardins urbains

d'acquisition et la zone qui les entoure a été protégée pour éviter de perturber le sol autour de ces tensiomètres.

4.3 Dispositif de suivi in situ de la teneur en eau

4.3.1 Sondes WaterScout SM100

La parcelle a été équipée de sondes pour le suivi de la teneur en eau dans les deux premiers mètres de profondeur par rapport à la surface du sol. La mesure concerne l'évolution de la teneur en eau dans le sol. Le choix de ces profondeurs est motivée par le fait que les variations les plus importantes de ce paramètre se produisent en surface sur le premiers mètres de sol car plus on s'approche de la zone saturée plus la teneur en eau tant vers la porosité efficace.

Des sondes capacitives WaterScout SM100 (figure 11) munies de capteurs de mesures d'humidité ont été placées à 0.5 m ; 0.9 m et 1.5.



Figure 11: Sonde WaterScout et la photo de sa mise en place

4.4 Dispositif de suivi du flux de polluants

4.4.1 Les bougies poreuses

Mise en place d'un dispositif de suivi hydrique de jardins urbains

Pour ne pas pénaliser les interventions culturales et ne pas modifier les profils pédologiques nous avons choisi d'utiliser des bougies poreuses placées verticalement pour recueillir la solution du sol.

Le principe de la bougie poreuse consiste à faire passer à l'aide d'une dépression, la solution du sol à l'intérieur d'une bougie en PTFE/QUARTZ munie d'une tête en céramique poreuse (figure 12).

Les prélèvements d'eau seront réalisés toutes les trois semaines.

Trois bougies poreuses ont été installées (fournisseur SDEC-France). Chaque bougie est constituée d'une céramique. Afin de prélever des quantités d'eau suffisante, nous avons choisi des céramiques de 21 mm de diamètre. Trois profondeurs (30, 50 et 90 cm) d'installation ont été retenues.

Des forages à la tarière de diamètre légèrement supérieur à celui des bougies ont été faits pour placer les bougies au contact du sol à la profondeur voulue. Pour assurer le contact entre le sol et la bougie, une boue de silice a été préparée puis versée dans le trou.



Figure 12: préleveurs PTFE/quartz et la photo de leur mise en place

4.5 Autres équipements

4.5.1 Station météorologique

Afin de pouvoir calculer les flux d'entrée/sortie à la surface du site, liés à la climatologie, une mini station météo a été installée : elle comporte un pluviomètre pour mesurer les précipitations ainsi qu'un capteur de mesure de la température de l'air.

La photo de la figure 13 ci-dessous illustre l'implantation du pluviomètre, à proximité de la parcelle.



Figure 13: le pluviomètre sur le site de Garches

Le fonctionnement de ce pluviomètre est relativement simple : l'eau recueillie sur la surface du pluviomètre remplit un récipient de mesure (auget) qui, lorsqu'il est plein bascule sous son propre poids. Une carte d'acquisition compte alors le nombre de basculement, qui correspond chacun à un volume d'eau donné.

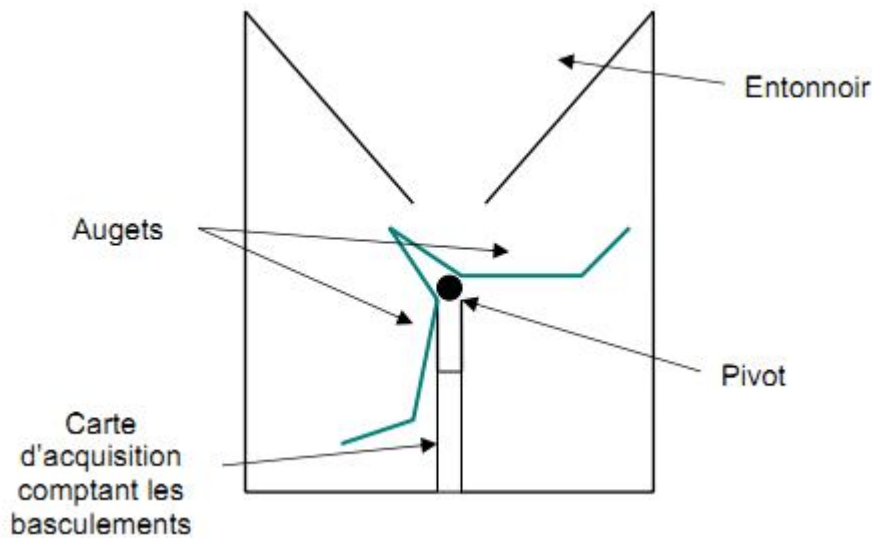


Figure 14: Schéma de principe du pluviomètre installé à Garches

4.5.2 Centrale d'acquisition des données

L'ensemble des capteurs installés sont reliés à une centrale d'acquisition type CR800 couplé avec un multiplexeur et CR3000 installée à quelques mètres de la parcelle.

4.5.3 Tableau récapitulatif des matériels installés

Comme il est dit plus haut, l'ensemble des capteurs a été mis en place progressivement à partir 28 Avril 2014. Le tableau 3 résume l'ensemble du matériel, les pas de temps d'acquisition et la date de début des mesures.

Tableau 3 : Liste des capteurs du site de Garches

Type de capteur, modèle (marque, pays)	Paramètre mesuré	Pas de temps d'acquisition	Position par rapport à la surface	Date de début d'acquisition
Pluviomètre (précis-mécanique, France)	Précipitation (Basculement et Cumul de basculement)	A chaque basculement	1,00 m au dessus de la végétation	22/04/2014
Sonde capacitive SM100_Nou (SDEC France)	Teneur en eau volumique du sol	1 minute	-30 cm, -50 cm, -90 cm, -150 cm	22/04/2014
Sonde capacitive SM100_Lucas (SDEC France)	Teneur en eau volumique du sol	1 minute	-30 cm, -50 cm, -90 cm, -150 cm	09/07/2014
Tensiomètre T8_Nou (UMS)	Précision matricielle	1 minute	-30 cm, -50 cm, -90 cm,	22/04/2014

Mise en place d'un dispositif de suivi hydrique de jardins urbains

Allemagne)				
Tensiomètre T8_Lucas (UMS Allemagne	Précision matricielle	1 minute	-30 cm, -50 cm, - 90 cm,	09/07/2014
PTFE/Quartz (SDEC France)	Prélèvement d'eau interstitielle	15 jours ou 40 mm de précipitation	-30 cm, -50 cm, - 90 cm,	28/04/2014
PTFE/Quartz (SDEC France)	Prélèvement d'eau interstitielle	15 jours ou 40 mm de précipitation	30 cm, -50 cm, - 90 cm	09/07/2014
Station météo (DataHog2 UK)	Vitesse du vent, humidité relative, température, UVA.	1 minute	2 m au dessus de la végétation	28/04/2014
Sonde piézo Diver et Baro (SDEC France)	Niveau d'eau et précision atmosphérique	2 minutes	Au fond du bac de récupération d'eau	13/06/2014

4.6 Etalonnage des sondes WaterScout SM100

Les sondes WaterScout SM100 de mesure de la teneur en eau implantées sur la parcelle ne sont pas, à l'installation, calibrées pour tout type de sol et ne fournissent donc que des évolutions en valeurs relatives.

Afin de convertir le signal brut issu des capteurs en teneur en eau, il est nécessaire de recourir à un étalonnage adapté.

Il a été donc nécessaire de mettre en œuvre une procédure de calibration en laboratoire sur un échantillon de sol prélevé sur la parcelle en déterminant son humidité pondérale. Le volume initial de l'échantillon tient compte de la densité apparente. L'échantillon est séché puis humecté par un volume d'eau- et donc une masse d'eau parfaitement connue ce qui permet de déterminer l'humidité pondérale de l'eau. Connaissant le volume de l'échantillon prélevé et la masse de l'eau la teneur en eau volumique est estimée. Une mesure à la sonde SM100 est effectuée à cette première teneur en eau et la valeur analogique de la sonde est enregistrée. Un deuxième apport d'eau est effectué en vue d'obtenir une deuxième teneur en eau. Après mélange du sol de manière à assurer l'humectation et l'homogénéisation une nouvelle mesure SM100 est faite et ainsi de suite pour différentes valeurs de teneur en eau. Il est alors possible de déterminer une relation entre les valeurs de sortie des capteurs et les teneurs en eau.

Mise en place d'un dispositif de suivi hydrique de jardins urbains

Des échantillons de sol à différentes profondeurs correspondant aux profondeurs des capteurs ont été prélevés sur les parcelles à instrumenter. Un carottier a été utilisé pour le prélèvement afin d'obtenir un échantillon non perturbé donc stratigraphiquement représentatif pour un bon étalonnage des sondes SM100.

Ces échantillons ont été homogénéisés et le sol moyen obtenu est utilisé pendant toute la procédure d'étalonnage. La méthode par pesée décrite plus haut a été utilisée pour déterminer la densité sèche de l'échantillon dont les résultats sont dans le tableau 4. La densité sèche moyenne obtenue est proche de 1.

Tableau 4 : calcul de la densité sèche du sol de la parcelle instrumentée

	Echantillon 1 parcelle P.Nourrisson	Echantillon 2 parcelle P.Nourrisson	Echantillon3 parcelle P.Nourrisson
Masse de la tare (g)	285,3	290,9	313,3
Masse humide (g)	1093,5	900,8	1157
Volume de l'échantillon (cm3)	618		
Masse sèche (g)	949,5	786,9	1003,2
Masse volumique humide (g/cm3)	1,3	0,986893204	1,365210356
Masse volumique sèche (g/cm3)	1,074757282	0,802588997	1,116343042
Masse volumique sèche moyenne (g/cm3)	0,99789644		

Lors de la procédure d'étalonnage la densité sèche est ramenée à chaque fois à 1 avant un apport d'eau supplémentaire et une nouvelle lecture de la valeur brute de la sonde. A sec, on obtient une lecture brute de 0,3 et quand le sol est complètement saturé la valeur analogique lue est de 0,477

Après la saturation du sol que la stabilisation de lecture de la valeur en intensité de la sonde, la procédure est arrêtée. Une relation entre les valeurs de sortie des capteurs et les teneurs en eau est établie. L'équation polynomiale de la courbe de tendance (figure 15) a été utilisée dans un programme pour convertir les valeurs de sorties analogiques des SM100 en VWC (Volumetric Water Content).

