

**PADILLA Aurélia**  
**Master 2 Professionnel Eaux Souterraines**



# CAS D'ETUDES EN ZONE NON SATUREE EN ESPAGNE



*Photo 1 : Vue aérienne du Parc National de Las Tablas de Daimiel*

## RAPPORT DE STAGE M2PES 31 mars - 15 Août 2008

**Maitre de stage : Sr Luis Moreno**  
**Tuteur de stage OSUG : Mr Théo Vischel**

**Année universitaire 2007-2008**

# REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout particulièrement Luis Moreno Merina, mon maître de stage au sein de l'IGME sans qui ce stage n'aurait pas été possible.

Je remercie Mr Théo Vischel, mon tuteur de stage, pour son aide et sa disponibilité.

Je souhaite aussi remercier Hector Aguilera, Silvino Castaño Castaño, Emilia Jimenez Hernández, Almudena de la Losa Román pour leur patience et leur aide tout au long de mon stage.

Je tiens à remercier sincèrement Juan, Monica, Esther et Ruth avec qui j'ai partagé mon espace de travail et bien d'autres moments encore, pour leur inestimable soutien et leur amitié.

Enfin je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé dans l'apprentissage de cette langue et de cette culture exceptionnelles.

# TABLES DES MATIERES

<b>Introduction generale</b>	<b>p. 6</b>
<b>Présentation de l'entreprise</b>	<b>p.7</b>
<b>Partie 1 : Travaux initiaux pour l'estimation du temps de transit dans la zone non saturée, avec un essai de traçage (Arganda del Rey)</b>	
<b>Introduction</b>	<b>p.11</b>
<b>I. Présentation du site</b>	<b>p.12</b>
1) Localisation géographique	<b>p.13</b>
2) Caractéristiques générales du site	<b>p.14</b>
a) Contexte géologique	
b) Contexte hydrogéologique	
c) Contexte climatologique	
<b>II. Matériels et méthodes</b>	<b>p.16</b>
1) Campagne de terrain	<b>p.14</b>
a) Détermination des caractéristiques hydrauliques	
b) Traçage par aspersion : protocole expérimental	
2) Analyses de laboratoire	<b>p.22</b>
a) Détermination des caractéristiques hydrauliques	
b) Traçage par aspersion	
<b>III. Résultats et discussion</b>	<b>p.26</b>
1) Echantillon de sol	<b>p.26</b>
a) La texture	
b) La densité apparente, humidité, porosité	
c) La perméabilité	
d) Les courbes caractéristiques pF	
2) Essais d'infiltration à charge constante	<b>p.29</b>
3) Traçage par aspersion	<b>p.30</b>
a) Analyse granulométrique	
b) Analyse chromatographique	
c) La conductivité électrique	
d) Estimation d'un temps de transit	
<b>IV. Modélisation du flux en ZNS</b>	<b>p.35</b>
1) Introduction théorique au flux en ZNS	<b>p.35</b>
2) Fonctionnement du programme VS2DTI 1,2 : les différentes étapes de la construction	<b>p.37</b>
3) Construction du modèle de simulation d'un flux	<b>p.38</b>
4) Estimation d'un temps de transit à partir du post-processeur	<b>p.43</b>
5) Amélioration du modèle	<b>p.44</b>
<b>Conclusion</b>	<b>p.51</b>

## **PARTIE 2 :Travaux préalables pour la caractérisation de la zone humide de Las Tablas de Daimiel (Ciudad Real, Castilla La Mancha)**

<b>Introduction</b>	<b>p.53</b>
<b>I. Présentation du site</b>	<b>p.54</b>
1) Localisation géographique	<b>p.54</b>
2) Caractéristiques générales du site	<b>p.55</b>
a) Contexte géologique	
b) Contexte climatologique	
c) Contexte hydrogéologique	
<b>II. Matériels et méthodes</b>	<b>p.57</b>
1) Etudes préalables pour l'élaboration de la cartographie des caractéristiques hydrauliques en ZNS	<b>p.57</b>
a) Campagne de terrain	
b) Analyse de laboratoire	
2) Evaluation de la relation eaux superficielles / eaux souterraines	<b>p.61</b>
a) Campagne de terrain	
b) Analyse de laboratoire	
<b>III. Résultats et discussion</b>	<b>p.65</b>
1) Etudes préalables pour l'élaboration de la cartographie des caractéristiques hydrauliques en ZNS	<b>p.65</b>
a) Les échantillons de sol	
b) Essais d'infiltration	
2) Evaluation de la relation eaux superficielles / eaux souterraines	<b>p.67</b>
a) Contrôle piézométrique du parc	
b) Profil de la Cigüela	
<b>Conclusion</b>	<b>p.72</b>
<b>Conclusion générale</b>	<b>p.73</b>
<b>Bilan personnel</b>	<b>p.74</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>p.75</b>
<b>Annexes</b>	<b>p.76</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Cartes géographiques d'Arganda del Rey.....	13
Figure 2 : Carte de situation du site expérimental.....	14
Figure 3: Données climatiques de la communauté de Madrid année 2007.....	15
Figure 4 : Exemple de courbe type de l'infiltration cumulée en fonction du temps.....	18
Figure 5: Schéma expérimental.....	21
Figure 6: Schéma représentatif des différentes formations observées.....	26
Figure 7: Représentation des valeurs de rétention d'eau de la couche 0 à 10cm.....	28
Figure 8: Représentation des valeurs de rétention d'eau de la couche 20 à 30cm .....	28
Figure 9 : Evolution de la concentration en bromure en fonction de la profondeur.....	31
Figure 10 : Données de précipitations Arganda del Rey (Juin 2007 - Juin 2008).....	32
Figure 11 : Evolution de la conductivité électrique en fonction de la profondeur.....	33
Figure 12 : Exploitation des résultats de la simulation.....	42
Figure 13 : Aperçu de la simulation du traçage à T0.....	45
Figure 14 : Aperçu de la simulation du traçage à T1.....	46
Figure 15 : Aperçu de la simulation du traçage à T2.....	47
Figure 16 : Evolution de l'humidité et de la concentration en traceur en fonction du temps à 40cm de profondeur.....	48
Figure 17 : Courbe de restitution de la masse du traceur dans le temps.....	49
Figure 18 : Evolution de la concentration du traceur en fonction de la profondeur à T1.....	49
Figure 19 : Evolution de la concentration du traceur en fonction de la profondeur à T2.....	50
Figure 20: Localisation du Parc National de Las Tablas de Daimiel en Espagne.....	54
Figure 21: Le Parc national de Las Tablas de Daimiel .....	55
Figure 22 : Réseau hydrographique du Parc National de las Tablas de Daimiel.....	57
Figure 23: Carte de répartition des sols.....	58
Figure 24 : Cartes piézométriques réalisées sur Surfer 8.....	68
Figure 25 : Composition isotopique des eaux de la Cigüela.....	70
Figure 25 : Profil de conductivité électrique de la Cigüela.....	71

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Valeurs empiriques de $\alpha$ en fonction du matériel.....	18
Tableau 2 : Analyse texturale.....	26
Tableau 3 : Valeurs de densité apparente, contenu en eau, porosité.....	27
Tableau 4 : Valeurs de perméabilité.....	27
Tableau 5 : Estimation du $K_s$ par la méthode de Wu.....	29
Tableau 6 a: Valeurs de conductivité hydraulique à saturation obtenues avec le perméamètre de laboratoire.....	29
Tableau 6 b: Valeurs de conductivité hydraulique à saturation obtenues avec les essais d'infiltration.....	29
Tableau 7 : Analyse granulométrique et texturale.....	30
Tableau 8 : Valeurs des paramètres introduits dans le modèle.....	40
Tableau 9 : Estimation de la vitesse de transit.....	43
Tableau 10 : Valeurs de dispersivité longitudinale et transversale. Schulze Makuch, D. (2005). .....	44
Tableau 11 : Valeurs de porosité des échantillons.....	65
Tableau 12 : Valeurs de densité des échantillons.....	65
Tableau 13 : Valeurs de conductivité hydraulique obtenues avec le perméamètre.....	66
Tableau 14 : Détermination de la conductivité à saturation à partir de la méthode de Wu et al.....	66

## LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Vue aérienne du Parc National de Las Tablas de Daimiel.....	0
Photo 2 : Entrée de l'Instituto Geologico y Minero de España et du musée géominier.....	7
Photo 3 : Equipement de prise d'échantillons de sol inaltérés.....	16
Photos 4 & 5 : Mise en place des essais d'infiltration à charge constante.....	17
Photo 6 : Application du traceur sur la parcelle expérimentale.....	21
Photo 7 : Appareillage utilisé pour le prélèvement de la carotte de 2m.....	22
Photo 8 : Vue générale du perméamètre de laboratoire Eijkekamp.....	23
Photo 9 : Matériel utilisé pour le perméamètre.....	23
Photo 10 : Bac à sable et kaoline Eijkelkamp.....	24
Photo 11 : Chambre de Richards Eijkelkamp.....	24
Photo 12 : Prélèvements d'échantillons de sol.....	59
Photo 13: Essais d'infiltration à charge constante.....	60
Photo 14 : Echantillons de sol de Las Tablas de Daimiel.....	60
Photo 15 : Matériels de prélèvement des échantillons d'eau.....	62
Photo 16 : Le fleuve Cigüela.....	63
Photo 17 : Mesures de terrain.....	64

# INTRODUCTION GENERALE

Dans le cadre de la formation professionnelle du Master 2 Pro Hydrogéologie-eaux-souterraines de Grenoble, j'ai réalisé mon stage de fin d'étude au sein de l'Instituto Geologico y Minero de España (IGME) à Madrid.

Le mémoire traite des deux projets auxquels j'ai participé en m'intégrant dans des équipes de travail de l'unité de recherche en processus actifs et qualité environnementale appartenant au département de recherche et prospectives géoscientifiques. L'ensemble des travaux que j'ai pu réaliser dans cette entreprise porte sur l'étude de la Zone Non Saturée (ZNS).

Le premier est une étude visant à étudier le comportement d'une ZNS après épandage de boues de station d'épuration. Un essai de traçage ainsi que la calibration d'un modèle ont été mis en place afin d'estimer un temps de transit.

Le second consiste en l'étude de la ZNS du Parc National de Las Tablas de Daimiel (Ciudad Real, Castilla La Mancha). Dans le cadre du développement d'une méthode appliquée pour la caractérisation de la ZNS, différentes campagnes de terrain ont été réalisées.

Nous commencerons par présenter succinctement l'entreprise et ses fonctions puis chacun de ces projets sera exposé de façon précise.

## Présentation de l'entreprise : L'Instituto Geologico y Minero de España

### I. Qu'est-ce que l'IGME ?



Photo 2 : Entrée de l'Instituto Geologico y Minero de España et du musée géominier

**Adresse:** 23, Calle Rios Rosas,  
28003, MADRID  
[igme@igme.es](mailto:igme@igme.es)  
Téléphone: 0034913495700  
Fax: 0034914426216  
Site web: [www.igme.es](http://www.igme.es)

L'Instituto Geologico et Minero de España (IGME) est un organisme public de recherche, d'assistance technique et de développement technologique, appartenant au Ministère Science et Innovation.

Il a été créé en 1849 pour étudier la géologie du territoire espagnol, établir la carte géologique d'Espagne, mettre en évidence les gisements de minéraux et étudier les eaux souterraines.

Sa mission est de fournir les connaissances et les informations précises en relation avec les sciences de la terre aux administrations, aux communautés autonomes et à la société en général.

#### 1) Ses fonctions

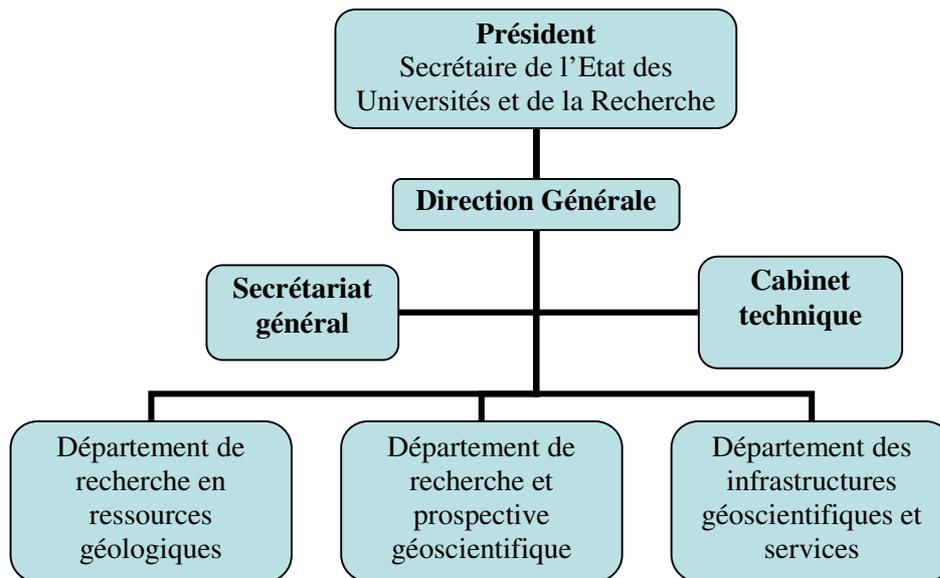
Les fonctions principales de l'IGME sont :

- L'étude, la recherche, les analyses et la reconnaissance sur le terrain des sciences et technologies de la terre.
- L'information, l'assistance technique scientifique et le conseil aux administrations publiques et à la société en général, en géologie, hydrogéologie, sciences géo-environnementales et ressources géologiques et minérales.
- Relations interdisciplinaires avec d'autres centres de savoir contribuant à une meilleure connaissance du territoire et des processus qui le constituent, à l'exploitation soutenue des ressources et à la conservation du patrimoine géologique et hydrique.

L'IGME est présent lors des rencontres nationales et internationales scientifiques et techniques et développe des projets aussi bien pour les institutions publiques que privées et collabore avec diverses organisations à l'étranger.

## 2) La structure de l'IGME

### ➤ Organigramme



L'IGME compte près de 200 titulaires supérieurs et plus de 400 employés.

L'IGME se compose de trois départements :

- Le département de recherche en ressources géologiques
- Le département de recherche et prospective géoscientifique
- Le département des infrastructures géoscientifiques et des services

Mon stage de fin d'étude se déroule dans le département de recherche et de prospective géoscientifique. Ce même département se divise en quatre unités :

- unité de recherche en risques naturels
- unité de recherche en changement global
- unité de recherche en processus actifs et qualité environnementale
- unité de recherche du sous-sol et des réservoirs géologiques

Je réalise mon stage plus précisément au sein de l'« unité de recherche en processus actifs et qualité environnementale ». Les processus actifs font appel ici aux processus qui se produisent dans la zone non saturée (ZNS).

### 3) Les Objectifs de l'IGME

Les principaux objectifs de l'IGME pour la période 2005-2009 sont les suivants :

- Cartographie géoscientifique du territoire national : cartes géologiques, hydrogéologiques, de risques géologiques (mouvements de terrain, inondations...) grâce à l'utilisation de nouvelles technologies et en intégrant des bases de données géoréférencées.
- Risques naturels: recherche, analyse et caractérisation des processus géologiques susceptibles de provoquer des dommages sur les biens et personnes (inondations, tremblements de terre...) et d'affecter le milieu physique (désertification, érosion...).
- Hydrogéologie et qualité environnementale : étude et recherche des ressources hydriques souterraines, de la qualité et des pressions et impacts auxquelles elles sont soumises. Etude de la zone non saturée (ZNS) et des sols contaminés. Développement de méthodologie et de techniques de décontamination.
- Géologie du sous-sol et stockage du CO<sub>2</sub>: recherche et modélisation 3D afin de caractériser la géométrie et l'hydraulique des formations géologiques susceptibles d'être utilisées comme couche géologique de stockage profond de CO<sub>2</sub> et d'autres substances potentiellement dangereuses pour l'environnement.
- Ressources minérales et impact environnemental des mines : étude du cycle des ressources minérales (recherche des processus géologiques qui donnent naissance aux gisements), roches d'intérêt économique et restauration des espaces miniers.
- Géodiversité du patrimoine géologique et culture scientifique : caractériser la géodiversité du territoire espagnol, étudier et présenter le patrimoine géologique et paléontologique et minier et actualisation des collections du musée géominier.
- SIG : recherche et développement de modèles en accès par internet.