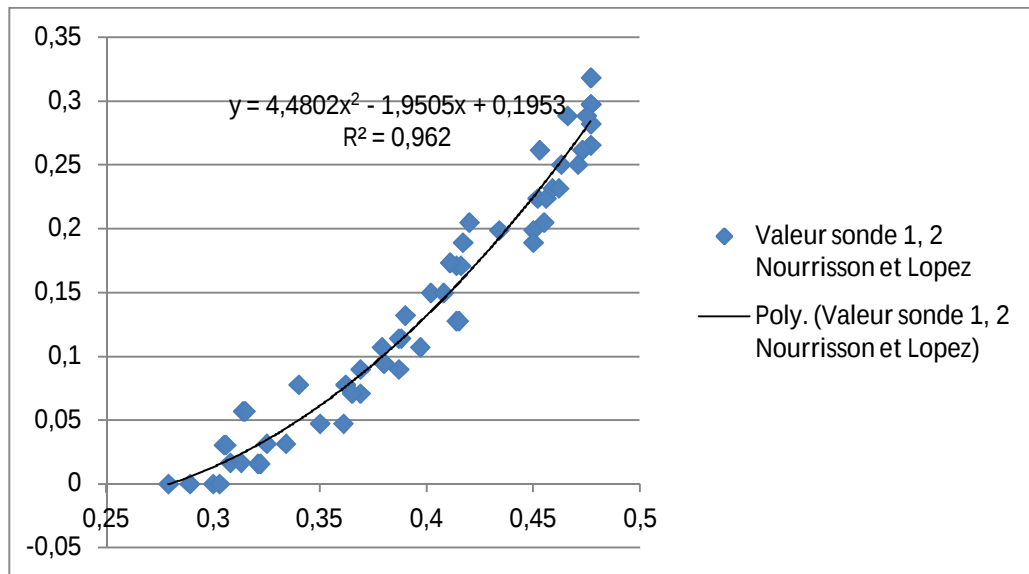


Figure 15: courbe de calibration du sol

3ème Partie : Résultats

V. Interprétation des premiers résultats

Les capteurs ont été installés le 17 Avril 2014 et sont opérationnels depuis le 22/04/2014. La centrale d'acquisition enregistre chaque minute les mesures d'intensités fournies par les sondes SM100 et les tensiomètres. Le pluviomètre est installé le 22/04/2014 et enregistre les cumuls de basculement. Les données analysées vont donc du 22/04/2014 au 17/07/2014.

Les données de suivi des différentes variables sont récupérées tous les 15 jours environ et analysées dans les jours qui suivent pour s'assurer du bon fonctionnement des capteurs et détecter d'éventuels problèmes qui peuvent survenir d'une défaillance ou dysfonctionnement de capteur ou de batterie, les données obtenues de la centrale d'acquisition CR800 ont été prétraitées pour une meilleure analyse. Ainsi les pas de temps ont été ramenés à trois minutes, au lieu d'une minute à l'enregistrement.

Des lacunes des données existent sur quelques périodes en raison des pannes de batteries.

Les graphiques présentés comportent en abscisses le temps et en ordonnées d'une part les teneurs en eau mesurées par la SM100 et les tensiomètres T8 et d'autre part la pluviométrie journalière cumulée mesurée sur le site. Ces graphiques illustrent les types de résultats que l'on peut obtenir à partir de l'instrumentation mise en place.

Mise en place d'un dispositif de suivi hydrique de jardins urbains

Dans les paragraphes qui suivent, les observations des premières évolutions de la teneur en eau et de la succion seront analysées et la courbe de rétention hydrique sera tracée.

Les interprétations qui seront faites sont préliminaires et ne prétendent pas être des conclusions définitives étant donné que la période de mesure n'est que deux mois.

5.1 Evolution de la succion dans la zone non saturée

La figure 16 ci-dessous représente les évolutions de la succion à différentes profondeurs, en parallèle avec la pluie journalière depuis le début de la mise en place des instruments (Mai 2014) jusqu'à juillet 2014.

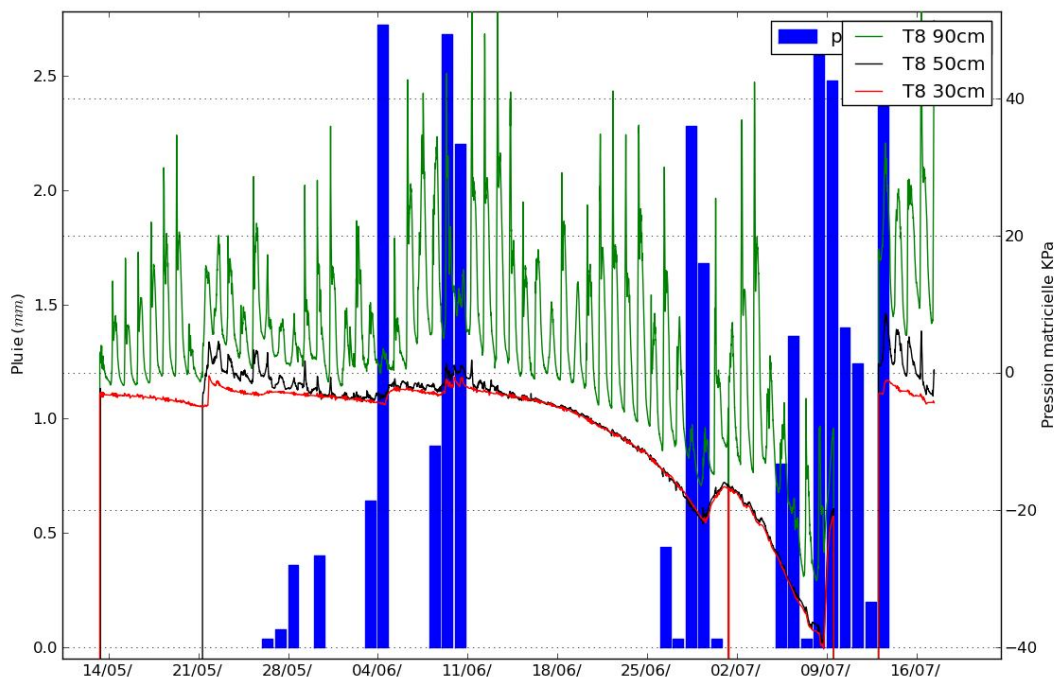


Figure 16: Evolution de la pluie et de la succion

Il faut noter qu'au début de la série, les données de pluie manquent car le pluviomètre n'a été installé que le 13 Mai 2014 et que les données entre cette date et le 26 Mai ont été perdues à cause d'une mauvaise manipulation. Comme précisé plus haut les lacunes visibles sur la courbe correspondent aux périodes d'interruption de l'enregistrement.

Mise en place d'un dispositif de suivi hydrique de jardins urbains

Sur la figure 17 ci-dessous qui est la même que la figure 16 à une échelle dilatée : on y aperçoit une évolution assez similaire des tensiomètres (profils rouge et noir et vert) dû à la relative homogénéité du sol, avec des fluctuations plus ou moins importantes liées aux variations des conditions en surface. On observe la réponse aux différentes phases de recharges d'abord sur les tensiomètres proches de la surface ensuite une propagation vers les tensiomètres plus profonds. On remarque une amplitude de fluctuation allant de -400 hPa à des valeurs à saturation avec une période de désaturation maximale le 09 juillet 2014, ce qui correspond aux cycles de stockage/déstockage de l'eau dans la zone non saturée.

On rappelle qu'un cm équivaut à 1hPa et que le tensiomètre mesure la hauteur d'eau au dessus de la céramique poreuse quand le sol est saturé. La figure 16 indique que le tensiomètre mesure une valeur de 400 hPa pour la sonde à 90 cm soit une hauteur d'eau de 4m au dessus de la sonde ce qui à notre sens est impossible. On peut expliquer cela par le fait que la limite de la gamme de mesure est atteinte (on est donc très en deçà de la limite indiquée par le constructeur). Un autre fait particulier et assez troublant est la fluctuation cyclique de période journalière des données du tensiomètre à 90 cm qui peut confirmer l'hypothèse précédente. Une autre hypothèse peut être avancée pour justifier ces fluctuations : une infiltration directe dans l'espace annulaire susceptible de se former en périphérie du tensiomètre du fait d'un mauvais rebouchage du forage ou en raison du retrait du sol à cause de la dessiccation. Des analyses plus approfondies s'avère nécessaire pour la compréhension de ce phénomène de sursaturation. En attendant, dans la suite des interprétations, il sera tenu compte du lobe inférieur de la courbe qui donne des niveaux de saturation acceptables.

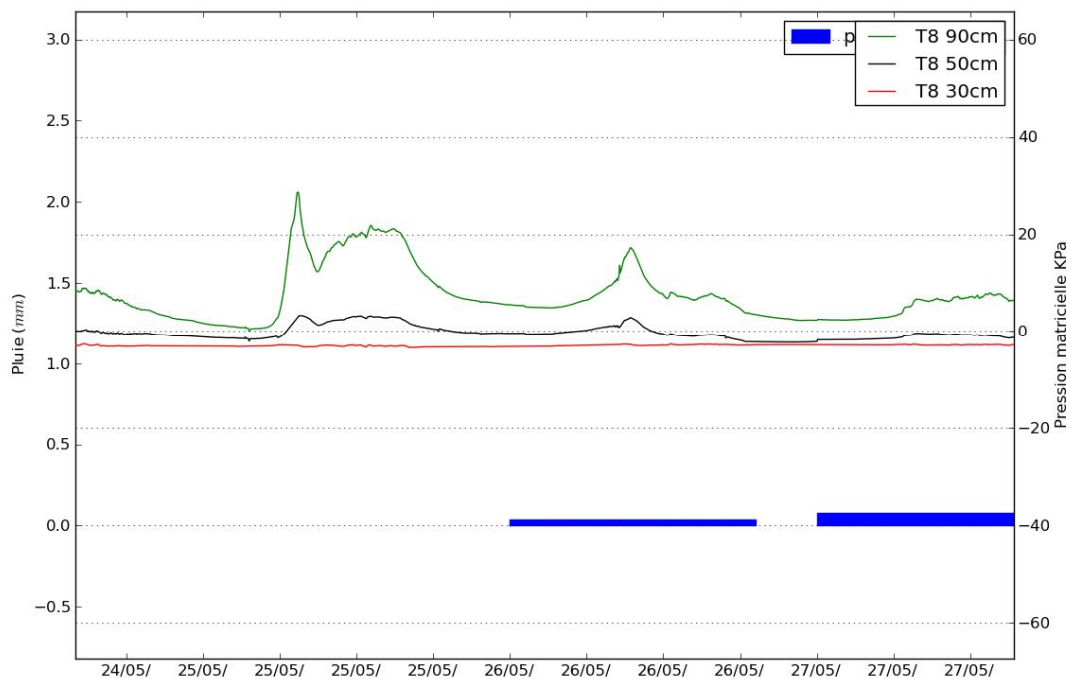


Figure 17: Evolution des profils de succion

5.2 Evolution de la teneur en eau dans le zone non saturée

La teneur en eau volumique est mesurée dans le sol à l'aide des capteurs SM100 et les valeurs absolues sont obtenues à partir de l'équation d'étalonnage dérivée de la procédure décrite au 5.6.

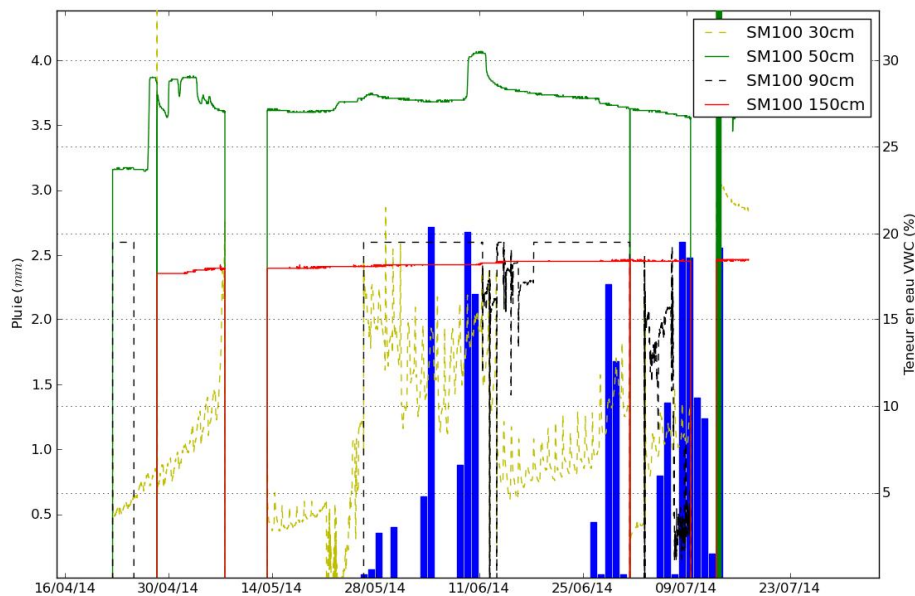


Figure 18 : Evolution de la teneur en eau

Sur la figure ci-haut, on constate que la teneur en eau à 50 cm de profondeur varie entre 25 et un peu plus de 30 % et celle à 150 m varie entre 18 et 20% alors que les sondes situées à 30 et 90 cm semblent donner des aberrations en terme de mesure. Ce qui suppose qu'elles sont endommagées lors de leur mise en place

Les variations de teneur en eau sont plus importantes au voisinage de la surface (50 cm de profondeur) qu'à 150 cm. Ce qui est due à l'influence des conditions de surface variables (recharges).

Ce graphique indique que l'épisode pluvieux du 27 au 29 Mai 2014 ne donne pas lieu à un pic très marqué mais une légère évolution de la teneur en eau (à cause du faible cumul de précipitation) alors que celui du 08 au 11 Juin 2014 se traduit par un pic d'humidité dans le sol à 50 cm de profondeur et que les périodes sèches qui suivent se traduisent par une décroissance plus ou moins régulière. Ce qui amène à penser au passage de fronts d'humidité consécutifs aux précipitations.

Ces fronts se caractérisent par des écoulements qui réhumidifient les couches traversées dans leur progression vers les couches plus profondes. Cette progression n'est pas visible sur la courbe de la teneur en eau à 150 cm de profondeur qui suit une croissance légère mais plutôt régulière. Une hypothèse peut être avancée : (en attendant de la confirmer par des analyses

approfondies notamment sur l'évolution de la courbe de teneur en eau à 90 cm de profondeur) l'écoulement vers les couches à 150 cm a rencontré un sol particulièrement sec et qu'il a essentiellement réhumidifié ce qui a stoppé la propagation des fronts d'humidification en profondeur. On peut toute fois penser que des précipitations futures pourront faire augmenter significativement la teneur en eau à cette profondeur au même titre que celle des couches supérieures.

5.3 Paramétrisation de la courbe de rétention hydrique expérimentale- modèle de Van Genuchten (1980)

La courbe de rétention d'eau d'un sol ou la courbe caractéristique, est la relation entre la succion et une mesure de la teneur en eau contenue dans le sol. Elle définit la capacité du sol à emmagasiner et à libérer l'eau. Cette relation est une caractéristique spécifique pour un sol donné. Plusieurs travaux ont montré que la courbe caractéristique est en rapport direct avec le changement de volume, la résistance au cisaillement, et le processus d'écoulement des fluides à travers les sols non saturés et fournit, en conséquence, l'information clé pour étudier ces propriétés (Lamara & Derriche, 2009)

A partir des données expérimentales obtenues, la courbe de rétention hydrique (teneur en eau en fonction de la succion) est tracée. Ces résultats expérimentaux sont représentés par un ensemble des points éparpillés. Le modèle mathématique de Van Genuchten (1980), d'expression ci-dessous, a été utilisé pour paramétrer la courbe de rétention hydrique.

$$\theta(h) = \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (-\alpha h)^n]^m} + \theta_r.$$

Où $\theta(-)$ est la teneur en eau volumique, θ_s et θ_r sont respectivement les teneurs en eau volumique résiduelle et à saturation ($L^3 L^{-3}$) ; α (L^{-1}), n (-) sont les paramètres de formes du modèle et m est relié à n par la condition de Mualem = $1 - \frac{1}{n}$.

Plusieurs jeux de calage ont été faits sur des paramètres de la courbe du modèle sur la courbe expérimentale (figure 20). Le premier test a été fait à partir d'un sol homogène de type argilo-limoneux (figure 19) de paramètres issus de la base de données ROSETTI de Hydrus 1D.

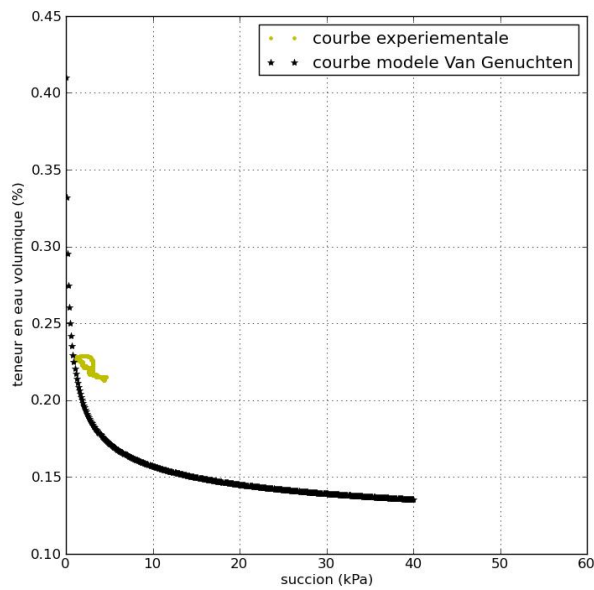


Figure 19: courbes de rétention d'eau du sol à 30 cm paramètre hydrus 1D

Dans la figure 20 sont représentées la courbe de rétention expérimentale et la courbe issue de jeu de paramètres calés. Nous avons pris une valeur de teneur en eau à saturation à 0,41 et une valeur de teneur en eau résiduelle à 0,095 (tableau 6). La courbe simulée semble assez représentative de la courbe expérimentale pour les paramètres :

Tableau 5: jeux de paramètres du modele de van Genuchten (1980)

	θ_r	θ_s	n	α
Paramètres Hydrus 1D (Argilo-limoneux)	0,095	0,41	1,31	0,019
Paramètres de calage	0,095	0,41	1,27	1,05

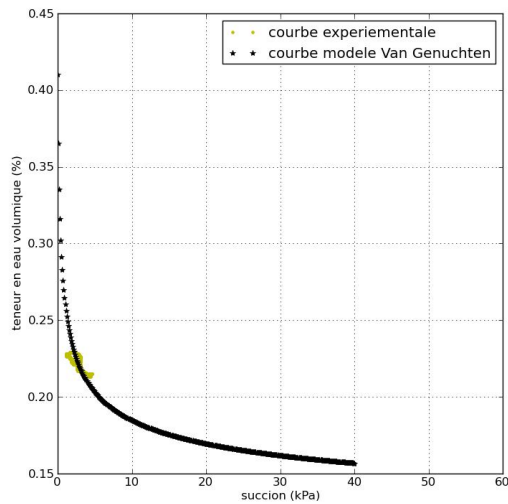


Figure 20 : courbes de rétention d'eau du sol à 30 cm paramètres calés

Un autre jeu de paramètre a été fait pour les données à 50 cm, cette fois encore à partir des paramètres prédéfinis dans le logiciel Hydrus 1D. Les paramètres du sol de type argileux dans Hydrus 1D après ajustement du paramètre de forme α (tableau 7) représente assez bien la courbe expérimentale (figure 21).