#### 4) Les différents services liés à l'IGME

- L'IGME possède une lithothèque qui gère la conservation des carottes de sondage et d'exploration géochimique. Elle permet la consultation et l'étude des carottes.
- Le service de publications de l'IGME a comme fonction, l'édition, la diffusion et la vente de publications à caractère scientifique et technique comme les projets de recherche réalisés par l'institut mais également les thèses et les études appliquées en collaboration avec d'autres administrations.  
Il édite les cartes géologiques et hydrogéologiques au 1:50000 et des cartes de risques. Il a à son actif, plus de 3000 publications et deux revues spécialisées.
- Au sein de l'IGME, se trouve également une bibliothèque créée lors de l'inauguration de l'IGME en 1849. Bibliothèque d'un organisme public de recherche, elle est spécialisée en Sciences de la Terre.  
L'accès aux livres est gratuit mais elle est principalement destinée aux chercheurs, personnel technique, étudiants et toute personne s'intéressant à ce domaine de la science. Elle se trouve au siège central de l'IGME.
- Les laboratoires d'analyses de l'IGME possèdent des équipements de pointe pour la réalisation de nombreuses analyses chimiques (chromatographe, spectrophotomètre, sédigraphe, pycnomètre...), pétrographiques, géotechniques...
- L'IGME compte de nombreux bureaux de projets à travers toute l'Espagne qui permettent un appui technico-scientifique : Almería, Granada, Las Palmas, León, Murcia, Oviedo, Palma de Mallorca, Salamanca, Santiago, Sevilla, Zaragoza, Valencia.

## **PARTIE 1 :**

Travaux initiaux pour l'estimation du temps de transit dans la zone non saturée, avec un essai de traçage (Arganda del Rey)

## Introduction

Le devenir des boues de stations d'épuration est un problème environnemental actuel important. Une des alternatives déjà mise en place est l'épandage sur terrains agricoles comme amendement nutritif mais il est indispensable de connaître les conséquences que cela peut avoir sur le sol et sur les eaux souterraines.

L'IGME en collaboration avec le département de science du sol de l'Université Complutense de Madrid a élaboré un projet s'intitulant « Impacto sobre el cambio climatico de la aplicacion de lodos de depuladora al suelo. Efectos en el secuestro del carbono », (« Impact sur le changement climatique de l'application des boues de stations d'épuration sur le sol. Effets sur le stockage du carbone »). L'objectif général de ce projet est de caractériser les différents processus physiques, chimiques, et biologiques se produisant dans une ZNS lors d'un épandage. Ce projet s'étendant sur trois années par sa diversité et sa complexité, ma participation apparaîtra au sein d'une des études le constituant.

### Objectif de l'étude :

L'objectif de cette présente étude est de caractériser le comportement de la ZNS d'un point de vue physique et d'estimer le temps de transit entre le moment où se produit la lixiviation des substances contaminantes et l'arrivée jusqu'aux eaux souterraines.

Pour cela un essai de traçage chimique (Bromure de potassium) suivi par analyse chromatographique, a été mis en place en juin 2007 sur une parcelle agricole d'Arganda del Rey (village au sud de Madrid) et diverses analyses de sol ont été réalisées pour évaluer les caractéristiques hydrauliques de notre site.

Parallèlement sera utilisé le logiciel de modélisation informatique VS2DT qui permet la représentation en deux dimensions des flux d'eau et de contaminants dans la ZNS. Cette modélisation permettra, en intégrant nos résultats obtenus sur le terrain, de simuler l'essai de traçage et ainsi d'estimer un temps de transit de manière plus rapide que pour le traçage réel et de compléter nos connaissances sur cette ZNS.

Mon travail sur cette étude a consisté dans un premier temps en l'exploitation de tous les résultats des campagnes de mesures réalisées depuis le commencement du projet, puis dans un deuxième temps en la mise en place du modèle de simulation.

# I. Présentation du site

## 1) Localisation géographique

Le site se situe proche du village d'Arganda del Rey, au sud-est de la communauté de Madrid (voir figure 1).

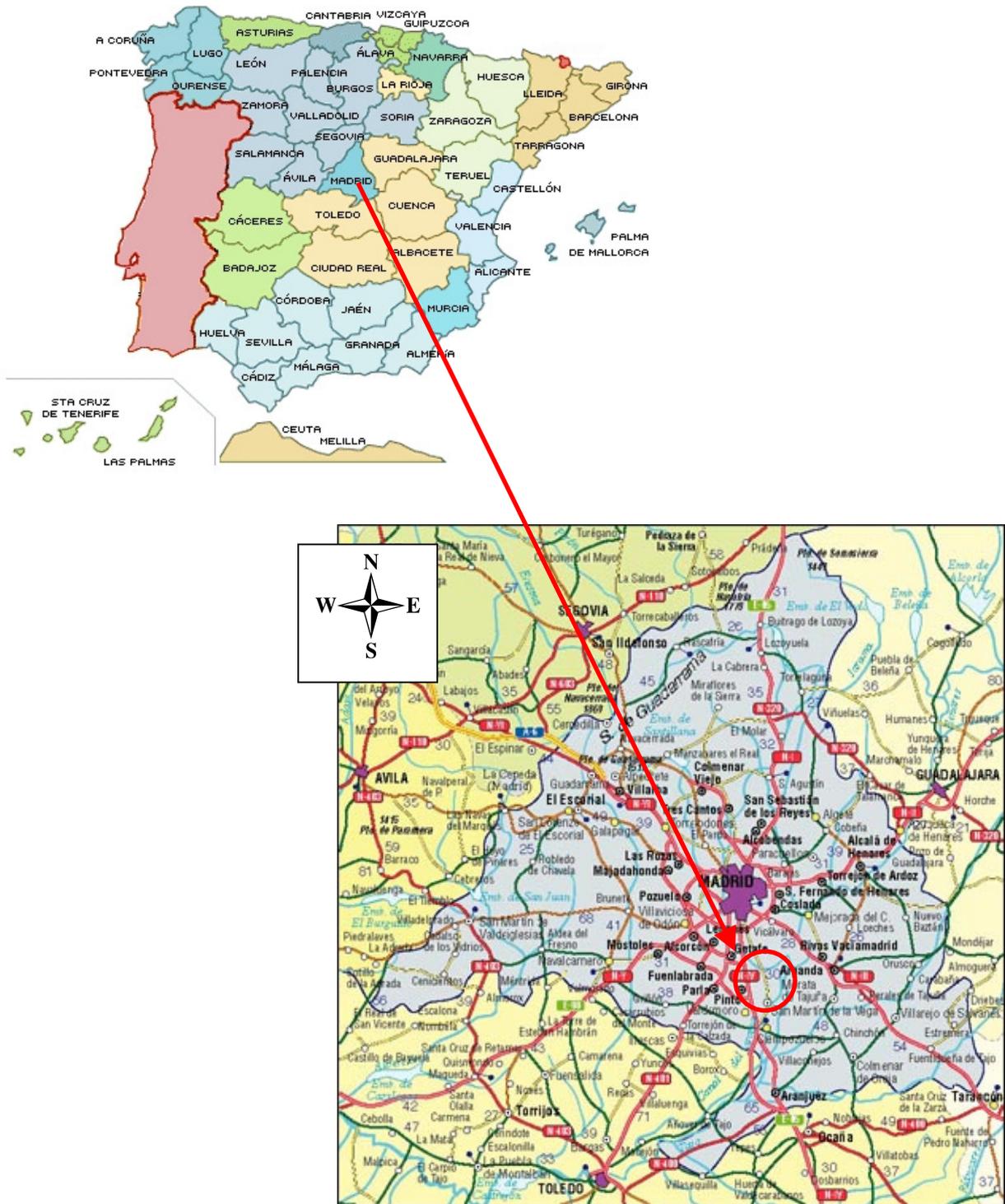


Figure 1 : Cartes géographiques de Arganda del Rey

## 2) Caractéristiques générales du site

Le site d'étude a une superficie d'environ 0,5 hectare. Il se situe dans une des parcelles expérimentales qui appartiennent à l'IMIDRA (Instituto de Investigación Agraria y Alimentaria), à l'ouest du village d'Arganda del Rey entre la ligne de métro 9 et l'autoroute A3.

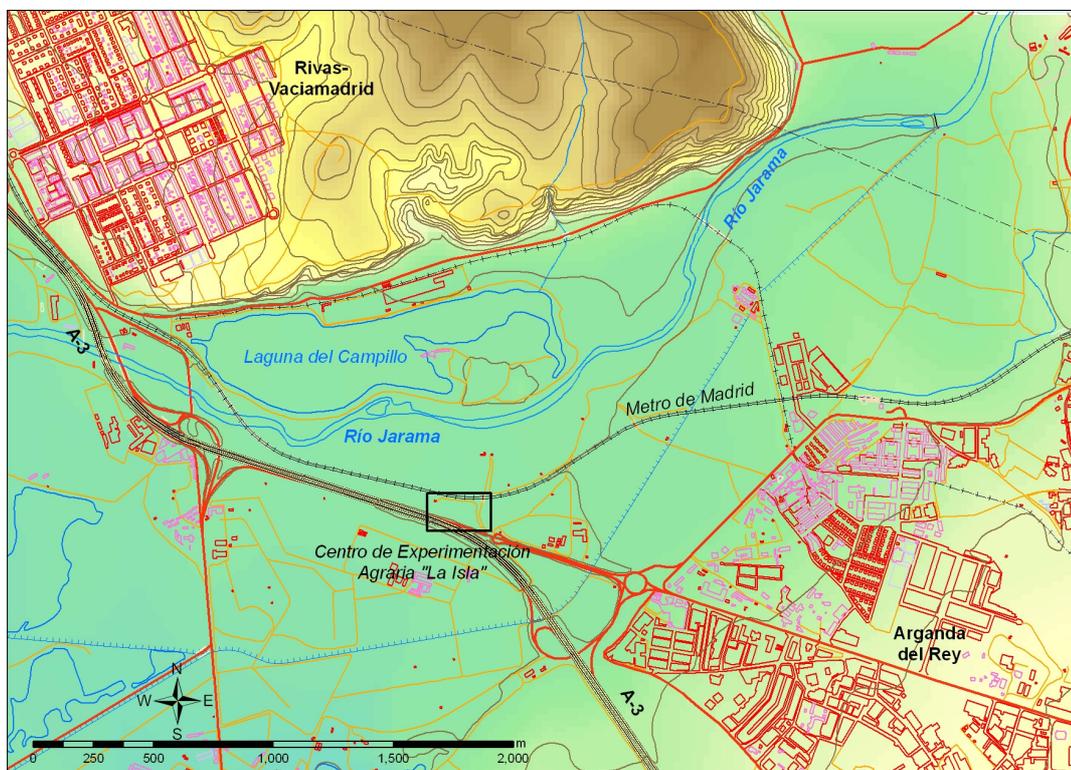


Figure 2 : carte de situation du site expérimental

### a) Contexte géologique

Arganda del Rey est située dans la cuvette centrale du Tajo, à l'intérieur de la dépression tertiaire de Castilla la Nueva, sur le bord Sud de la région naturelle connue sous le nom de la Alcarria. Elle présente un caractère morpho structural et lithologique typiques des zones centrales de ces dépressions, qui font ressortir la structure en plateau, constituée de strates horizontales, les fleuves en fond de vallée et une monotone lithologie calco-évaporitique.

En effet les sédiments déposés correspondent en majeure partie à des sédiments détritiques et évaporitiques déposés dans un bassin endoréique sous les conditions d'aridité climatique. Ces matériaux se retrouvent recouverts par de vastes dépôts quaternaire, au dessous desquels se trouve un sol composé de dépôts colluviaux et éoliens et divers types de sédiments d'origine fluviale.

## b) Contexte hydrogéologique

En ce qui concerne l'hydrogéologie, le fleuve Jarama coule au Nord de la parcelle. Un puits situé au Nord Ouest de la parcelle nous permet de vérifier régulièrement le niveau de la nappe. Elle se trouve généralement à environ 6m de profondeur.

Les analyses effectuées lors de la présente étude nous permettront de classer la perméabilité des différentes couches de la ZNS que l'on peut rencontrer sur le site en fonction de leur texture, leur structure et leur disposition sédimentaire.

## c) Contexte climatologique

Le climat de cette région est méditerranéen continental. Les hivers sont frais, avec gelées nocturnes et neiges occasionnelles. Les étés sont chauds. L'oscillation de température journalière est importante. Les précipitations mensuelles sont assez régulières avec une période plus sèches en été.

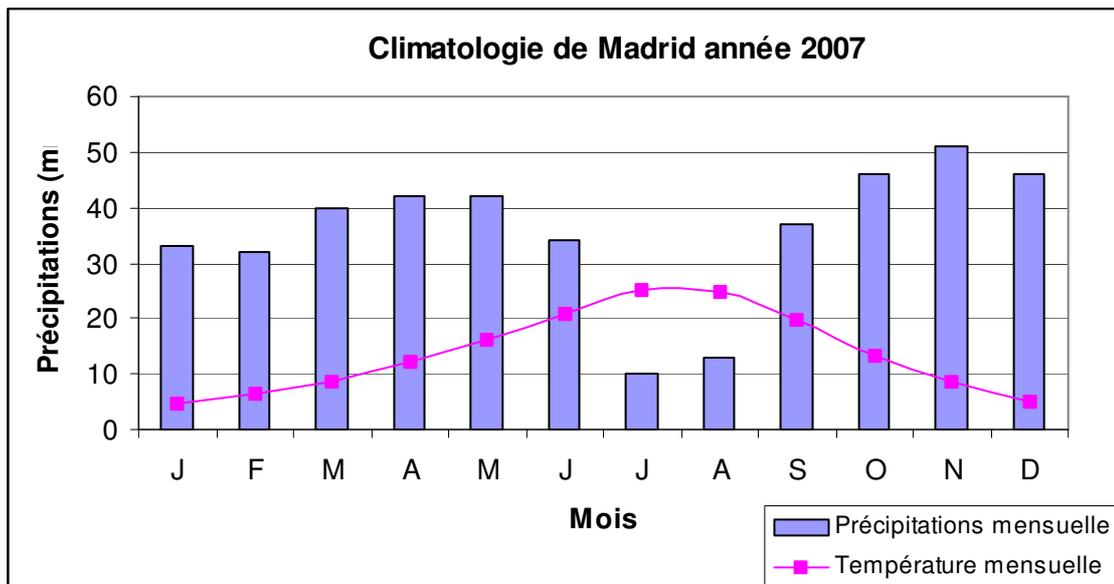


Figure 3: Données climatologique de la communauté de Madrid année 2007

Arganda del Rey se situe à 618m d'altitude

## II. Matériels et méthodes

Ce travail porte principalement sur l'emploi d'un traçage chimique par aspersion pour calibrer le modèle de transport qui permettra d'estimer les temps de transit dans la ZNS. L'essai de traçage se déroulant sur deux ans, diverses analyses ont été réalisées en parallèle afin d'évaluer les caractéristiques hydrauliques du sol et ainsi apporter les données nécessaires au modèle. Le protocole expérimental se déroule en deux temps un premier sur le terrain, et un autre au laboratoire où sont analysés les échantillons. Bien que le projet ait été mis en place avant le début de mon stage, il sera présenté dans cette partie l'ensemble des campagnes de terrain et des analyses réalisées sur ce projet pour une meilleure compréhension générale.

### 1) Campagne de terrain

#### a) Détermination des caractéristiques hydrauliques

Lors de la première visite de terrain, 4 types de sol ont été mis en évidence dans la partie supérieure de la ZNS à des profondeurs différentes. Il est à noter que la surface du sol est modifiée par l'activité anthropique (labourage). De plus la dernière formation s'étend de 140cm jusqu'à la nappe. Ces différentes formations mises en évidence, nous avons prélevé des échantillons de sol de chacune d'elles et réalisé des essais d'infiltration à charge constante afin d'en déterminer les propriétés hydrauliques.