Tableau 6 : jeux de paramètres du modele de van Genuchten (1980)

		θ_r	θ_s	n	α
Paramètres	Hydrus	0,068	0,38	1,09	0,008
	1D (argileux)				
Paramètres de calage		0,068	0,38	1,09	0,8

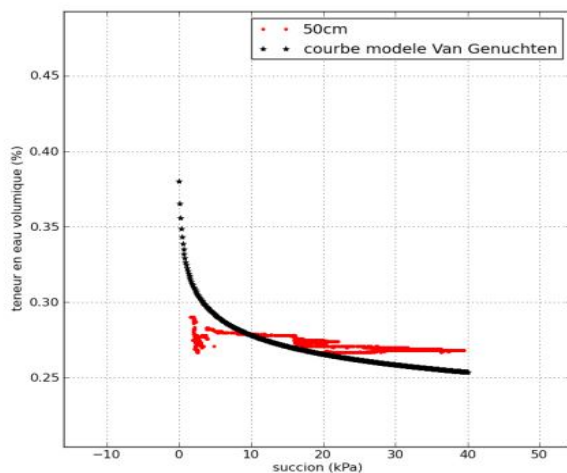


Figure 21 : courbes de rétention d'eau du sol à 50 cm paramètres calés

Conclusions et perspectives

De tout ce qui précède, il ressort qu'il n'existe pas de méthode unique de mise en œuvre facile à l'échelle de la parcelle ou du bassin qui puisse permettre des mesures précises et fiables en continu de teneur en eau et de la succion. Toutes les méthodes se complètent et présentent des avantages et des inconvénients, le choix de l'une ou l'autre de méthodes est influencé par la nature, la structure, la texture du sol à instrumenter et aussi par les moyens, la durée de l'étude...

La synthèse bibliographique réalisée dans le cadre de cette étude a permis de valider le choix des instruments fait par le Cerema. Ce choix présente une solution technique adaptée aux conditions expérimentales envisagées.

Ce rapport décrit en détail l'instrumentation mise en place sur le site de Garches pour le suivi en continu des paramètres qui contrôlent les lois de l'écoulement dans les zones non saturée ou variablement saturée et présente les premiers résultats et les interprétations qui en sont faites. Ces travaux ont permis de progresser dans l'atteinte des objectifs du projet qui sont la compréhension du comportement des écoulements dans la zone variablement saturée et la mise en place d'un système de suivi en continu des paramètres hydrodynamiques.

Les premières mesures ont montré une étroite corrélation entre l'évolution de la courbe de teneur en eau et de la succion avec la répartition temporelle des précipitations enregistrées sur le site, ce qui augure bien de la qualité des observations.

Les données expérimentales ont permis la paramétrisation de la courbe de rétention d'eau du modèle de Van Genuchten mais il reste donc à ce stade, à confirmer ces paramètres en les calant sur la courbe de conductivité hydraulique- qui est un autre paramètre hydrodynamique très important- du modèle de Mualem-Van Genuchten.

A terme, les données recueillies permettront de caler un modèle numérique qui permette d'évaluer les évolutions des teneurs en eau et des saturations en fonction des conditions météorologiques. Cette première partie du projet a atteint ses objectifs même si elle ne répond pas à toutes les questions posées au départ. Elle devra maintenant être suivie d'autres phases permettant la poursuite des acquisitions des données pendant au moins un cycle hydrologique complet (3 ans au moins) et surtout de développer un système numérique qui permettra de modéliser l'écoulement dans la zone variablement saturée.

Bibliographie

Amraoui, N., Noyer, M. L., Wuilleurmier, A., Chrétien, P., Feret, M. J., Bertrand, L., et al. (2008). *Projet INTERREG III A FLOOD1: Role des eaux souterraines dans le déclenchement des crues.*

Instrumentation et suivi du site expérimental de la somme, caractérisation hydrodynamique de la craie. BRGM/RP-56632-FR, 121 p., 28 fig., 2 tabl., 5 ann. Orléans: BRGM.

Bakkari, A. (2007). *Observation et modélisation d'ouvrages en terre soumis à des processus de séchage et d'humidification.* Thèse de doctorat, Ecole Nationale des ponts et chaussées, Champs sur Marne.

Baran, N. (2005). *Suivi de la teneur en eau des sols dans les bassins du Gardon d'Anduze et du Touch.* Orléans: BRGM/RP-53654.

Bouarfa, S., Arlot, M., LINARD, N., & Zimmer, D. (1993). Etude hydraulique du prélèvement de la solution du sol par bougie poreuse. 31 (1/2).

Brunet, P., Bouvier, C., Perrin, J. P., & Robain, H. (2003). *Suivi annuel de l'humidité du sol à l'aide de sondages Schulumberger. Actes du 4ème colloque Géophysiques des Sols et des Formations Superficielles.* Univ P. et M. Curie. Paris: Univ P. et M. Curie.

Casanova, J., Bechu, J., Bouzit, M., Le Roy, P. H., Maton, L., & Pettenati, M. (2008). *Appui au projet de REcharge artificielle et Gestion Active des nappes Littorales (REGAL). Rapport intermédiaire BRGM/RP-56836-FR, Décembre 2008, 63 pages, 20 illustration.* Orléans: BRGM.

Chanzy, A., Gaudu, J.-C., & Chadoeuf, J. (1997). Estimation de la teneur en eau du sol par la méthode capacitive à l'échelle parcellaire. Milieux poreux et transferts hydriques. . (39-40), 21-26.

Delage, P., & CUI Y, J. (2000). *L'eau dans les sols non saturés.* Paris: Editions techniques de l'ingénieur.

Goulet, E., Rioux, D., Cesbron, S., Bottois, N., & Barbeau, G. (2003). Spatialisation de l'activité racinaire de la vigne par résistivité électrique. Premières observations. . *Actes du 4ème colloque Géophysiques des Sols et des Formation Superficielles* (pp. 22-26). Paris: Univ P. et M. Curie.

Institut National des Recherches Agronomiques. (2006, Mai 2). *Dispositifs expérimentaux.* Consulté le avril 23, 2014, sur Programme Agriculture-Environnement Vitell (AGREV): www7.inra.fr/vitell/dispositif/bougies.htm

Lamara, M., & Derriche, Z. (2009). *Prédiction de la courbe de rétention d'eau du sol à l'aide des fonctions de pedotransfert (PTFs).* Tlemecen: Colloque International Sols Non Saturés et Environnement .

Masekanya, J.-P. (2008). *Stabilité des pentes et saturation partielle, Etude expérimentale et modélisation numérique.* Liège: Université de Liège, faculté des sciences appliquées.

Michot, D., Dorigny, A., Benderitter, Y., & King, D. (2002). Le panneau électrique 2D: un outil de suivi spatial et temporel de l'humidité d'une section de sol. Un exemple sous culture de maïs irrigué. *Septièmes Journées Nationale de l'Etude des Sols*, (pp. 99-100). Orléans.

Mise en place d'un dispositif de suivi hydrique de jardins urbains

Pereira dos Santos, L. A. (1997). *développement d'une nouvelle méthode de détermination des profils de teneur en eau dans les sols par inversion d'un signal TDR*. Grenoble: Université Joseph Fourier.

Robinson, M., Cognard-Plancq, A. L., Consandey, C., David, J., Durand, P., Fuhrer, H.-W., et al. (2003). *Studies of the impact of forests on peak flows and baseflows: a European perspective* (Vol. 186). Europe: Forest Ecology and Management.

Topp, G. C., Davis, J. L., & Annan, A. P. (2003). *The early development of TDR for soil measurements*. 2, 492-499: Vadoze Zone Journal.

Van Genuchten, M. (1980). *A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Am: Soil Sci Soc .

Vincent, M., Bouchut, J., Le Roy, S., & Surdyk, N. (2006). *Suivi de l'évolution en profondeur de la dessiccation des sols argileux en période de déficit hydrique. Rapport final de phase 1. Rapport BRGM/RP-54567-FR, 189 p., 127 ill.* Orléans: BRGM.

Annexes

Annexe 1 : Relevé des données d'une centrale Campbell

Matériel nécessaire :

1 PC avec loggernet

1 câble de liaison Campbell

1. Connection à la centrale

Les données sont sauvegardées via le PC et le logiciel LoggerNet

- Relier le PC à la station
- Lancer **LoggerNet**
- Cliquer sur l'onglet **CONNECT**
- Dans la fenêtre **CONNECT SCREEN**, choisir la station (CR800_JASSUR) puis **CONNECT**
- Vérifier la synchronisation entre l'heure de la centrale et l'heure du PC

2. Vérifier la cohérence des données

Dans le menu déroulant de la fenêtre **table Monitor Passive Monitoring**, choisir **Nourisson** et vérifier les valeurs. Les valeurs des SM100, **SM100_mV**, doivent être comprises entre 200 et 500 mv et celles des tensiomètres, **Tensio_mV**, entre -2000 et 2000 mV.

3. Sauvegarde des données

- Cliquer sur **CUSTOM**
 1. Dans **Collect mode** choisir **All the Data**
 2. Dans **Fill Mode** : **create new file**
 3. Dans **File Format Array** : **Compatible CSV**
- Dans **Table collection** cocher **Nourisson**
- Choisir le répertoire de sauvegarde à partir de **CHANGE FILE NAME**
- Puis cliquer sur **Start Collection**

Vérifier que toutes les données sont bien sur le PC, se déconnecter de la centrale avec **DECONNECT**, puis débrancher le câble.

Annexe 2 : Relevé des données d'une centrale Hobo

1. Matériel nécessaire

- 1 PC avec port série
- 1 base USB hobo.

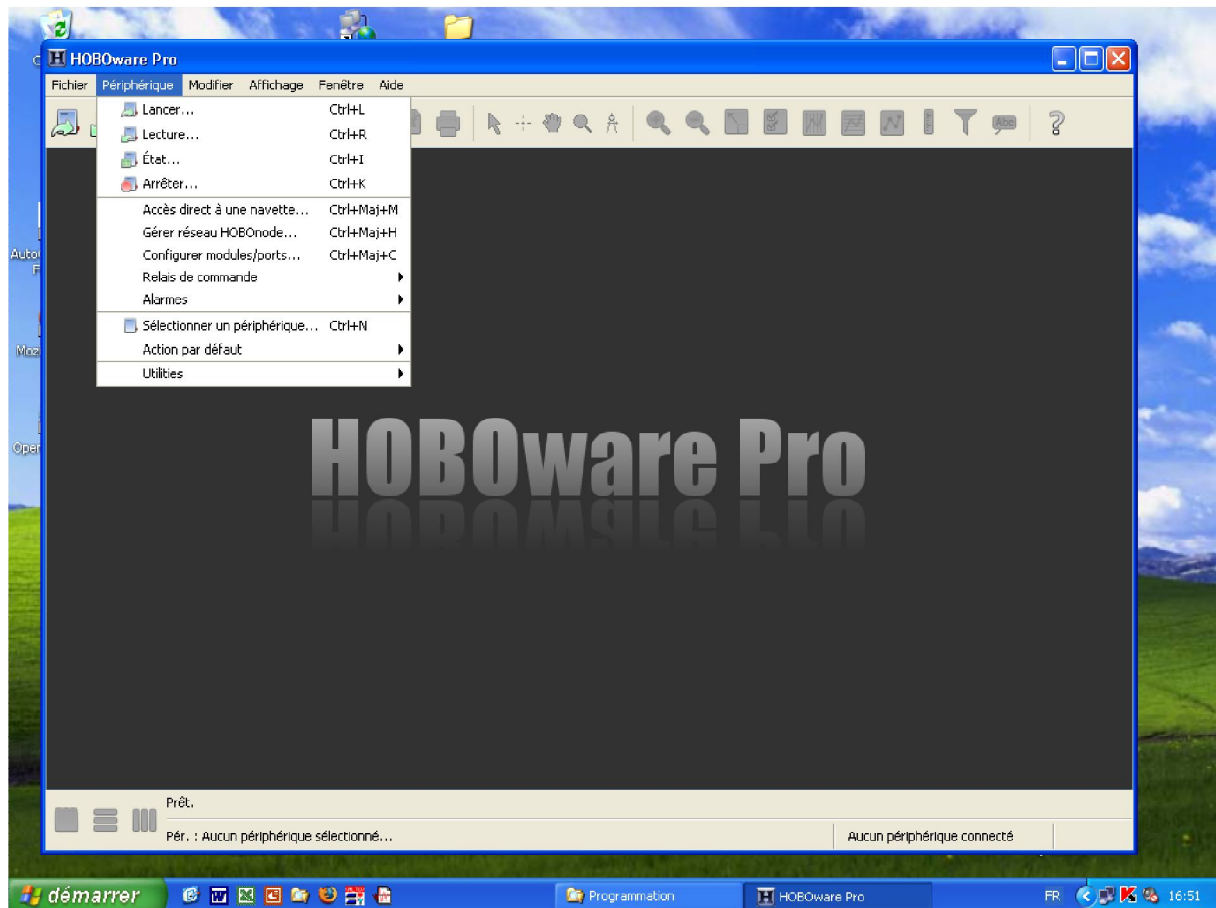
La base USB est la partie qui est reliée à l'ordinateur et qui reçoit l'enregistreur. L'enregistreur est la partie qui est reliée à l'auget.

Le N° série du Hobo du pluvio de Garches est XXXXXX

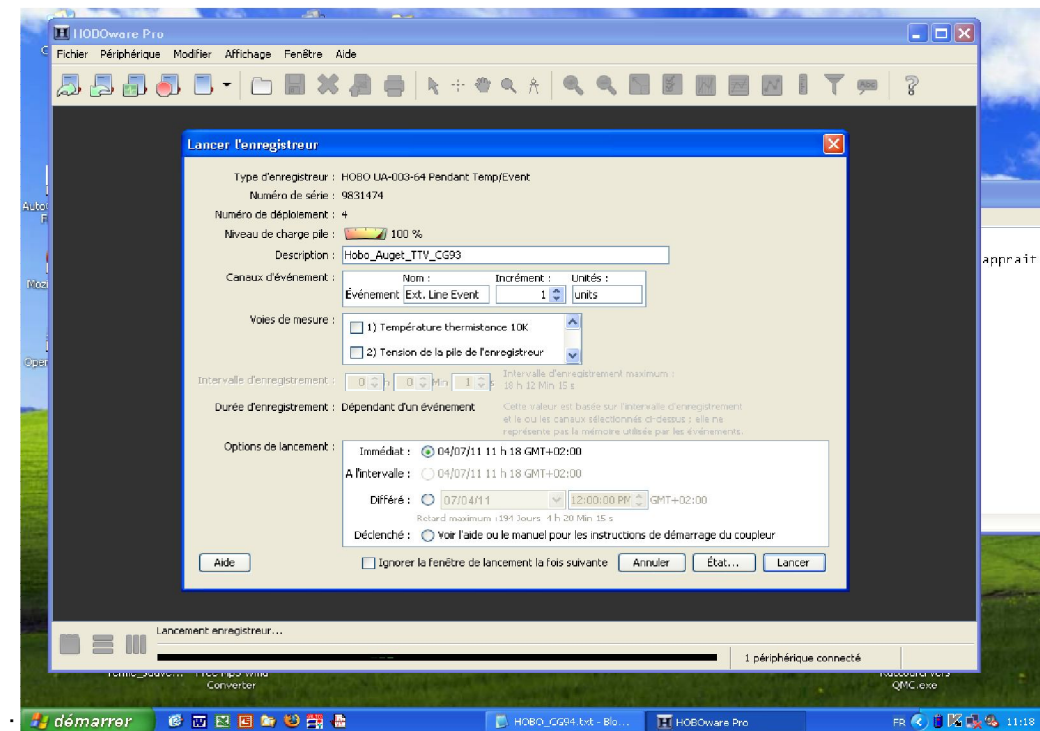
2. Lancement

- Brancher la base USB sur port USB :
- Dans la barre des taches du bas apparaît le message suivant : **Peri : HOB0 UA-003-64 Pendant Temp/Event, n° série : XXXXXX ;**
- Cliquer sur **Périphérique** (en haut dans la barre de menu) puis **Lancer**.

Mise en place d'un dispositif de suivi hydrique de jardins urbains



La boîte de dialogue **Lancer l'enregistreur** apparaît :



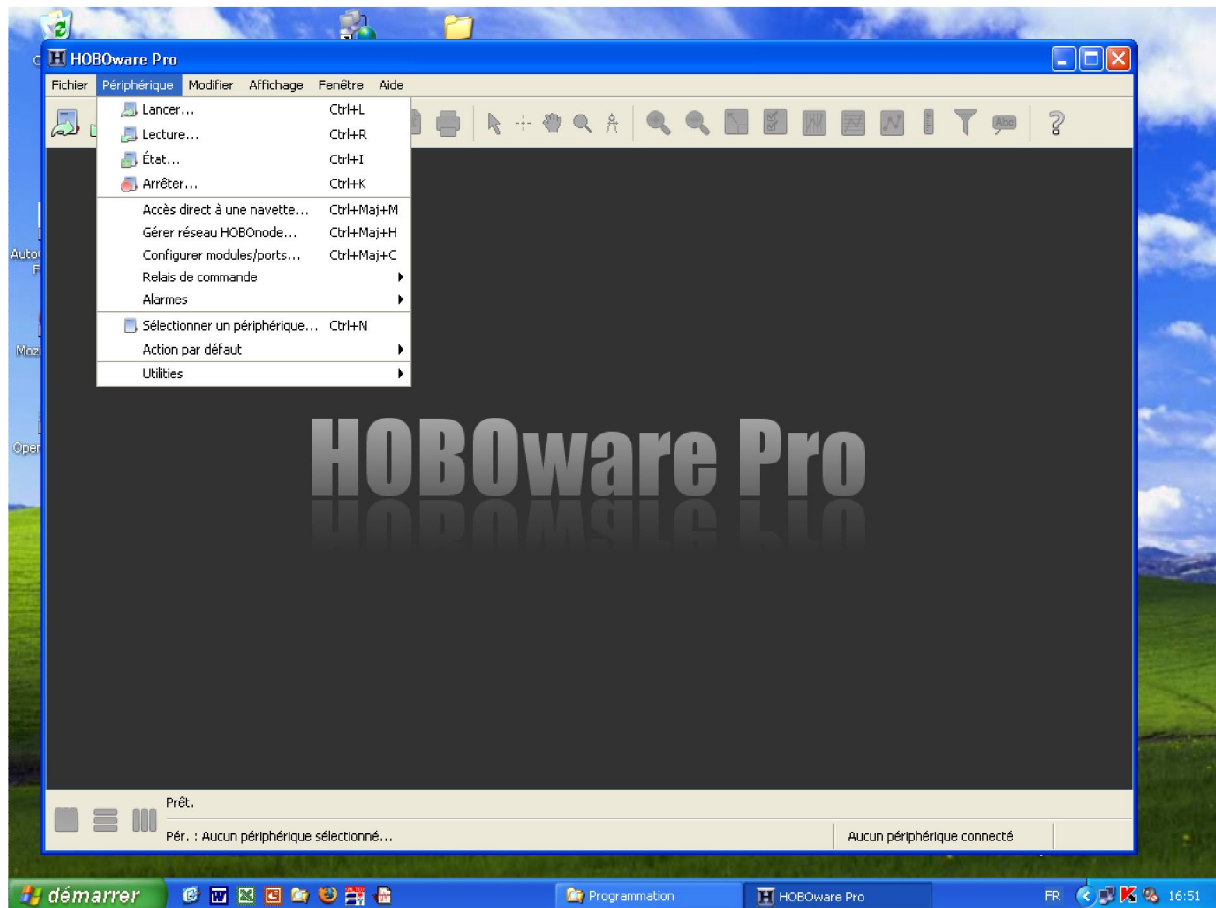
Mise en place d'un dispositif de suivi hydrique de jardins urbains