#### ➤ Relevé d'échantillon de sol

Dans un premier temps, nous avons prélevés des échantillons de sol aux différentes profondeurs à l'aide des cylindres calibrés Eijkelkamp modèle P1.31, voir photo 3. A partir de ces échantillons, nous pourrions déterminer différentes caractéristiques physiques du sol telles que :

- la densité apparente,
- la porosité,
- le contenu en humidité volumique,
- la granulométrie et la texture,
- la perméabilité.



Photo 3 : Equipement de prise d'échantillons de sol inaltérés

### ➤ Essais d'infiltration à charge constante

L'objectif de ces essais d'infiltration est de connaître et de comprendre le comportement de l'ensemble de la ZNS et ainsi d'estimer une valeur de la conductivité hydraulique à saturation c'est-à-dire la capacité maximale du sol à transmettre l'eau, afin d'optimiser au mieux le déroulement de l'essai de traçage à effectuer. La conductivité du sol est une caractéristique pédologique qui renseigne sur la vitesse à laquelle l'eau se déplace dans le sol.

L'essai consiste à maintenir dans un cylindre en acier de 30cm de diamètre, 1mm d'épaisseur et 25cm de haut, une charge constante d'eau. La méthode se base sur la mesure de la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol. (voir photo 4 & 5).

Le contrôle de l'essai se réalise en notant le temps que met 1cm d'eau pour s'infiltrer. L'essai est terminé lorsque le temps ou plus précisément l'infiltration se stabilise, c'est-à-dire lorsque le sol est saturé en eau. Pour conserver la charge constante, le niveau de l'eau est ajustée chaque fois qu'1cm s'est infiltré.



*Photos 4 & 5 : Mise en place des essais d'infiltration à charge constante*

**Gauche** : Essais d'infiltration réalisé en surface sans la couche labourée

**Droite** : Essai d'infiltration à 75 cm de profondeur à la limite de la zone racinaire et où se note un net changement textural.

Ces essais d'infiltration nous permettront d'estimer la conductivité hydraulique à saturation à partir de la méthode de Wu et al. 1999.

Cette méthode est basée sur la supposition que la dernière partie de la courbe d'infiltration représente la saturation du milieu poreux étudié. En effet sur une courbe type de l'infiltration cumulée en fonction du temps, les dernières valeurs s'alignent sur une droite, elles représentent le régime permanent (voir figure 4).

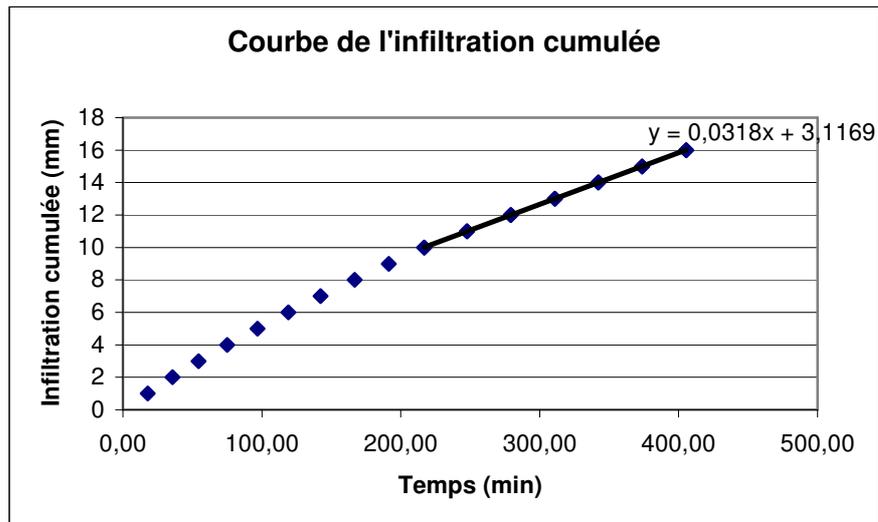


Figure 4 : Exemple de courbe type de l'infiltration cumulée en fonction du temps

Le coefficient directeur de cette équation linéaire permet de calculer un facteur correctif  $f$  qui sera ensuite introduit dans une formule mathématique développée par Wu et al. 1999.

$$K_s = A / (a * f)$$

$K_s$  : conductivité hydraulique à saturation (cm/h)

$A$  : le coefficient directeur de la droite

$a$  : constante déterminée de manière empirique  $a = 0.9084$

$f$  : un facteur correctif fonction des dimensions du cylindre

$$f = ((H + 1/\alpha) / G^*) + 1$$

$$G^* = d+r/2$$

$d$  : profondeur d'insertion du cylindre (cm)

$r$  : rayon du cylindre (cm)

$H$  : hauteur du cylindre

	Sable	Limon	Argile
$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	0,36	0,12	0,04

Tableau 1 : valeurs empiriques de  $\alpha$  en fonction du matériel

Ainsi la valeur de la conductivité hydraulique à saturation sera estimée de deux manières : par le perméamètre au laboratoire et par les essais d'infiltration sur le terrain. Ceci nous permettra de comparer les méthodes de détermination de la perméabilité.

## **b) Traçage par aspersion : protocole expérimental**

La mise en place d'un essai de traçage est une expérimentation importante car elle s'effectue directement sur le terrain ce qui permettra de caractériser notre site de manière plus significative que lors des analyses de laboratoire. L'objectif est de caractériser réellement le transport d'un soluté dans la ZNS. La durée de la campagne a été fixée à deux ans car le suivi du traceur ne s'effectuera que sur les deux premiers mètres. En effet l'échantillonnage n'est effectué seulement jusqu'à 2 mètres de profondeur et non jusqu'à la nappe car le but est de connaître un temps de transit. Ainsi il suffit que le traceur ait traversé l'ensemble des quatre formations constituant la ZNS pour estimer le temps que mettront les boues de stations d'épuration pour arriver jusqu'aux eaux souterraines.

Il a été mis en place en juin 2007 et un prélèvement est réalisé tous les 4 mois. Ainsi j'ai pu réaliser seulement une des campagnes de suivi durant mon stage et l'essentiel de ma participation a consisté en l'exploitation des résultats des analyses chromatographiques et des analyses réalisés en laboratoire.

### **➤ Choix du traceur**

Un traceur est dit parfait si chaque particule du traceur suit les mêmes lois de mouvement que les particules étudiées. Il existe différents types de traceur : naturels (isotopes de l'eau), radioactifs (Carbone 14), artificiels (fluorescéine), chimiques (sels de chlorure, sel de bromure,...). Le traceur choisi est une solution de sel de Bromure de potassium (KBr).

C'est une substance conservatrice c'est-à-dire qu'elle sera entièrement restituée en fin de traçage et ne contamine pas le sol. Par ailleurs le Bromure, aux doses employées, est inoffensif d'un point de vue toxicologique. De plus le fond géologique en Bromure dans ce type de matériel est très proche de zéro.

### **➤ Calcul de la dose de traceur à injecter**

Avant d'effectuer l'essai, il faut calculer la dose de traceur à injecter. Elle dépend de la technique d'extraction ainsi que de la limite de détection de la technique d'analyse à savoir ici la chromatographie ionique.

Il est nécessaire de s'assurer qu'après avoir parcouru 2 mètres de sol (hauteur de la carotte d'échantillonnage), les concentrations détectées seront plus importantes que l'erreur sur la mesure.

La limite de détection, sans erreurs appréciables, du bromure en utilisant cette technique d'extraction et cette technique de détermination est de 1 mg/l.

**Calcul:**

Nous souhaitons préparer une solution de Bromure de potassium de 50L.

- La superficie de la parcelle est de : 6 mailles de 1m<sup>2</sup>

$$S = 6m^2$$

- Le volume de la parcelle : Le niveau de la nappe phréatique est à environ 6m de profondeur.

$$V = 36m^3$$

- Le poids de la parcelle : la densité apparente moyenne du sol est de 1,3 g/cm<sup>3</sup>

$$P = 36 * 10^{-6} * 1.3$$

$$P = 46800Kg$$

La quantité de bromure minimum qui doit être appliquée sur le sol pour être détectée lors de l'analyse est :

$$m_{Br\ sol} (\mu g) = \text{Conc.bromure dans le sol } (\mu g/g) * P_{sol}(kg) * 10^{-3}$$

Mais la concentration limite de détection du bromure est de 1mg/l.

L'échantillon de sol tel que nous le prélevons ne peut pas être analysé par chromatographie ionique, il est nécessaire de réaliser une solution d'extraction c'est à dire d'extraire les ions bromure de la phase solide vers une phase liquide. Pour cela il est utilisé ici une solution d'extraction 1/5 ce qui signifie que 200mg de sol sont extraits par 1litre d'eau soit 5 fois le volume. Ainsi nous devons multiplier par 5 notre concentration limite de bromure.

$$\text{Donc } [Br] = 5 \text{ mg/l}$$

$$m_{Br\ sol} = 5 * 46800 * 10^{-3}$$

$$m_{Br\ sol} = 234g \text{ sur toute la parcelle } (V = 36m^3)$$

La solution à préparer est une solution de bromure de potassium et non pas seulement de bromure.

Ainsi :

$$m_{KBr} = m_{Br} * M_{KBr} / M_{Br}$$

$m_{KBr}$  : masse de KBr à introduire dans la solution (g)

$m_{Br}$  : masse de Br calculée (g)

$M_{Br}$  : masse moléculaire du bromure (g/mol)

$M_{KBr}$  : masse moléculaire du bromure de potassium (g/mol)

$$\text{D'où, } m_{KBr} = 234 * 98.9 / 79.9$$

$$m_{KBr} = 290 \text{ g}$$

C'est la quantité de Bromure de potassium qui doit être ajoutée aux 50 litres d'eau et appliquée à notre parcelle.

Il est très important de noter que le paramètre critique n'est pas la concentration en traceur détectée mais le temps que met celui-ci à traverser le sol et le temps de la restitution complète du traceur. C'est pour cela que nous pouvons employer une méthode aussi simple d'application du traceur.

Néanmoins, comme contrôle de qualité de l'essai, il devrait être vérifié que la masse totale de bromure récupérée soit le plus proche possible de la masse de bromure injectée.

### ➤ Application du traceur

Cette étude consiste en l'aspersion d'un traceur sur une parcelle délimitée. Cette parcelle est divisée en différentes mailles (6 mailles de 1m<sup>2</sup>).

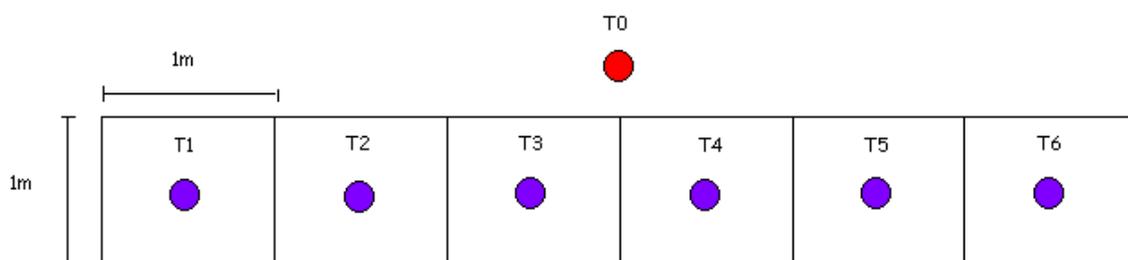
Le traceur a été appliqué simplement par aspersion en juin 2007 (*voir photo 6*)



*Photo 6 : Application du traceur sur la parcelle expérimentale*

Tous les 4 mois, une carotte de sol de 2m de profondeur est prélevée au centre d'une des mailles choisie de manière aléatoire. Plus tard au laboratoire la carotte sera divisée en plusieurs échantillons de 5cm. Des échantillons de sol ont été prélevés initialement en dehors de la zone sur laquelle est appliqué le traceur, afin de constituer une référence.

A l'heure actuelle nous avons effectué trois prises d'échantillons pour le suivi de l'évolution du traceur et celle de référence (*voir photo 7 et figure 5*).



*Figure 5: Schéma expérimental*

- $T_0$  = Temps initial (juin 2007)
- $T_1$  =  $T_0$  + 4 mois, (octobre 2007)
- $T_2$  =  $T_0$  + 8 mois, (février 2008)
- $T_3$  =  $T_0$  + 12 mois, (juin 2008), ...



*Photo 7 : Appareillage utilisé pour le prélèvement de la carotte de 2m*

## 2) Analyses de laboratoire

### a) Détermination des caractéristiques hydrauliques

Les échantillons de sol prélevés sur le terrain ont été analysés au laboratoire de science du sol de l'Université Complutense de Madrid avec lequel l'IGME est en collaboration.

Les différentes analyses effectuées sont :

- La texture afin de connaître les différents types de sols constituant notre parcelle.

L'analyse texturale est réalisée par granulométrie (tamisage).

- La densité apparente, la porosité et l'humidité des échantillons.

La densité apparente est déterminée par la différence de poids d'un échantillon, d'un volume calibré, entre avant et après que ce dernier soit passé à l'étuve. Elle est exprimée en  $\text{g}/\text{cm}^3$ , c'est le rapport de poids de sol sec (g) sur le volume total de l'échantillon ( $\text{cm}^3$ ). La porosité et l'humidité sont déduites de la densité apparente à partir de simple calcul.

➤ La perméabilité

Nous disposons du perméamètre de laboratoire Eijkelkamp modèle 09.02 (voir photo 8), apte à réaliser cinq essais en parallèle avec un système de recirculation de l'eau. Le perméamètre de laboratoire permet la mesure de la conductivité hydraulique à saturation des échantillons inaltérés prélevés avec les cylindres calibrés de 100 ml de capacité et 53mm de diamètre (voir photo 9). Le principal inconvénient est la petite taille de l'échantillon.



*Photo 8 : Vue générale du perméamètre de laboratoire Eijkelkamp*



*Photo 9 : Matériel utilisé pour le perméamètre*

La méthode consiste à placer un cylindre, avec l'échantillon de sol, sur un support qui permet de maintenir constant le niveau de l'eau et mesurer le flux qui le traverse par unité de temps.

Ce système permet de faire des mesures à charge constante (perméabilités entre  $10^0$  et  $10^5$  m/jr) et dans le cas de matériaux peu perméables (avec perméabilités entre  $10^2$  et  $10^{-4}$  m/jr) à charge variable.

- Le contenu en eau volumique pour l'élaboration des courbes caractéristiques de rétention d'eau (courbes pF)

Les courbes caractéristiques de rétention mettent en évidence dans un matériel déterminé, le contenu en eau du sol ( $\theta$ ) et son potentiel pF. L'élaboration de ce type de courbes est indispensable pour pouvoir décrire de quelle manière se déplace l'eau dans le sol. La construction des courbes caractéristiques d'humidité se fait à partir de mesures expérimentales.

Les courbes caractéristiques s'utilisent pour estimer le contenu en eau à une pression déterminée et inversement.

Différentes techniques analytiques sont utilisées selon la gamme de pF à laquelle nous voulons déterminer le contenu en eau.

En effet nous utilisons

- Le bac à sable entre pF 0 – pF 2 (-100 hPa, -0,1 bar)
- Le bac sable/kaoline entre pF 2.0 (-100 hPa, -0,1 bar) et pF 2.7 (-500 hPa, -0,5 bar). (Voir photo 10).
- La chambre de Richards permet d'établir les points de la courbe caractéristique dans la zone de tensions de succion la plus importante entre pF 3.0 et 4.2. (Voir photo 11).

Le principe général est de mettre sous pression les cylindres de sol après les avoir saturés en eau. Une valeur de pression est fixée, lorsque la stabilisation est établie, les échantillons sont pesés. La pression est augmentée au fur et à mesure. Une fois l'ensemble de la gamme de pression réalisée, nous pouvons en déduire par un calcul simple la teneur en eau de nos échantillons correspondant à chacune des pressions appliquées.



*Photo 10 de gauche : Bac à sable et Kaoline Eijkelkamp  
Photo 11 de droite : Chambre de Richards Eijkelkamp*

## b) **Traçage par aspersion**

De la même manière que pour les échantillons de sol précédents, les analyses seront réalisées au laboratoire de l'université de la Complutense de Madrid avec lequel l'IGME est en collaboration.

Une fois la carotte de 2m de profondeur réalisée, elle est découpée de manière précise au laboratoire afin de réaliser différents échantillons correspondant à 5cm de hauteur.

Ces échantillons subissent diverses analyses. L'analyse la plus importante pour cette étude est la détermination de la concentration en Bromure par chromatographie ionique.

La chromatographie ionique est une des méthodes les plus utilisées pour déterminer la concentration en ions d'un soluté. Cette méthode permet de suivre l'évolution du traceur dans le sol. Cette technique d'analyse étant complexe, les résultats mettent un certain temps à nous parvenir.

Afin de suivre plus rapidement l'évolution du traceur, la mesure de la conductivité électrique est réalisée en parallèle. Etant directement liée à la concentration en sel dissous, la conductivité électrique nous permet de localiser de façon approximative le traceur. L'inconvénient principal de la conductivité électrique est que, le sol présente intrinsèquement une conductivité électrique relativement hétérogène et variable selon les couches que l'on étudie, d'autant plus que la conductivité est due à un ensemble de sels dissous et non à une unique concentration. Ainsi l'interprétation des résultats de conductivité est bien plus complexe que ceux de la chromatographie.

Par ailleurs, à chaque campagne de prélèvement, nous déterminons aussi la densité apparente de chaque échantillon afin de vérifier l'homogénéité relative de la répartition des différents types de sol d'une maille à l'autre.

### III. Résultats et discussions

#### 1) Echantillons de sol

Comme nous l'avons expliqué ci-dessus, des échantillons de sol ont été prélevés à différentes profondeurs. Mais à l'heure actuelle seule la texture a pu être analysée à toutes les profondeurs ; les autres analyses ont été réalisées seulement en surface.

- A1 : échantillons de 0 à 10cm
- A2 : échantillons de 20 à 30cm

##### a) La texture

Les résultats sont donnés dans le Tableau 2 et représentés par un schéma sur la figure 6.

Profondeur (cm)	Texture
0-30	Argile grossière
30-105	Sable argileux
105-140	Sable limoneux
140-195	Sable

Tableau 2 : Analyse texturale

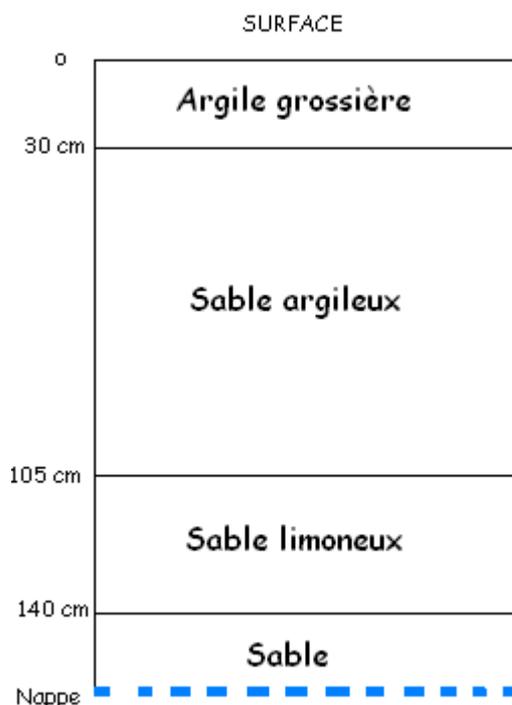


Figure 6 : Schéma représentatif des différentes formations observées

A partir de la composition texturale de notre site d'étude et en nous aidant de références bibliographiques, nous pouvons désormais prévoir les valeurs approximatives des caractéristiques hydrauliques que nous allons rencontrer avec les futures analyses.

Voir **Annexe 1** : Valeurs typiques de conductivités hydrauliques et de porosité

### b) La densité apparente, humidité, porosité

Les valeurs obtenues au laboratoire sont représentées dans le tableau 3. Le volume utilisé pour les calculs est le volume du cylindre  $V = 100\text{cm}^3$

Profondeur	Echantillon	Contenu en eau (%)	Densité apparente (g/cm <sup>3</sup> )	Porosité (%)
0-10 cm	A10	17,6	1,08	18,9
0-10 cm	A11	18,6	1,00	18,6
0-10 cm	A12	18,8	1,00	18,9
<b>Moyenne</b>	<b>A1</b>	<b>18,3</b>	<b>1,03</b>	<b>18,8</b>
20-30 cm	A20	18,3	1,41	25,8
20-30 cm	A21	16,9	1,44	24,5
20-30 cm	A22	18,2	1,44	26,2
<b>Moyenne</b>	<b>A2</b>	<b>17,8</b>	<b>1,43</b>	<b>25,5</b>

Tableau 3 : Valeurs de densité apparente, contenu en eau, porosité

Les valeurs typiques de porosité pour de l'argile grossière trouvées dans la littérature sont comprise entre 40 et 50%.

Ces résultats mettent en évidence des valeurs de porosité plus faibles (20% environ). Par ailleurs nous pouvons voir que la couche de sol comprise entre 0 et 10cm a des valeurs plus faibles que pour celle de 20 à 30cm alors que dans l'analyse texturale nous avons mis en évidence une seule couche de 0 à 30cm. Mais cette différence reste relativement faible, elle est sûrement due à l'activité anthropique, le labourage et le tassement.

### c) La perméabilité

Profondeur	Echantillon	Charge (cm)	Q (ml/min)	Q (cm <sup>3</sup> /d)	K (cm/d)	K (m/s)
0-10cm	A10	1,6	1,087	1565	249	2,9E-05
0-10cm	A11	1,6	2,545	3665	584	6,8E-05
	<b>Moyenne</b>				<b>416</b>	<b>4,8E-05</b>
20-30cm	A20	1,8	0,027	39	6	6,4E-07
20-30cm	A21	2	0,022	32	4	4,7E-07
20-30cm	A22	1,9	0,056	81	11	1,3E-06
	<b>Moyenne</b>				<b>7</b>	<b>7,9E-07</b>

Tableau 4 : Valeurs de perméabilité

Les résultats du tableau 4 laissent apparaître que la perméabilité diminue significativement avec la profondeur. Mais les valeurs obtenues pour les échantillons de 20 à 30 cm correspondent davantage à la perméabilité d'une argile grossière qui est entre  $10^{-7}$  et  $10^{-9}$  m/s d'après la littérature. Comme précédemment nous pouvons mettre en évidence que la couche superficielle (0 -10cm) ne laisse pas apparaître les caractéristiques d'une argile grossière ce qui doit provenir du remaniement par labourage et tassement. Par la suite cette observation sera négligée en attribuant à la première couche (0-30cm) les données obtenues pour la couche de 20 à 30cm pour plus de simplicité.

- d) Le contenu en eau volumique pour l'élaboration des courbes caractéristiques de rétention d'eau (courbes pF)

Une fois que les différentes gammes de pression ont été appliquées, nous obtenons les courbes suivantes. *Voir figure 7 et 8*

➤ **Sol de 0 à 10 cm**

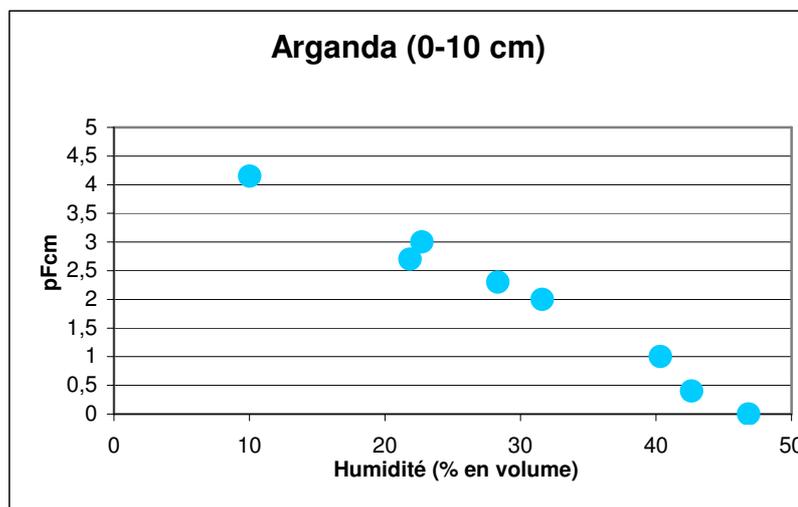


Figure 7: Représentation des valeurs de rétention d'eau de la couche 0 à 10 cm

➤ **Sol de 20 à 30 cm**

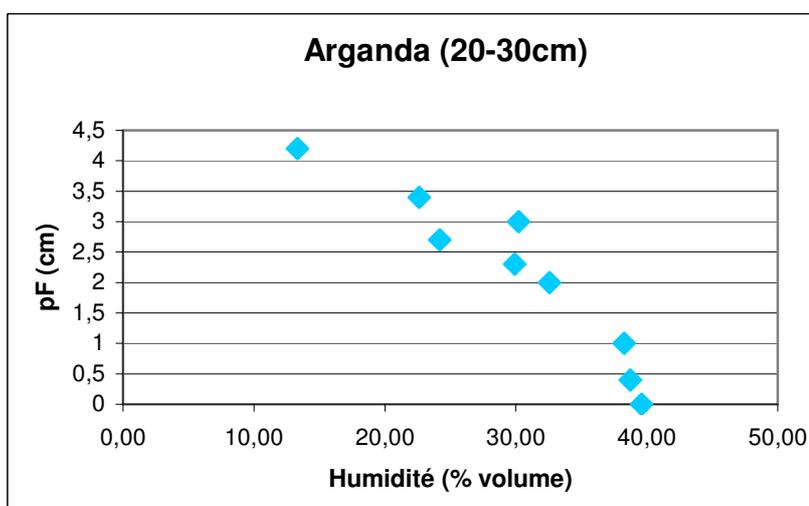


Figure 8 : Représentation des valeurs de rétention d'eau de la couche 20 à 30 cm

Voir **Annexe 2** : Tableau de valeurs des courbes de rétention

Nous avons représenté simplement les valeurs d'humidité obtenues en fonction de la pression appliquée. A l'heure actuelle aucun modèle mathématique n'a été choisi pour caler ces courbes et obtenir les courbes caractéristiques de ces sols.

Ces courbes caractéristiques des sols situés entre 0 et 10cm et 20 et 30cm permettront de connaître le comportement de l'eau dans ces matériaux.

## 2) Essais d'infiltration à charge constante

Voir **Annexe 3** : Graphique des essais d'infiltration à charge constante aux différentes profondeurs.

A partir de la méthode de Wu et al. 1999, présentée plus haut, (voir p.18), nous avons pu estimer des valeurs de conductivité hydraulique à saturation ( $K_s$ ) en cm/h. (Voir Tableau 5).

Profondeur	Superficie	20 cm	40 cm	75 cm	160 cm
Essai 1	1,63	1,05	0,64	3,10	7,73
Essai 2	1,49	0,69			
Essai 3	0,80	0,43			
Essai 4	0,40				
Essai 5	1,52				
<b>Ks Moyen (cm/jr)</b>	<b>1,17</b>	<b>0,72</b>	<b>0,64</b>	<b>3,10</b>	<b>7,73</b>
<b>Ks Moyen (m/s)</b>	<b>3,2E-06</b>	<b>2,0E-06</b>	<b>1,8E-06</b>	<b>8,6E-06</b>	<b>2,1E-05</b>

Tableau 5 : Estimation du  $K_s$  par la méthode de Wu

Ainsi nous pouvons remarquer que la zone superficielle de la ZNS a une perméabilité bien moins importante que les couches plus profondes ce qui vérifie notre analyse texturale : argile grossière et sable limoneux en superficie et sable en profondeur.

Par ailleurs nous observons que la valeur de conductivité hydraulique à saturation en superficie est relativement hétérogène. La couche superficielle de cette parcelle est un matériel labourée dont les propriétés physiques varient notablement. En effet à la suite d'une pluie cette couche superficielle forme une sorte de croûte de battance et cette compaction modifie quelque peu la conductivité hydraulique.

Pour conclure ces premières analyses il est intéressant de comparer les valeurs de conductivité hydraulique à saturation obtenues au laboratoire et sur le terrain, (voir tableaux 6a et 6b).

En résumé, nous avons pour le perméamètre de laboratoire :

Profondeur	K (m/s)
0 - 10 cm	4,8E-05
20 - 30 cm	7,9E-07

Tableau 6 a: Valeurs de conductivité hydraulique à saturation obtenues avec le perméamètre de laboratoire

Et pour les essais d'infiltration :

Profondeur	K (m/s)
Superficie	3,2E-06
20 cm	2,0E-06
40 cm	1,8E-06
75 cm	8,6E-06
160 cm	2,1E-05

Tableau 6 b: Valeurs de conductivité hydraulique à saturation obtenues avec les essais d'infiltration

Nous pouvons comparer uniquement les valeurs obtenues pour le premier sol c'est à dire de 0 à 30 cm. Les conductivités hydrauliques à saturation obtenues sont dans le même ordre de grandeur dans les deux cas. De plus elles correspondent effectivement aux valeurs de conductivité hydraulique que l'on peut rencontrer dans la littérature pour une argile grossière ( $10^{-7}$  m/s).

Il est à noter que la méthode de détermination de la conductivité hydraulique à saturation par le perméamètre de laboratoire est plus précise car effectuée en laboratoire mais celle par les essais d'infiltration sur le terrain reste plus fiable car elle s'effectue à plus grande échelle donc elle est plus représentative de l'ensemble de la formation.

### 3) Traçage par aspersion

A l'heure actuelle, nous avons reçu seulement les résultats du prélèvement effectué à T0, T1 et T2.

#### a) Analyse granulométrique

Le suivi du traceur ne s'effectuant pas exactement au même endroit à chaque prélèvement, une analyse granulométrique texturale est réalisée afin de vérifier la représentativité de nos résultats, (voir tableau 7).

N° du test	Profondeur (cm)	Sable grossier %	Sable fin %	Argile %	Limon %	Texture
T 0	0-30	2,47	38,94	28,68	29,91	Argile grossière
T 0	30-105	2,08	55,34	22,38	20,19	Sable argileux
T 0	105-140	32,26	39,50	18,08	10,16	Sable limoneux
T 0	140-195	81,14	7,67	10,27	0,93	Sable
T 1	0-30	2,21	38,79	29,31	29,68	Argile grossière
T 1	30-100	0,93	60,65	20,96	17,46	Sable argileux
T 1	100-150	38,10	30,66	17,52	13,73	Sable limoneux
T 1	150-195	84,84	5,96	8,65	0,56	Sable
T 2	0-30	2,58	39,09	28,86	29,48	Argile grossière
T 2	30-110	1,56	67,61	18,81	12,02	Sable argileux
T 2	110-145	31,86	37,82	17,26	13,07	Sable limoneux
T 2	145-200	77,95	12,34	9,33	0,37	Sable

Tableau 7 : Analyse granulométrique et texturale

Les résultats ont été représenté sur un triangle des textures :

Voir **Annexe 3 : Triangle des textures**

Ainsi nous pouvons voir que notre parcelle est relativement homogène horizontalement d'un point de vue textural car nous retrouvons la même classification d'une maille à l'autre. De plus nous retrouvons la même classification qui a été réalisée avec les échantillons de sol prélevés sur le terrain aux différentes profondeurs. (voir p.26).

### b) Analyse chromatographique

Les résultats de l'analyse chromatographique a été représenté sur le graphique suivant : Voir figure 10.