- Vérifier le N° de série
- Description : Hobo_Auget_TTV_XXX (XXX : est le lieu d'installation et n° auget si nécessaire)
- Vérifier Evénement
Nom : basculement
Incrément 1
Unités : units
- Voie de mesure :
Cocher 1) Température
Intervalle d'enregistrement (uniquement si température cochée) :1h
Option de lancement : Immédiat, vérifier que l'heure est GMT (UTC) (synchroniser l'heure du pc si besoin)
- Cliquer sur ***lancer***
Retirer l' enregistreur de la base
- Vérifier que la led clignote toute les 4s environ

3. Lecture de l'enregistreur

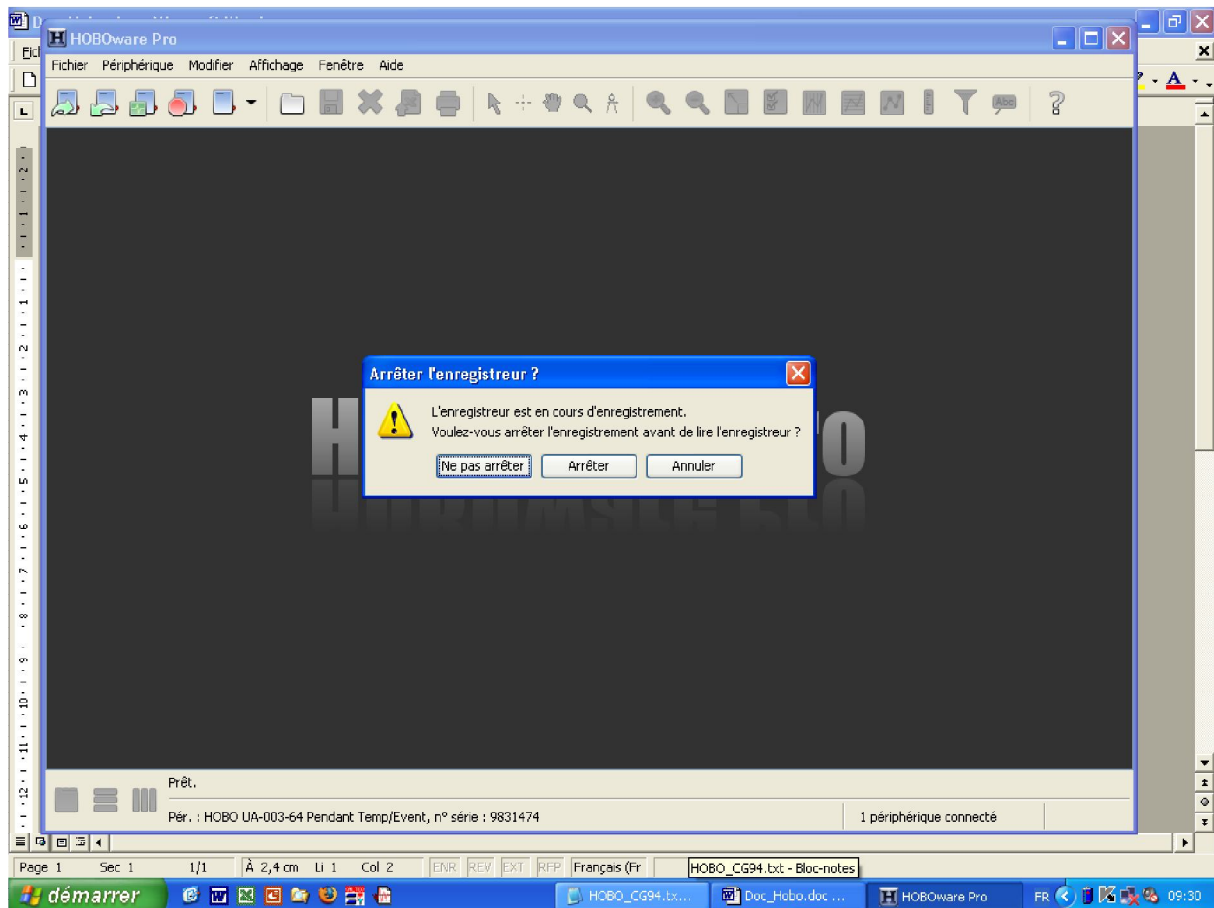
- Cliquer sur ***Périphérique*** (en haut dans la barre de menu) puis ***Lecture***

Mise en place d'un dispositif de suivi hydrique de jardins urbains



- Une boîte de dialogue **Arrêter l'enregistreur** apparaît ;

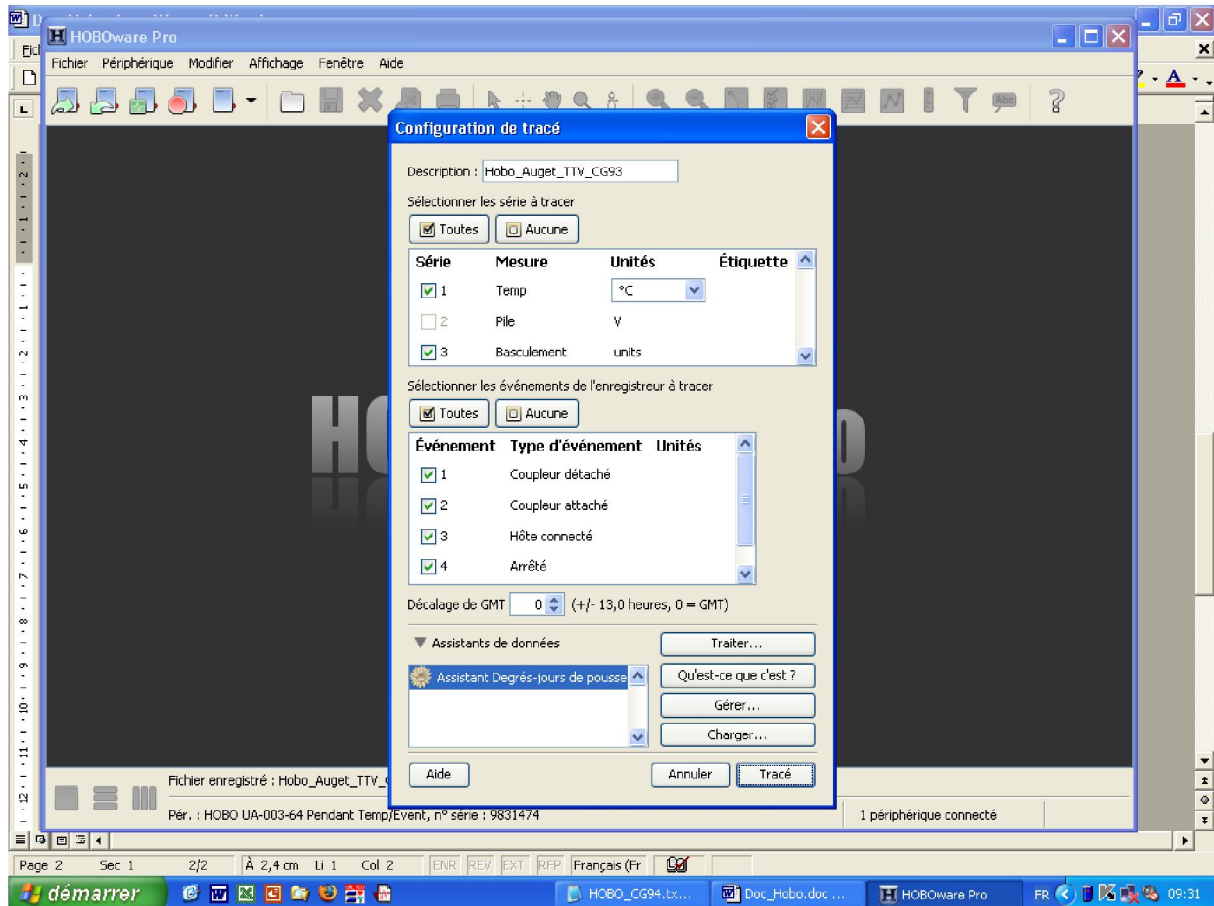
Mise en place d'un dispositif de suivi hydrique de jardins urbains