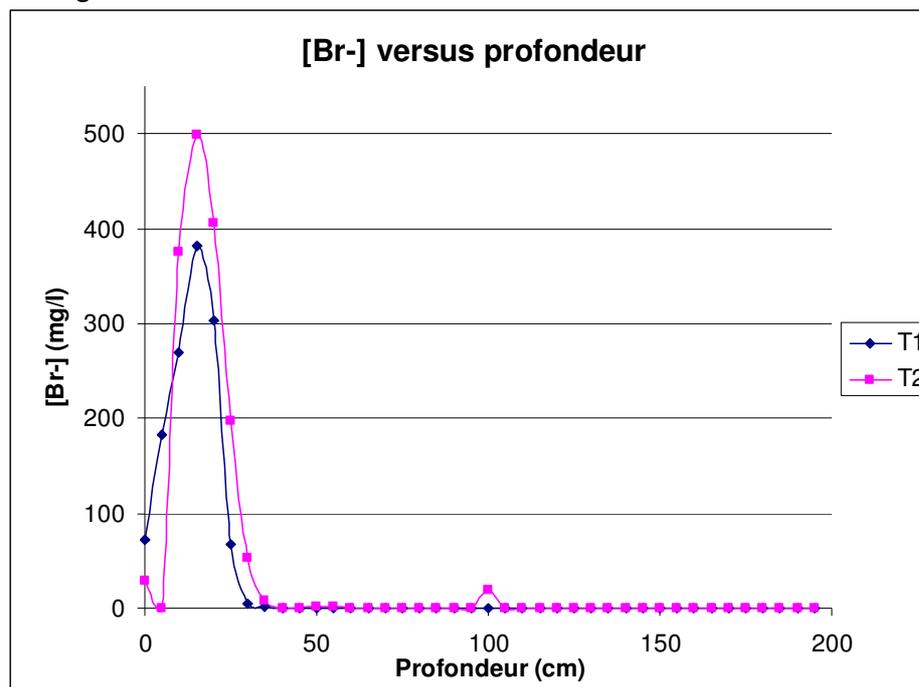


Figure 9 : Evolution de la concentration en bromure en fonction de la profondeur

Voir **Annexe 4 : Tableaux de valeurs des analyses chromatographiques.**

Le graphique de la figure 10 représente la concentration en ions bromure rencontrée dans chacun des échantillons c'est à dire en fonction de la profondeur et permet de voir où se trouve le traceur. Nous pouvons remarquer que le pic de concentration en bromure de potassium se situe environ à la même profondeur pour les deux analyses alors que les prélèvements correspondants ont été fait à 4 mois de différence. Bien que le front d'avancement en T2 se trouve légèrement plus tard, nous rencontrons le maximum du traceur entre 15 et 20 cm de profondeur pour les deux analyses.

Deux facteurs peuvent expliquer cette évolution.

Dans un premier temps, il est important de prendre en compte la forte évaporation qui implique que l'avancement du traceur s'effectue uniquement lorsque la pluie est suffisamment importante. Le graphique de la figure 10, donnent les données de pluies qui se sont produites depuis le début de l'essai de traçage.

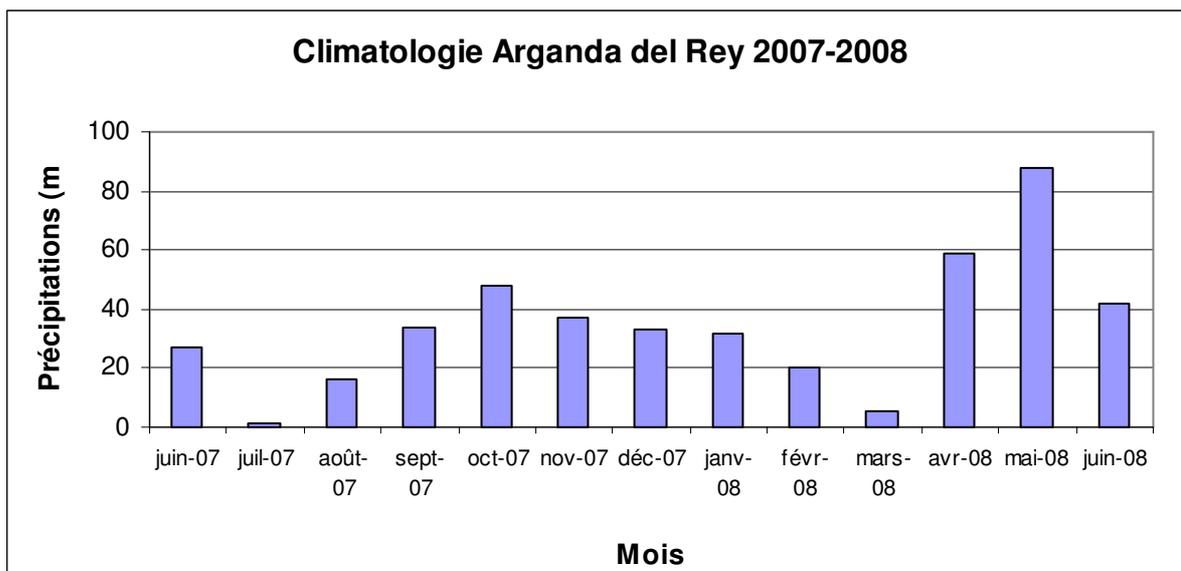


Figure 10 : Données de précipitations Arganda del Rey (Juin 2007 - Juin 2008)

Ce graphique montre qu'il y a eu une période relativement sèche au début de l'essai de traçage, puis des pluies plus importantes pour les mois de septembre et octobre 2007. Le premier prélèvement a été réalisé à la fin du mois d'octobre 2007. Ceci permet de relever que le traceur a été entraîné par ces premières pluies. Les mois qui suivent présentent des précipitations mensuelles similaires à celle du mois de septembre ce qui aurait pu permettre au traceur de continuer sa progression. Il est important de noter qu'il est représenté sur ce graphique seulement les précipitations mensuelles ; les précipitations journalières pourraient nous fournir surement des explications plus précises. Le traceur n'est pas entraîné de la même manière s'il pleut un peu pendant plusieurs jours consécutifs ou s'il pleut beaucoup pendant un seul jour, le bilan hydrique varie.

D'autre part cette profondeur correspond à la profondeur approximative de changement de faciès, nous passons d'un type de sol argile grossière à un sable argileux ainsi il est possible que le traceur mette plus de temps à franchir cette couche.

Cette première observation nous permettra de calculer une vitesse approximative de progression de traceur.

Par ailleurs, nous remarquons sur la figure 10 que lors des analyses de T2, un 2<sup>ème</sup> pic de bromure apparaît vers 100cm de profondeur, (voir figure 9). Nous pouvons considérer que ce pic est, soit une erreur d'analyse ou une contamination de l'échantillon, soit un chemin préférentiel qui laisse apparaître du bromure à cette profondeur. Nous négligerons cette observation dans la suite de nos explications.

## c) Conductivité électrique

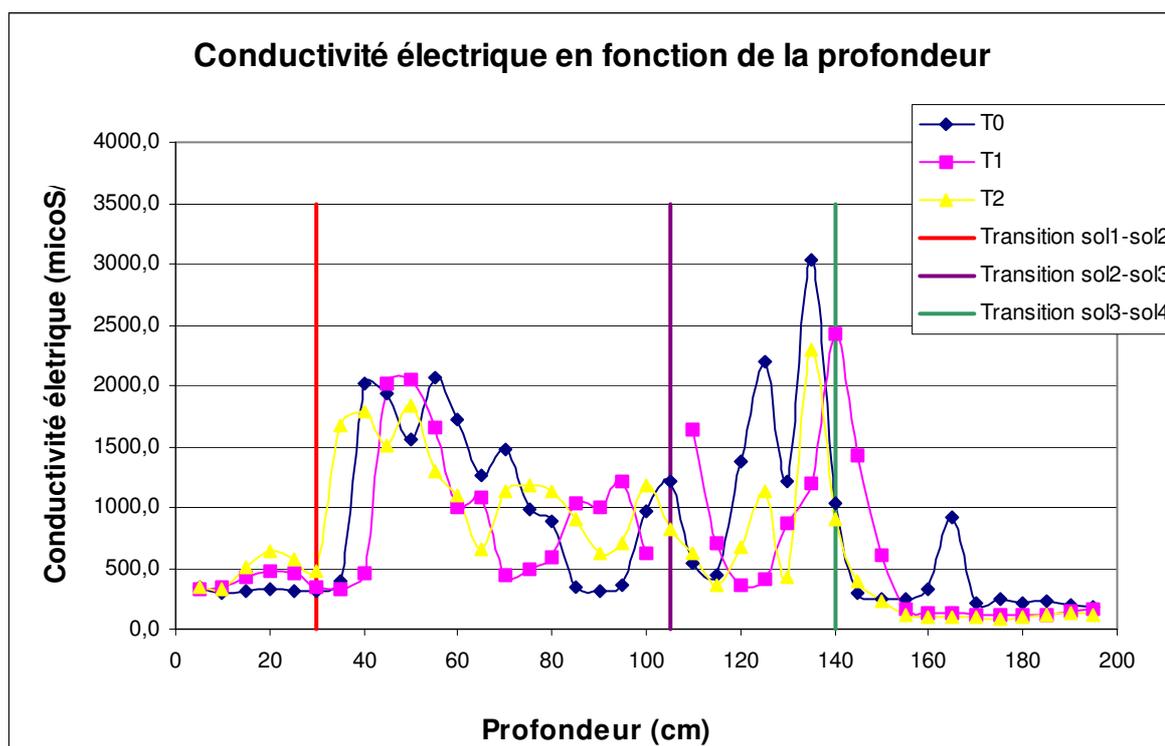


Figure 11: Evolution de la conductivité électrique en fonction de la profondeur

Voir **Annexe 6** : Tableau de valeurs de la conductivité électrique

La conductivité électrique naturelle de chacun des sols est mise en évidence par la courbe T0 bleue, (voir figure 11). Les barres verticales représentent la profondeur de la transition entre chaque type de sol. La présence du traceur est mise en évidence par une augmentation de cette conductivité électrique naturelle. Ainsi nous remarquons que le traceur se situe dans les environs des 15cm ce qui vérifie les résultats obtenus par analyses chromatographiques. Lors du deuxième prélèvement, le traceur se situe encore dans la première formation.

Il est important de noter que la mesure de la conductivité électrique peut donner la position approximative ou vérifier la position du traceur donnée par d'autres analyses mais en aucun cas être la seule technique de suivi. L'analyse chromatographique fournit des résultats bien plus fiables.

Les valeurs de la densité apparente pour chacun des prélèvements sont visibles en **Annexe 7** : Tableau de valeurs de la densité apparente. Elles permettent d'observer que les différents sols se situent toujours aux mêmes profondeurs d'un prélèvement à l'autre.

#### d) Estimation d'un temps de transit

Les différents résultats obtenus au laboratoire vont nous permettre d'estimer une valeur de la vitesse de progression de notre traceur dans la ZNS et ainsi un temps de transit jusqu'aux eaux souterraines.

$$V = \text{Prof. du pic de traceur (m)} / \text{Temps (jours)}$$

Avec les résultats du premier prélèvement :

$$V1 = 0.15/122 = 1.23 \text{ mm/jr.}$$

Avec les résultats du deuxième prélèvement:

$$V2 = 0.15/244 = 0.61 \text{ mm/jr.}$$

Par ailleurs en juin 2008 le niveau de la nappe phréatique était à environ 6m de profondeur, ainsi nous pouvons estimer approximativement le temps de transit de notre traceur jusqu'aux eaux souterraines, à partir des observations réalisées jusqu'à maintenant.

Si nous prenons une vitesse moyenne de 1mm/jr,  
 $T = 6000 \text{ jours} \approx 16 \text{ ans.}$

Mais ceci n'est seulement qu'une approximation car il faudra bien sur prendre en compte la variation de la vitesse avec la profondeur, qui normalement devrait accélérer étant donné le type de matériau et le résultat donné par le modèle.

Ainsi les différentes campagnes réalisées sur le terrain et les résultats des premières analyses de laboratoire nous ont permis d'amorcer la caractérisation physique et hydraulique de la ZNS de notre site d'étude.

Bien que très importantes dans un premier temps, les expérimentations de terrain sont souvent longues et limitées. De plus, les analyses de terrain sont ponctuelles dans le temps et dans l'espace ce qui implique qu'elles ne pas représentatives de l'ensemble du site d'étude.

Dans la suite de cette étude, nous avons tenté de modéliser à l'aide du programme VS2DT, cette ZNS à partir des divers résultats recueillis. Ce modèle de simulation nous permettra d'accélérer l'aquisition des données concernant cette ZNS et notamment le temps de transit jusqu'à la nappe d'eau souterraine.

## v) Modélisation du flux en zone non saturée

Après une introduction théorique au flux en ZNS, nous présenterons le modèle de simulation mis en place puis nous procéderons à une optimisation du modèle.

### 1) Introduction théorique au flux en ZNS

L'objectif de cette brève introduction est de mettre en évidence la difficulté que présente la caractérisation hydraulique de la ZNS. La première des relations d'hydrodynamique a été proposée par Darcy en 1856 et étendue aux milieux non saturés.

$$Q = -K(\theta, z) \frac{dH}{dz}$$

où :

- $Q$  = Flux d'eau qui traverse une section donnée en une unité de temps donnée ( $LT^{-1}$ ).

- $K$  = Conductivité hydraulique (cm/h)

Elle exprime la capacité du sol à transmettre l'eau suivant son état de saturation mesuré par  $\theta$  ou  $\Psi$ . La conductivité est maximale à saturation ( $K_s$ ).

- $\theta$  = teneur en eau volumique ( $cm^3/cm^3$ )

C'est une variable adimensionnelle qui donne le pourcentage volumique de sol occupé par l'eau.

- $z$  = profondeur du sol (cm).

- $H$  = charge hydraulique (cm)

Elle est égale à la somme du potentiel gravitaire et du potentiel de pression hydrostatique mesuré par la tension  $\Psi$  (on néglige les potentiels chimique, osmotique et d'adsorption).  $H = y - z$ .

La tension hydraulique  $\Psi$  mesure l'état énergétique et traduit la plus ou moins grande saturation du sol en eau. Elle est donc faible dans les sols saturés et augmente dans les sols secs. C'est une grandeur négative exprimée en cm d'eau.  $H$  mesure l'énergie potentielle totale de l'eau dans le sol à l'instant  $t$  à la profondeur  $z$ .

- $dH/dz$  = gradient de charge hydraulique

Il permet de déterminer le sens de déplacement des flux hydriques lors de l'exploitation des données des tensiomètres. Il s'exprime en mm d'eau ou en Pa.

Si la conductivité  $K$  est connue, les flux hydriques tels que les remontées capillaires et le drainage peuvent être déduits en mesurant les paramètres de l'équation de Darcy à l'aide de tensiomètres et d'humidimètres.  $\Theta$ ,  $K$  et  $\Psi$  sont liés par les relations caractéristiques du milieu :

1. La courbe de rétention  $\theta(\psi)$  lie la teneur en eau volumique à la tension hydrique et exprime la capacité du sol à retenir l'eau en fonction de la succion exercée. Grâce à elle, il est possible de connaître les humidités volumiques correspondant aux données tensiométriques (et vice-versa). C'est une grandeur macroscopique fondamentale en physique du sol car elle exprime l'influence de la structure, de la porosité et de l'adsorption sur l'état de l'eau du sol.
2. La courbe de conductivité hydraulique  $K(\psi)$  ou  $K(\theta)$  caractérise la capacité du milieu à transmettre l'eau en fonction de son état énergétique ou de son état de saturation.

Cependant il n'existe pas une relation universelle entre la conductivité hydraulique et le contenu en eau.

De nombreux auteurs ont proposés des expressions qui relient ces différents paramètres.

Nous avons choisi l'expression proposée par Van Genuchten qui lors des expériences antérieures a démontré être la meilleure dans ces conditions expérimentales

$$K(\theta) = K_s * S^{1/2} [1 - (1 - S^{1/m})^m]^2$$

$K(\theta)$  = est la conductivité hydraulique non saturée

$K_s$  = conductivité hydraulique à saturation

Avec  $S = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$

$\Theta$  : Humidité du sol

$\Theta_r$  : Humidité résiduelle du sol

$\Theta_s$  : Humidité à saturation du sol

$m = 1 - 1/n$  ( $m$  et  $n$  = constantes empiriques).