- cliquer sur **Arrêter** (ne pas faire la manip de lecture pendant un événement pluvieux)
- Enregistrer le fichier .Hobo

La boîte de dialogue **Configuration du tracé** apparaît ensuite :

Mise en place d'un dispositif de suivi hydrique de jardins urbains

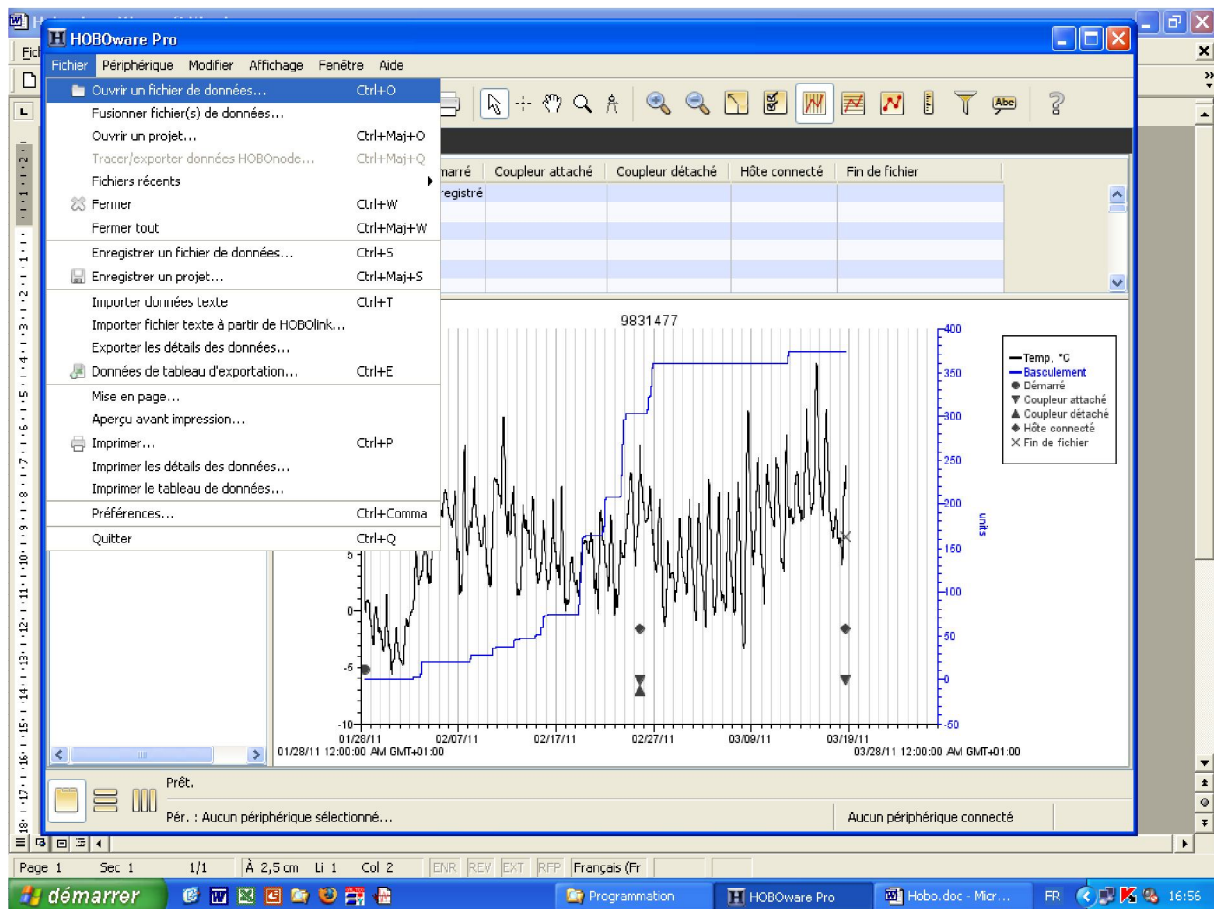


- Tracer les courbes pour vérifier que tout a fonctionné et vérifier le nombre de basculements et comparer entre les différents augets s'il y a plusieurs augets sur un même site ;
- Tracer **Temp** et **Basculement** ;
- Sélectionner tous les événements ;
- Laisser 0 à GMT (Temps universel) ;
- Cliquer sur **Tracé** ;
- Vérifier la cohérence des données : nombre de basculements croissant, pas de connexion ou de coupleur (enregistreur) et Hôte (base USB) attachés ou détachés pendant la période de mesures. Fin de fichier cohérente avec l'arrêt de l'enregistreur ;
- Lorsque c'est fait, relancer le périphérique (cf. paragraphe lancement).

4. Lecteur d'un fichier .Hobo

Pour lire un fichier déjà enregistré :

- Cliquer sur **Fichier** puis **Ouvrir un fichier de données** ;

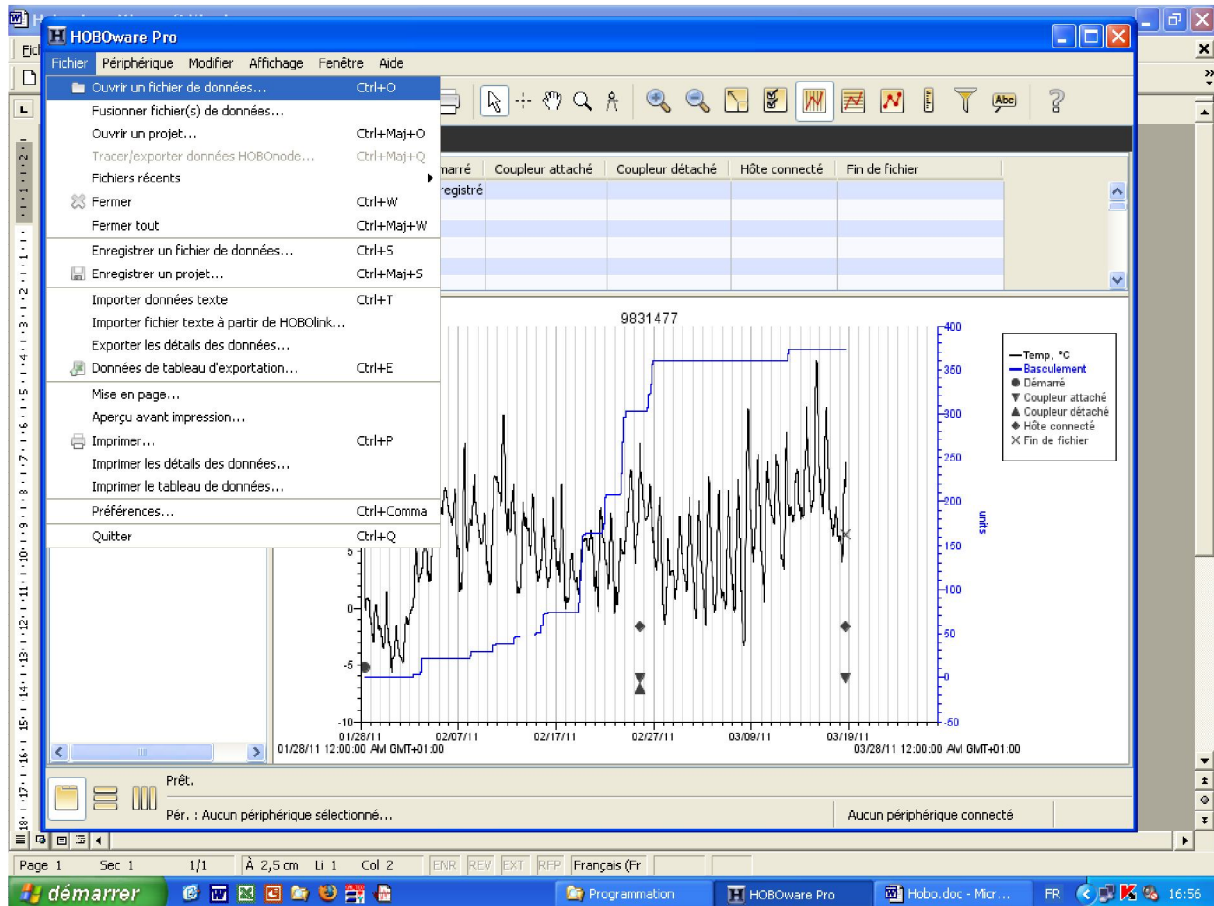


- La boîte de dialogue **Configuration du tracé** s'ouvre (cf. paragraphe Lecture de l'enregistreur) ;

Si l'on souhaite convertir un fichier .Hobo en fichier texte (utilisable sous excel ou matlab), il faut tracer uniquement la (les) colonne(s) que l'on souhaite exporter (cocher uniquement Basculement dans la **Configuration du tracé** si l'on veut exporter uniquement les basculements).