Comme nous l'avons expliqué antérieurement, l'objectif ici est de prévoir le comportement des particules dans la ZNS, grâce à un modèle mathématique qui s'appuie sur les équations décrites, ce qui demande une connaissance des variables impliquées dans ces équations.

Il est important de mettre en évidence les inconvénients majeurs de cette modélisation :

➤ **L'hétérogénéité du milieu.**

Ce problème peut être abordé selon deux perspectives. D'une part la statistique permet de déterminer puis d'optimiser le nombre d'échantillon nécessaire pour obtenir suffisamment de données fiables. D'autre part, les techniques analytiques doivent correspondre à l'échelle de travail et à l'échelle des hétérogénéités, et spécialement pour la détermination, par exemple, de la perméabilité qui se réalise sur des échantillons inaltérés avec des cylindres calibrés de petits diamètres.

➤ **La difficulté pour caractériser physiquement la matrice poreuse à cause de la demande importante de moyens humain et matériel.**

Ainsi la faible fréquence de mesure des paramètres comme la porosité, la capacité au champ, l'humidité en condition de saturation, la réserve hydrique, etc..., s'emploient comme paramètres d'ajustement ou de calibration alors qu'en réalité ils devraient être mesurés. Leur valeur est considérée comme immuable et donc comme caractéristique physique du système étudié.

## **2) Fonctionnement du programme VS2DTI 1.2 : les différentes étapes de la construction**

Afin de modéliser le transport de solutés dans la ZNS où est réalisé l'épandage des boues de stations d'épuration, nous allons utiliser le programme VS2DTI. C'est un programme qui simule le flux d'eau et de soluté en deux dimensions, tant en zone saturée que non saturée.

VS2DTI compte 3 composantes :

- Un préprocesseur pour la création d'un modèle de simulation,
- Un modèle numérique, VS2DT 1.2, pour le calcul du flux et transport,
- Un postprocesseur pour visualiser les résultats de la simulation.

### **a) Les options du modèle**

*Les options basiques* : les unités spatiales, temporelles, de masse, et le type de simulation que nous allons réaliser (transport, évaporation, transpiration,...)

*Les options du flux* : conditions initiales à appliquer (humidité, charge, état d'équilibre) et l'équation de flux à utiliser (équation de Van Genuchten).

## **b) Le modèle**

### ➤ Domaine et conditions environnantes

La construction du domaine permet de délimiter dans l'espace notre zone de travail (modèle), dans laquelle nous allons simuler un flux. Grâce à ces conditions de contours, se définit, le comportement des limites du domaine et leur relation avec l'environnement extérieur.

### ➤ Classes texturales

Elle détermine la distribution spatiale des différentes textures observées sur le terrain.

Elles sont définies entre autre par la saturation, la porosité, les coefficients empiriques de l'équation de flux choisie (Van Genuchten) qui dépendent des matériaux que nous avons dans chaque couche.

### ➤ Conditions initiales

Selon ce qu'on a choisi dans les options, nous devons introduire les valeurs correspondantes : état d'humidité, de pression, d'équilibre,...

### ➤ Périodes de recharge (boundaries conditions)

Elles se réfèrent aux conditions environnantes variables. Il peut être imposé par exemple, une entrée d'eau (pluie, inondation) durant une période donnée. Ainsi nous affectons des caractéristiques et un flux à chacune des limites du modèle.

### ➤ Maille (grid)

Elle sert à la discrétisation spatiale du système.

### ➤ Points d'observation

Cet outil permet de sélectionner des points précis où nous voulons observer l'évolution des paramètres variables comme l'humidité, la pression ou la concentration d'un soluté.

## **c) Post processeur**

La visualisation des résultats de la simulation dans le temps ou dans l'espace. Par exemple, il est possible de visualiser l'évolution d'un des paramètres (humidité, saturation,...) en fonction du temps en un point précis du système.

## **3) Construction du modèle de simulation d'un flux**

Le modèle a été construit de telle sorte qu'il corresponde au maximum à la réalité. Le programme donne une représentation de la ZNS en deux dimensions. Mais, seulement la valeur de la profondeur est importante dans ce cas présent car nous nous intéressons seulement à l'estimation d'un temps de transit vertical. Dans un premier temps nous allons simuler seulement un flux traversant la ZNS en prenant en compte le bilan hydrique c'est à dire, les précipitations et évaporation.

### a) Les options du modèle

Les dimensions spatio-temporelles du modèle que nous avons choisies : cm, jour, mg.

Nous avons sélectionné la fonction qui nous permet de simuler l'évaporation ainsi que l'équation de flux que nous voulons utiliser, à savoir ici celle de Van Genuchten. Nous avons également choisi d'observer le comportement de ce flux à l'aide de la variation de l'humidité. En effet dans cette modélisation, tous nos résultats seront interprétés à partir de la variation de l'humidité. Considérant dans un premier temps, que notre traceur se déplace dans la ZNS à la même vitesse que l'eau, nous pourrons ainsi suivre sa progression et estimer le temps de transit jusqu'à la nappe.

### b) Le modèle

#### ➤ Domaine :

La largeur n'étant pas importante, nous avons construit une parcelle de 3,2m de large et 2m de profondeur ce qui correspond à la hauteur de la carotte de prélèvement.

#### ➤ Les classes texturales :

Le domaine a été divisé en 4 couches afin de représenter les différents matériaux observés sur notre site d'étude.

- 0-30cm : Argile grossière
- 30-105cm : Sable argileux
- 105-140cm : Sable limoneux
- 140-195cm : Sable

Les caractéristiques physiques connues de ces couches, ont été introduites directement dans le modèle :

- **K<sub>hh</sub>/K<sub>zz</sub>** : Ce rapport représente la valeur de l'isotropie. L'isotropie caractérise l'invariance des propriétés physiques d'un milieu en fonction de la direction. Le contraire de l'isotropie est l'anisotropie.

N'ayant pas relevé sur le terrain des conditions structurales qui indiquent une anisotropie significative, nous considérons le milieu isotrope, ce rapport est donc égal à 1.

- La conductivité hydraulique à saturation **K<sub>s</sub>** déterminée à partir des essais d'infiltration réalisés sur le terrain et en se basant sur la méthode de Wu et al/ 1999 décrite ci-dessus. (Voir tableau 8).

- **La porosité** : valeurs caractéristiques de ce type de sol. Etant donnée que nous avons pas eu le temps d'analyser les échantillons de sol à toutes les profondeurs, il n'a pas été possible d'introduire dans le modèle les valeurs réelles de porosité. Nous avons donc attribuer à chacune de nos formations la valeurs que nous fournis le programme pour le type de sol correspondant. Ces valeurs sont des valeurs empiriques. (Voir Tableau 8).

- Et les autres caractéristiques inconnues comme les constantes de l'équation de Van Genuchten m et n, qui dans le modèle sont nommés  **$\alpha$  et  $\beta$** , ou la valeur de

l'humidité résiduelle (**RMC** : Residual Moisture Content) ont été calculées à partir de Rosetta. Rosetta est un programme informatique simple développé pour déterminer ces paramètres. Il a été développé uniquement pour ce calcul. (Voir Tableau 8).

Type de sol	Profondeur (cm)	Kzz/Khh	Ks (cm/jr)	Porosité	RMC	$\alpha$	$\beta$
<b>Argile grossière</b>	0-30	1	17,34	0,2	0,0404	0,022	1,346
<b>Sable argileux</b>	30-105	1	15,41	0,38	0,0687	0,018	1,434
<b>Sable limoneux</b>	105-140	1	74,5	0,39	0,0625	0,026	1,487
<b>Sable</b>	140-195	1	185,62	0,377	0,0615	0,028	1,346

*Tableau 8 : Valeurs des paramètres introduits dans le modèle*

Il est important de noter que les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  proposés par le programme Rosetta correspondent à ceux qui seront employés dans la calibration finale du modèle.

➤ Conditions initiales

La condition initiale choisie pour le modèle est l'humidité. Nous avons appliqué une humidité initiale de 20% sur l'ensemble de notre modèle, qui est considérée comme l'humidité moyenne représentative de la surface du site d'étude sur l'ensemble de l'année. En effet l'humidité est mesurée avec une sonde TDR lors de chacune des campagnes de terrain réalisées.

Afin de se rapprocher au maximum des conditions réelles, nous avons laissé le modèle évoluer pendant 30 jours de manière à ce qu'il se produise une distribution de l'humidité sur l'ensemble de la ZNS.

➤ Périodes de recharge

Etant donné que nous avons à notre disposition l'ensemble des données climatologiques journalières du village d'Arganda del Rey, il nous a été possible d'introduire, dans les conditions aux limites de notre modèle, les données des précipitations qui se sont produites depuis le début de notre essai de traçage. Pour simplifier l'introduction des données, nous avons additionné le nombre de jours de pluie consécutifs et attribuer la somme des précipitations correspondante en alternant avec la somme des jours sans pluie. Mais il est important de noter que cette simplification va sans aucun doute entraîner des erreurs notables dans la simulation. En effet de la même manière que nous l'avons expliqué plus haut lors de l'exploitation de l'analyse chromatographique, (voir p.32), l'effet sur le sol n'est pas le même quand il pleut peu pendant plusieurs jours et quand il pleut l'équivalent en une seule journée.

*Voir Annexe 8 : Tableau des précipitations journalières d'Arganda del Rey.*

En plus de ces données, nous avons aussi tenté d'introduire les valeurs de l'évapotranspiration mensuelle calculée à partir de la formule de **Thornthwaite**.

La formule de Thornthwaite, déjà ancienne (1944), est basée sur de nombreuses expériences. L'évaporation potentielle est donnée par la formule:

$$(ETP) = C t^a, (1)$$

où:

*ETP* est l'évapotranspiration mensuelle en centimètres pour un mois fictif de 30 jours et une durée théorique d'ensoleillement de 12 h sur 24;

*t* est la température moyenne en °C pour le mois considéré;

*C* et *a* sont des fonctions de l'indice thermique annuel.

*a* est calculé à partir d'un indice thermique mensuel donné par la formule:

$$i = \left( \frac{t}{5} \right)^{1.514}$$

Si l'on appelle *I* l'indice annuel égal à la somme des 12 indices mensuels et en adoptant certaines simplifications, la valeur de *a* est donnée par l'expression:

$$a = \frac{1.6}{100} I + 0.5$$

Le terme *C* varie en sens inverse de *I* et en définitive l'équation peut s'écrire:

$$(ETP) = 1.6 \left( 10 \frac{t}{I} \right)^a$$

En coordonnées logarithmiques, les courbes représentatives de cette dernière équation sont des droites correspondantes à des lieux et des climats différents.

Afin de réaliser le bilan hydrique, le modèle nécessite également la pression potentielle atmosphérique *HA*, que nous pouvons calculer de la manière suivante :

$$HA = R * T * (\ln (ha) / (Mw * g))$$

Avec,

*HA* en m

*R* : Constante des gaz universel, *R* = 8,31 J/K/mol

*T* : Température en K

*ha* : Humidité relative de l'atmosphère, sans unité

*Mw* : Masse moléculaire de l'eau, *Mw* = 18 g/mol

*g* : Accélération de la pesanteur, *g* = 9.81 N/k.

*Voir Annexe 9 : Tableau de valeurs de l'ETP estimée par Thornthwaite et de la Pression potentielle atmosphérique*

Pour les derniers mois nous n'avons pas les valeurs mais nous avons introduit les même valeurs que les mois d'été précédents afin d'observer un cycle annuel complet.

➤ Maille

La discrétisation que nous avons appliquée correspond à une taille de cellule de 5cm x 5cm car notre carotte de prélèvement est un tube d'environ 5cm de diamètre qui est ensuite coupé tous les 5cm.

➤ Points d'observation

Nous avons placé un point d'observation à 15cm de profondeur car c'est à peu près à cette profondeur que nous avons observé le pic de concentration du traceur lors des analyses chromatographiques et un autre à 40cm afin d'établir une prévision de la progression du traceur plus en profondeur.

c) Post processeur

La simulation ayant été réalisée, nous pouvons utiliser désormais les résultats obtenus afin d'observer l'évolution de l'humidité au cours du temps.

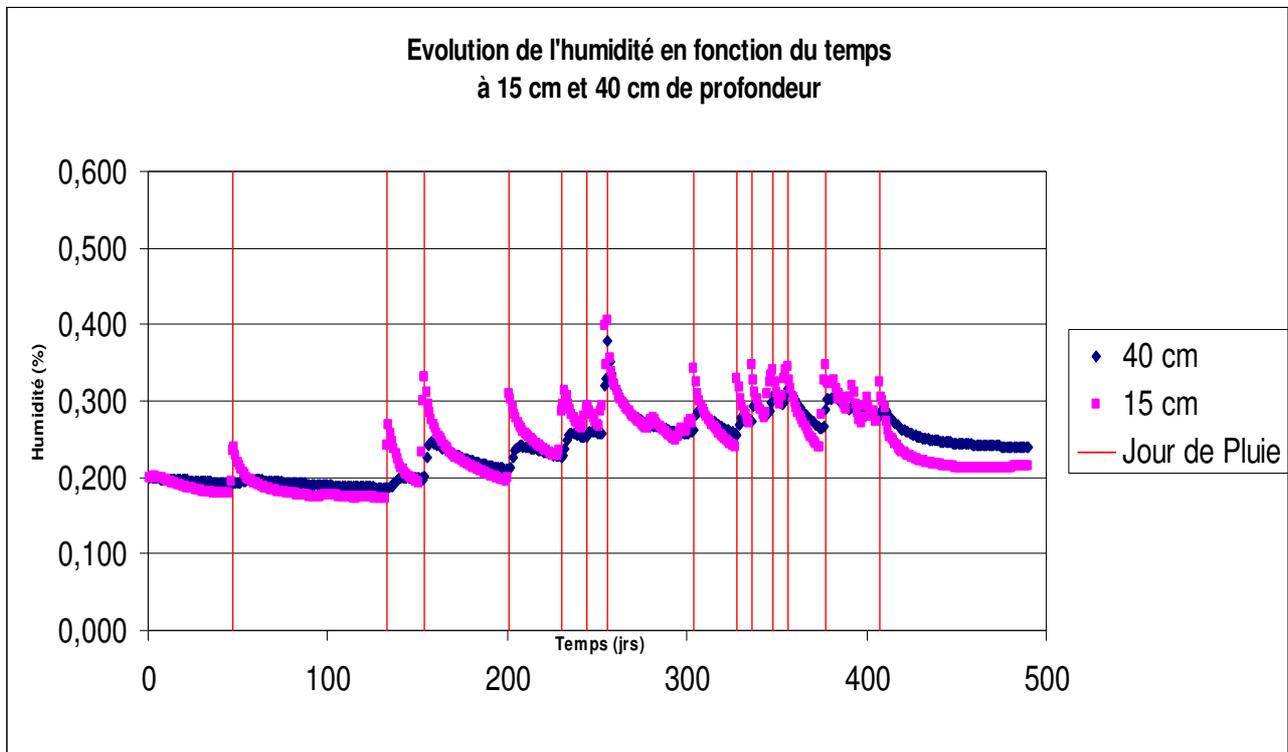


Figure 12: Exploitation des résultats de la simulation

Si nous considérons qu'un soluté se déplace à la même vitesse que l'eau dans la ZNS, nous pouvons estimer un temps de transit avec le temps que met la valeur de l'humidité à augmenter après une pluie, c'est à dire le temps de réponse à une pluie. Chaque pic du graphique correspond à une augmentation subite d'humidité donc à une réponse à une pluie.

## 4) Estimation d'un temps de transit à partir du postprocesseur

L'estimation du temps de transit est réalisée à partir des résultats obtenus grâce aux points d'observation.

Jour de pluie	Jour de réponse à 15 cm	Temps de réponse (jours)	Réponse à 40 cm	Temps de réponse (jours)	Vitesse cm/jr
47	48	1	54	7	5,7
133	134	1	142	9	4,4
154	154	0	158	4	10
201	201	0	207	6	6,6
230	232	2	236	6	6,6
244	244	0	247	3	13,3
256	256	0	256	0	
304	304	0	306	2	20
328	328	0	331	3	13,3
336	336	0	338	2	20
348	348	0	349	1	40
356	356	0	357	1	40
377	377	0	382	5	8
407	407	0	408	1	40

Tableau 9 : Estimation de la vitesse de transit

Nous pouvons observer que la réponse à 15cm de profondeur est pratiquement instantanée, ce qui est impossible réellement, et que les valeurs de vitesse de transfert de flux que nous avons pu calculer entre la surface et 40cm de profondeur sont aussi bien supérieures à la réalité. Les résultats obtenus jusqu'à ce jour avec l'essai de traçage, nous ont permis d'estimer un temps de transit jusqu'à la nappe d'environ 16 ans (voir p.36), ce qui est très supérieures aux valeurs calculées dans ce cas de simulation.

A ce stade, du développement, nous pouvons considérer que notre modèle fonctionne en ce qui concerne les propriétés physiques que l'on a pu introduire mais que nous ne pouvons pas estimer un temps de transit seulement en nous basant sur l'évolution de l'humidité car notre traceur ne se déplace effectivement pas, vu les résultats, à la même vitesse que l'eau.

Ainsi la suite de notre travail va consister en une amélioration puis une optimisation de notre modèle.

## 5) Amélioration du modèle

### a) Précision des options et paramètres

Pour tenter d'optimiser notre modèle, c'est-à-dire de se rapprocher au mieux de la réalité, nous avons ajouté la simulation d'un transport de soluté correspondant à notre traceur, en introduisant une masse initiale de 100mg sur la superficie de la parcelle. Comme nous l'avons remarqué précédemment, notre soluté ne se déplace effectivement pas à la même vitesse que l'eau. En effet ceci est dû au fait que d'autres paramètres entrent en jeu et notamment la dispersivité longitudinale et transversale de chaque type de sol.

Les valeurs de dispersivités longitudinale et transversale n'ayant pas encore été mesurées sur le terrain, nous utilisons des valeurs empiriques répertoriés dans une publication scientifique du Ground Water écrite par Schulze-Makuch, D. (2005) (voir tableau 10). Ainsi nous pouvons ajouter au modèle le transport d'un soluté d'une concentration donnée et assigner aux deux premières couches (celles étudiées pour le moment) une valeur approximative de dispersivité longitudinale et transversale et un coefficient de diffusion moléculaire empiriques. En effet nous avons choisi dans cette publication les valeurs des sols qui étaient les plus semblables aux nôtres. L'introduction de ces différents paramètres permettra de modéliser plus efficacement le comportement réel.

	Dispersivité longitudinale	Dispersivité transversale
Argile grossière	1	0,1
Sable argileux	1	0,1

Tableau 10 : Valeurs de dispersivité longitudinale et transversale. Schulze-Makuch, D. (2005).

### b) Simulation

Désormais, avec la présence du traceur, nous pouvons visualiser la progression de celui-ci dans la parcelle lors de la simulation à partir de l'évolution de la concentration en soluté en fonction de la profondeur.

Afin de pouvoir suivre en parallèle la simulation et notre essai de traçage effectué sur le terrain, nous avons réalisé des arrêts au cours de la simulation correspondants aux dates des prélèvements.

Ainsi, nous pouvons visualiser la position de notre traceur,

- 30 jours après le début de la simulation c'est-à-dire au début de notre essai. Ces 30 jours correspondent à une période de stabilisation du système. (voir figure 13).

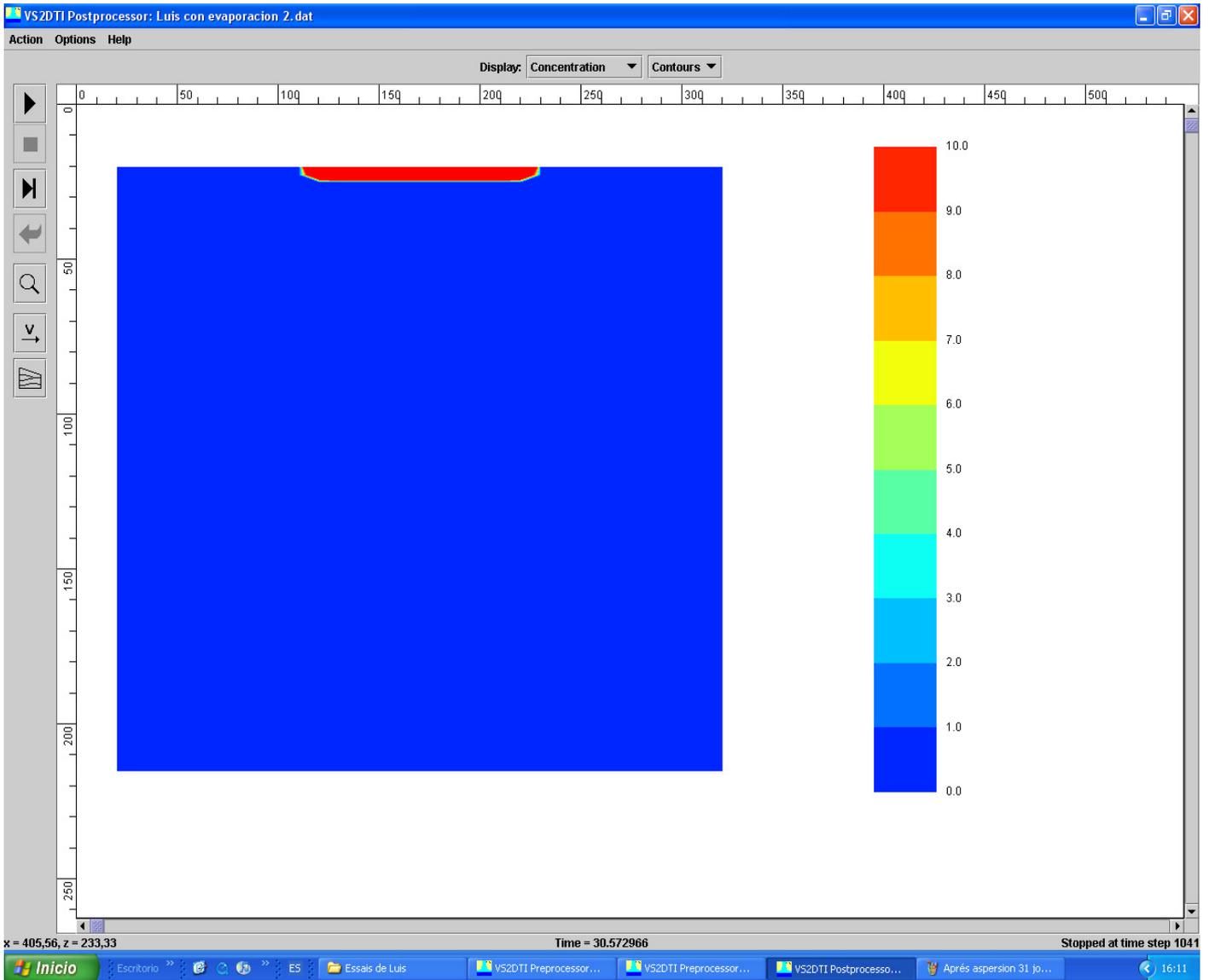


Figure 13 : Aperçu de la simulation du traçage à T0

- 152 jours après le début de la simulation, date correspondante, au premier prélèvement (T1). (voir figure 14).

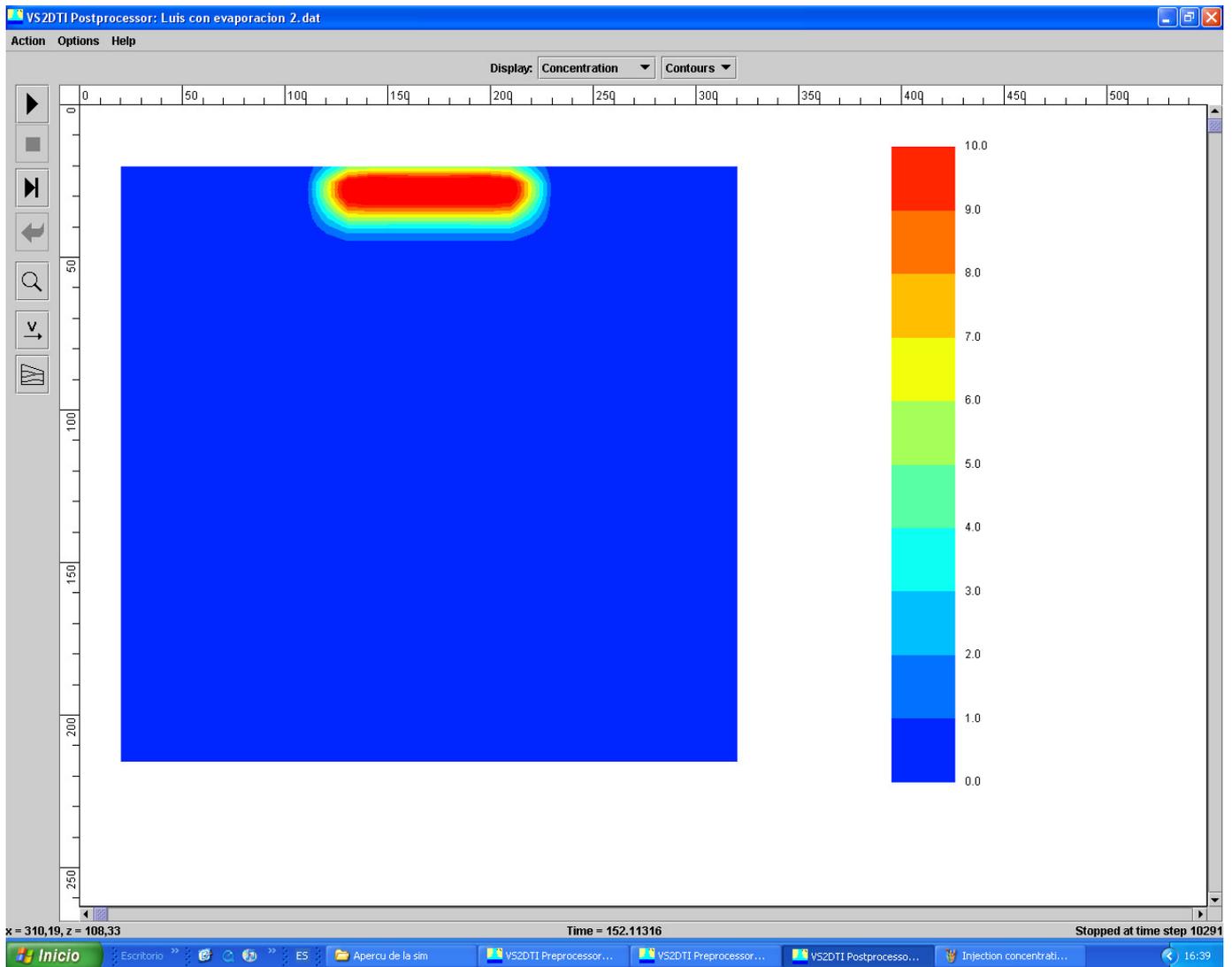


Figure 14: Aperçu de la simulation du traçage à T1

- 264 jours après le début de la simulation, date correspondante, au deuxième prélèvement (T2). (voir figure 15).

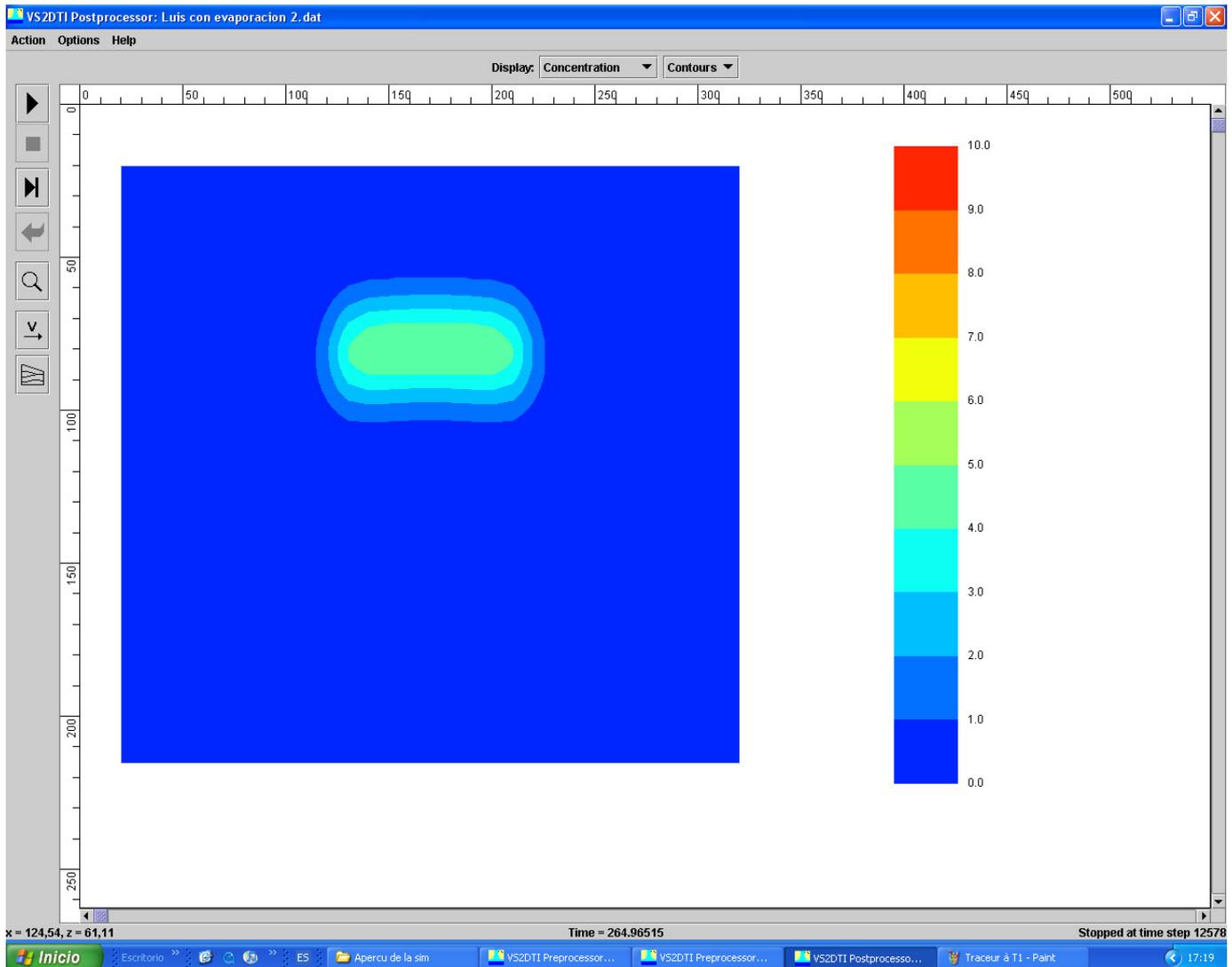


Figure 15 : Aperçu de la simulation du traçage à T2

Ainsi nous pouvons voir le traceur évoluer en fonction du temps et du bilan hydrique (pluie et évaporation).

Une différence importante peut être observée entre l'essai de traçage réalisé par le modèle et celui réalisé sur le terrain, la progression du traceur. Les résultats obtenus pour l'essai de terrain, nous a montré que le traceur se situait quasiment au même endroit lors des deux prélèvements (voir p.34), alors que dans le cas de la simulation informatique, nous pouvons observer le traceur suivre sa progression dans la ZNS entre les deux temps (T1 et T2).

## c) Résultats : post-processeur

Les résultats interprétés par la suite correspondent au point d'observation situé à 40 cm de profondeur, le point situé à 15cm ne donnant pas des résultats suffisamment représentatifs de l'ensemble (voir figure 16). En effet le pas de temps de notre modèle étant d'un jour, il est préférable d'observer les résultats suffisamment en profondeur pour que l'incertitude sur le temps de transit estimé soit plus faible.