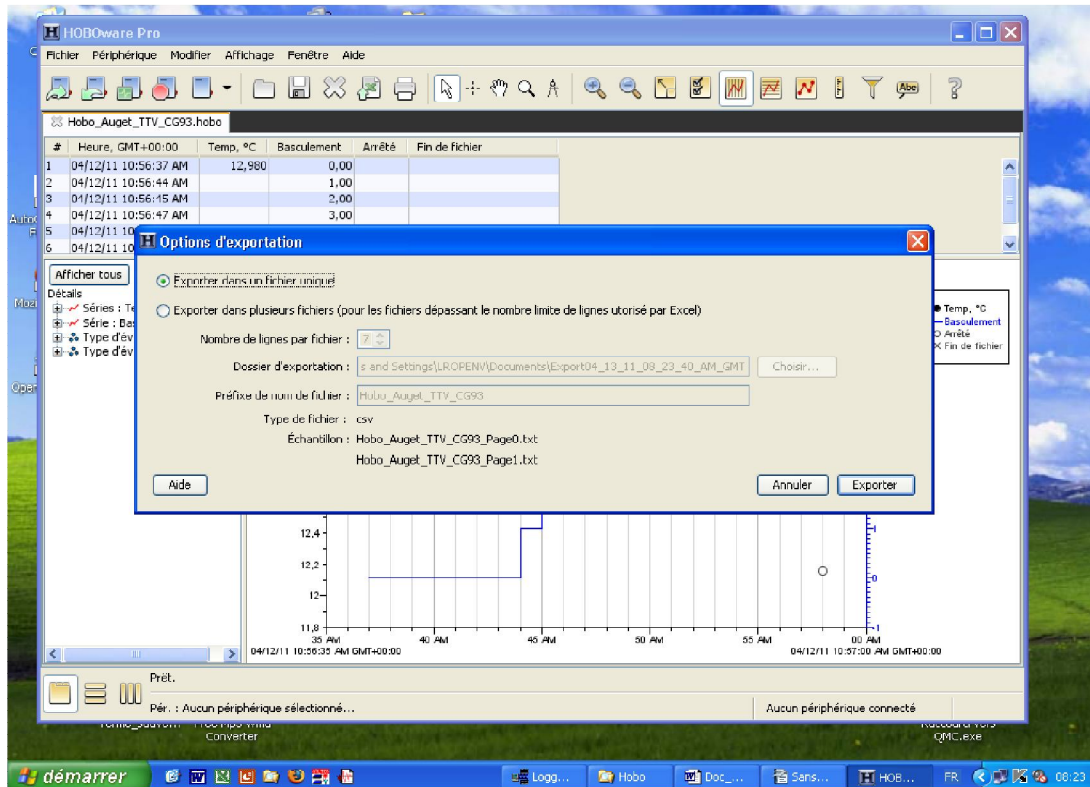
- Puis cliquer sur **Fichier** puis **Données de tableau d'exportation**.

Mise en place d'un dispositif de suivi hydrique de jardins urbains



- Choisir **Exporter dans un fichier unique** dans la boîte de dialogue **Options d'exportation** ;
- Puis **Exporter**.

Mise en place d'un dispositif de suivi hydrique de jardins urbains



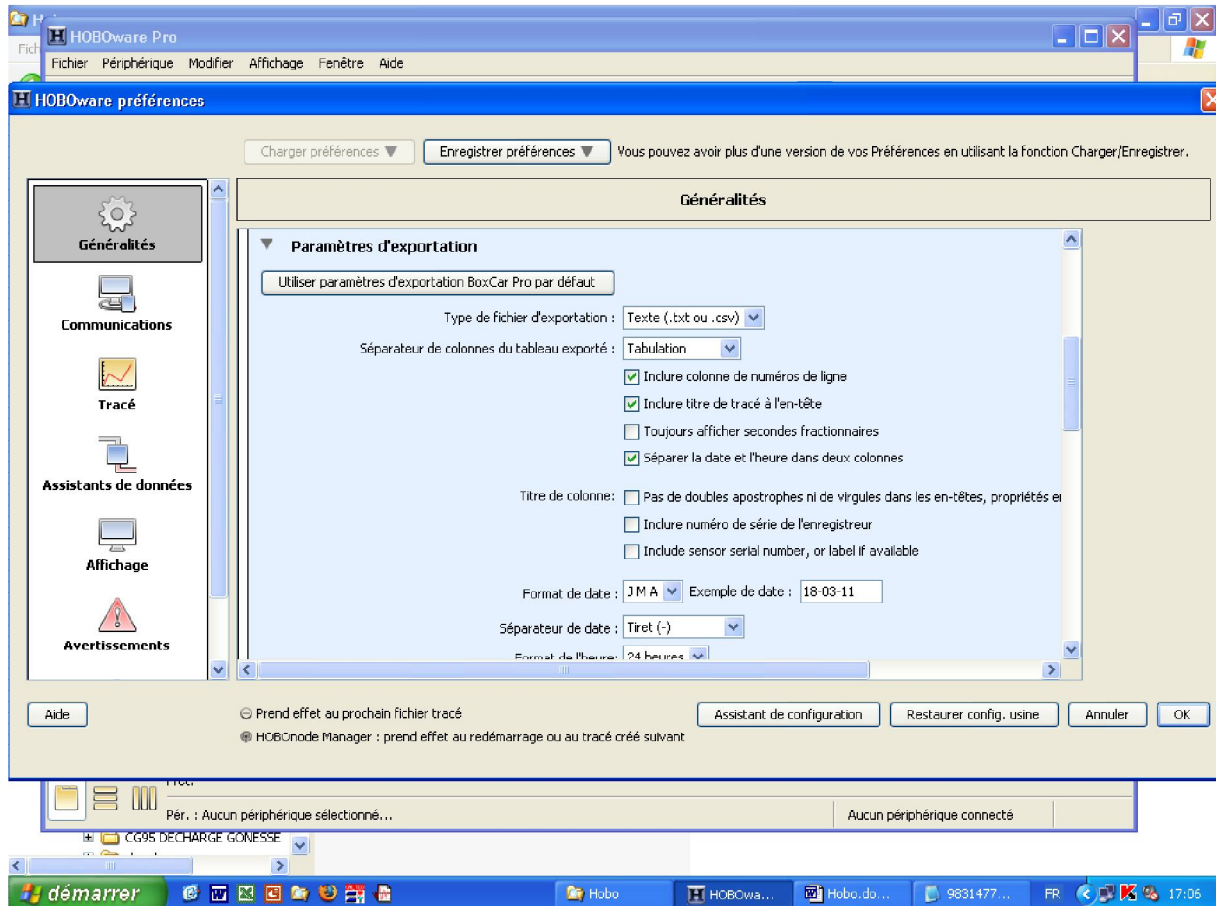
- Choisir le répertoire et le nom du fichier puis **Enregistrer**.

Les options d'exportation sont paramétrables. Pour cela aller dans **Fichier** puis **Préférences**.

Dans la boîte de dialogue **HOBOWare préférences**, aller dans **Généralités** puis **Paramètres d'exportation**.

On choisira plutôt un fichier de type texte (.txt) avec des tabulations comme séparateur. On peut inclure l'entête et les numéros de ligne et séparer la date et l'heure. Le format de la date est J M A (jour mois année) séparé par des « / » et un format de l'heure en 24h. On préférera aussi les points comme séparateur de décimales.

Mise en place d'un dispositif de suivi hydrique de jardins urbains



'CR800 Series - Programme Calibration Sonde

'18 avril 2014

'Created by Short Cut (2.8)

' 4 EC-5

'Branchement des SM100-----
--

'red : SE1

'white : VX1 (all)

'clear : gnd (all)

Mise en place d'un dispositif de suivi hydrique de jardins urbains

'=====

' Correspondance nom du capteur et nom dans le programme pour commodite programmation (boucle, etc ...)

'Pour les sondes d'humidite EC5, on utilise 2 variables, la donnee brute en mV (suffixe _mV) et

'la donnee en teneur en eau volumique (suffixe _VW) obtenue a partir de la courbe d'etalonnage constructeur

'Nombre de capteurs

Const Nb_SM100=4

Const Nb_Tensio=3

Dim I_tensio

Dim I

'Declare Variables and Units

Public BattV

Public SM100_mV(Nb_SM100)

Public SM100_VWC(Nb_SM100)

Public Tensio_mV(Nb_Tensio)

Public Tensio_kPa(Nb_Tensio)

Public Temp

Units BattV=Volts

Units SM100_mV(Nb_SM100)=mV

Units Tensio_mV(Nb_Tensio)=mV

Units Tensio_kPa(Nb_Tensio)=kPa

Units Temp=degK

'Define Data Tables

Mise en place d'un dispositif de suivi hydrique de jardins urbains

```
DataTable(Nourisson ,True,-1)
```

```
    DataInterval(0,60,Sec,10)
```

```
    Minimum(1,BattV,FP2,False,False)
```

```
    Average(Nb_SM100,SM100_mV()tScan,FP2,False)
```

```
    Average(Nb_SM100,SM100_VWC(),FP2,False)
```

```
    Average(Nb_Tensio,Tensio_mV(),FP2,False)
```

```
    Average(Nb_Tensio,Tensio_kPa(),FP2,False)
```

```
    'Average(1,Temp,FP2,False)
```

```
EndTable
```

```
'Main Program
```

```
BeginProg
```

```
    Scan(5,Sec,1,0)
```

```
        'Default Datalogger Battery Voltage measurement BattV
```

```
        Battery(BattV)
```

```
        'ECHO Probe EC-5 measurement mV: donnees brutes en mV
```

```
BrHalf(SM100_mV(),Nb_SM100,mV2500,1,Vx1,Nb_SM100,2500,False,10000,_60Hz, 1,0)
```

```
    For I=1 To Nb_SM100"
```

```
        SM100_VWC(I)=4.4802*SM100_mV(I)*SM100_mV(I)-1.9505*SM100_mV(I)+  
0.1953
```

```
    Next
```

```
'BrHalf(SM100_mV_2,Nb_SM100,Autorange,2,Vx1,1,2500,False,10000,_60Hz, 1,0)
```

```
    PortSet (1 ,1 )
```

```
    I_tensio=1
```

```
    SubScan (0,mSec,Nb_Tensio)
```

```
    PulsePort (2,10000)
```

```
    VoltDiff (Tensio_mV(I_tensio),1,mV2500,3,False,0,_60Hz,1.0,0)
```

```
    VoltDiff (Tensio_kPa(I_tensio),1,mV2500,3,False,0,_60Hz,-0.1,100)
```

Mise en place d'un dispositif de suivi hydrique de jardins urbains

I_tensio=I_tensio+1

NextSubScan

PortSet(1,0)

CallTable(Nourisson)

NextScan