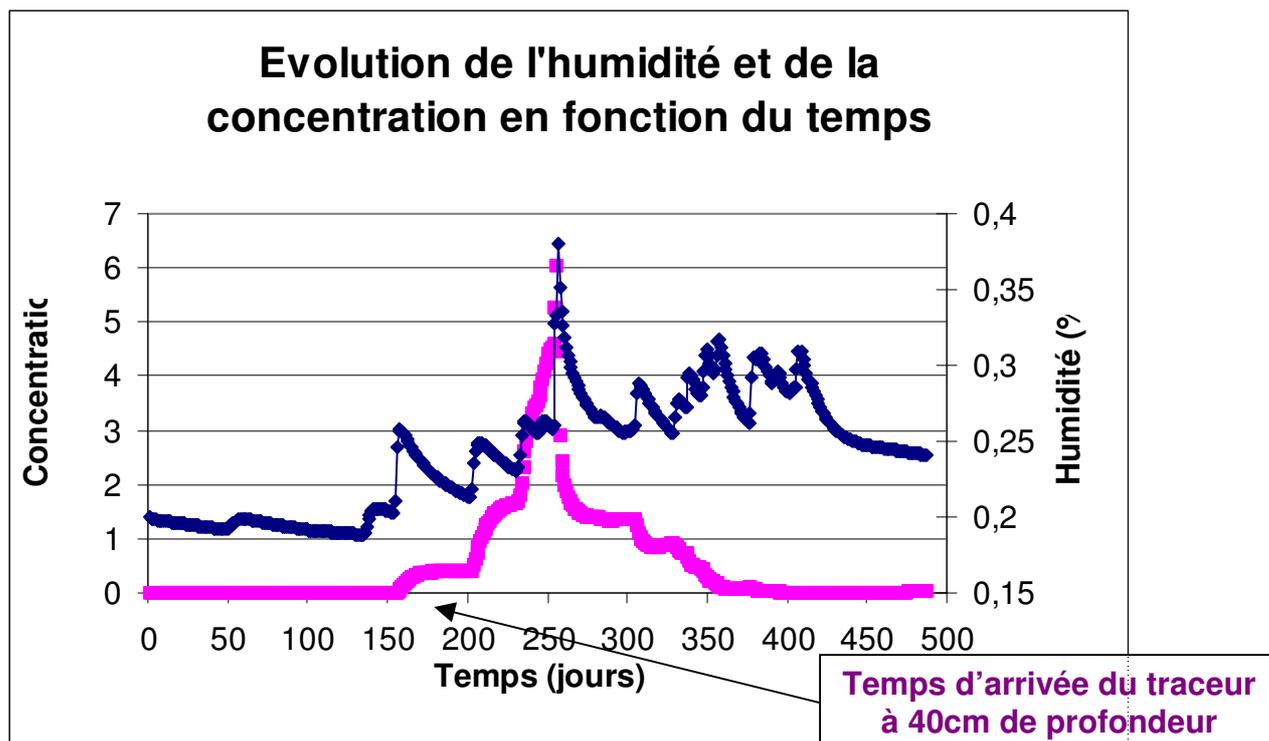


Figure 16: Evolution de l'humidité et de la concentration en traceur en fonction du temps à 40cm de profondeur

N'ayant pas changé les caractéristiques principales du modèle, la courbe de la variation de l'humidité en fonction du temps reste la même (courbe bleue), voir figure 13.

La courbe rose représente l'évolution de la concentration en traceur en un point donné (40cm) sur l'ensemble du temps de l'essai.

La concentration en traceur commence à augmenter au jour 157. Ceci implique, si on enlève les 30 jours de stabilisation fixés en début de simulation, que le traceur a tardé 127 jours à arriver à 40 cm de profondeur.

Par ailleurs il est important de noter que la courbe contient certains artefacts. En effet on pourrait s'attendre à ce que la courbe soit de type Gauss, comme toute courbe type de restitution de traceur. Cette allure différente est due à un dysfonctionnement du modèle au niveau du bilan hydrique. Lors de la simulation nous voyons apparaître ces irrégularités lorsque l'évaporation est plus importante que la pluie.

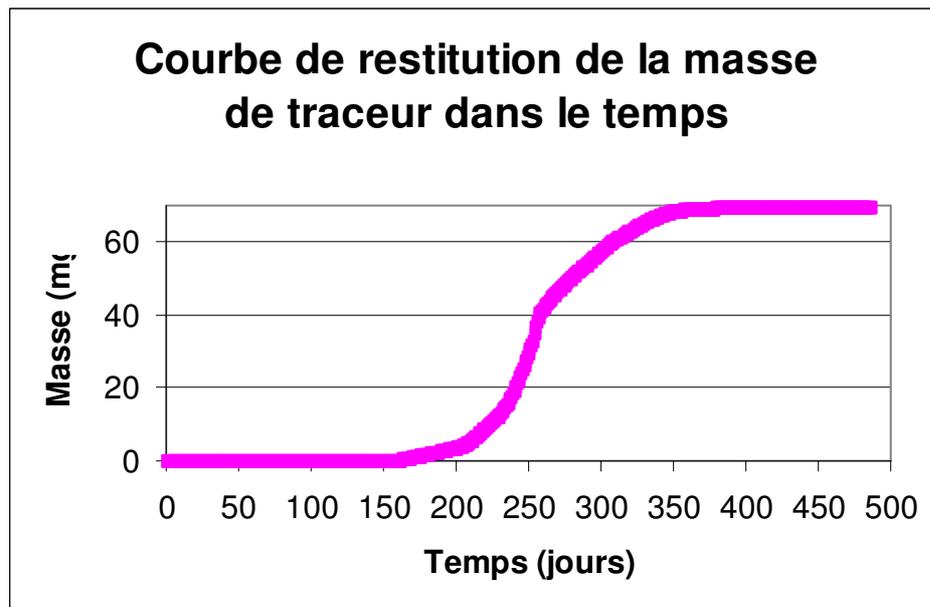


Figure 17 : Courbe de restitution de la masse de traceur dans le temps

Le graphique de la figure 16 représente la restitution de la masse du traceur au point de profondeur 40cm.

Nous pouvons remarquer que le traceur n'a pas été restitué dans sa globalité à la fin de l'essai car seulement 70mg est restitué alors que 100mg ont été introduit. Ceci doit être induit par un processus d'adsorption entre le soluté et la matrice.

### Estimation d'un temps de transit

Ces courbes suivantes représentent le profil d'évolution et de dispersion de notre traceur en profondeur en un temps donné. Nous avons choisi de tracer ces courbes de restitution aux dates correspondants à celles des prélèvements.

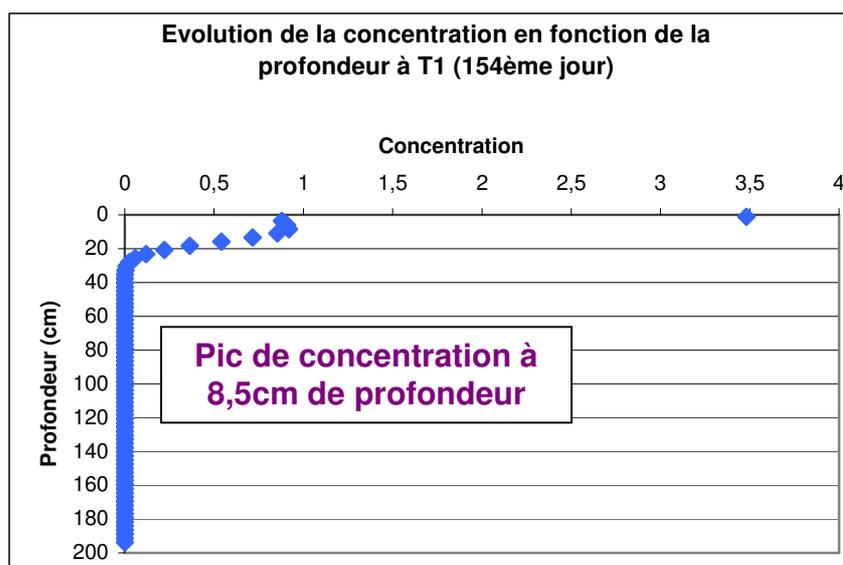


Figure 18 : Evolution de la concentration du traceur en fonction de la profondeur à T1

Sur cette courbe de la figure 18, nous mettons en évidence qu'à T1, le pic de notre traceur se situe à 8,5cm. Le temps de parcours est de 122 jours (152 - 30).

Ainsi la vitesse de transit est de :

$$V1 = 8,5 / 122$$

$$V1 = 0,7 \text{ mm/jr}$$

Le temps de transit est de :

$$T1 = 23,6 \text{ ans}$$

Par ailleurs nous remarquons en surface un point avec une concentration très importante, qui est sûrement due à un excès d'évaporation en ce point. En effet, à la surface du sol, il est possible qu'à peine la pluie tombée elle se soit déjà évaporée. Ce phénomène ne se rencontre pas en profondeur.

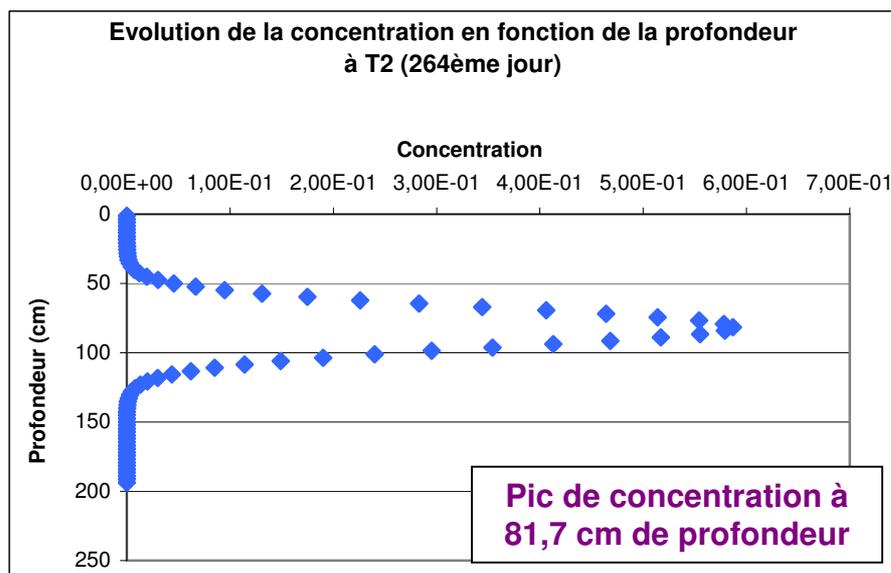


Figure 19 : Evolution de la concentration du traceur en fonction de la profondeur à T2

Pour le jour correspondant au jour de notre deuxième prélèvement, le pic de concentration en traceur se situe à 81,7 cm de profondeur au bout de 8 mois c'est à dire 234 jours après l'injection du traceur. (voir figure 19).

Ainsi la vitesse que nous pouvons en déduire est de :

$$V2 = 81,7 / 234$$

$$V2 = 6 \text{ mm/jr.}$$

Le temps de transit jusqu'à la nappe est de :

$$T2 = 4,7 \text{ ans.}$$

La différence entre les deux vitesses calculées est due aux changements des apports d'eau dans le temps. En effet les précipitations ont été plus importantes entre T1 et T2 qu'entre T0 et T1.

*Voir Annexe 8 : Tableau des précipitations journalières d'Arganda del Rey*

Il est nécessaire de prendre en compte un année hydrologique complète pour estimer plus précisément ce temps de transit car le bilan hydrique reste l'élément majeur qui permet la progression du traceur.

## Conclusion et perspectives d'amélioration du modèle

Ces valeurs se trouvent dans le même ordre de grandeur que celles calculées à partir des analyses chromatographiques (voir p.34). Ceci permet d'entrevoir que notre modèle se rapproche du comportement vu sur le terrain.

Par ailleurs afin de rapprocher davantage notre modèle de la réalité, les valeurs de précipitations journalières seront introduites dans le modèle sans la simplification que nous avons réalisée dans un premier temps (voir p.40).

Les perspectives d'optimisation du modèle vont consister dans un premier temps à déterminer réellement sur le terrain les valeurs de dispersivités longitudinales et transversales des différents sols.

Puis lors de la prochaine campagne de terrain en octobre (T4), sera réalisé un prélèvement d'une colonne de sol de 2m afin de simuler en laboratoire un essai de traçage avec le même traceur mais à plus petite échelle.

Ainsi il sera possible de comparer les résultats obtenus lors de l'essai de traçage à la parcelle, lors de l'essai de traçage en laboratoire et lors de la simulation du modèle informatique.

## Conclusion

A l'heure actuelle, la moitié du temps prévu pour le projet s'est écoulée et la caractérisation de cette ZNS a été amorcée par l'acquisition de nombreuses données. En ce qui concerne l'essai de traçage trois campagnes de prélèvement sont encore prévues, ce qui permettra au traceur d'avoir le temps de traverser l'ensemble des différentes formations constituant la ZNS.

D'autre part, une fois les analyses de laboratoire terminées, les valeurs de dispersivités mesurées in situ et les données de pluies correctement introduites, le calage optimal du modèle pourra être réalisé. Ainsi, l'estimation réelle du temps de transit des contaminants depuis la lixiviation jusqu'à l'arrivée aux eaux souterraines sera calculée.

Après la caractérisation complète du comportement physique et hydraulique de la ZNS, d'autres analyses seront réalisées pour la caractérisation des processus biologiques c'est à dire des processus de dégradation des contaminants et de la matière organique à travers la ZNS.

## **PARTIE 2 :**

Travaux préalables pour la  
caractérisation de la zone humide de Las  
Tablas de Daimiel (Ciudad Real,  
Castilla La Mancha)

## Introduction

Le Parc National de Las Tablas de Daimiel est situé dans la région de Castilla la Mancha, (200 km au sud de Madrid).

C'est une zone humide qui se forme par la confluence de deux rivières distinctes, le Guadiana, d'eaux douces et permanent et le Ciguela, d'eaux salées et à caractère saisonnier. Les deux rivières se situent dans une légère dépression du terrain qui facilite l'inondation et sur de la roche calcaire qui donne lieu à une lagune fluviale inondée avec les apports d'eaux souterrains, provoquant la décharge de l'aquifère.

Ce parc national est aujourd'hui en danger de part l'excessive utilisation de ces eaux souterraines depuis des décennies, principalement pour l'irrigation, ce qui provoque un abaissement de la nappe. Depuis la prise de conscience de ce phénomène dans les années 80, de nombreuses investigations ont été mises en place afin d'étudier le fonctionnement de la ZNS et ainsi d'adapter la gestion de cette ressource inestimable.

Le projet, mis en place par l'IGME, est un projet d'évaluation et de validation d'une méthodologie de caractérisation de la ZNS comme réservoir et transmetteur d'eau et de solutés englobant différents types de sol. Comme il est prévisible sur une aussi grande superficie, la détermination, que se soit des caractéristiques des matériaux ou des nutriments constituant la ZNS, est très complexe de par son hétérogénéité. Ainsi le but de ce projet est d'établir une répartition en zones géographiques des caractéristiques hydrauliques du parc afin d'améliorer la maîtrise de cette hétérogénéité.

De la même manière que pour le projet de la partie 1 d'Arganda del Rey, ce projet s'étendant sur plusieurs années, ma participation s'est intégrée dans une des études le constituant.

## Objectif de l'étude

L'étude présentée ici, consiste dans un premier temps à amorcer l'élaboration de la cartographie hydraulique simplifiée de la ZNS à l'aide d'analyse d'échantillons de sol et d'essais d'infiltration des différents matériaux rencontrés. Puis consiste à l'évaluation de la relation entre les eaux superficielles et les eaux souterraines d'un ancien canal de drainage du parc « el Zanjón del Cigüela ».

Après une présentation du parc national de las Tablas de Daimiel, nous exposerons les campagnes de mesure réalisées et les résultats correspondant.

## I. Présentation du site

Le parc national de Las Tablas de Daimiel est composé d'une zone humide particulière, de plusieurs plans d'eau formée par débordement des rivières Guadiana, Cigüela, Riansares et Zancara. Ceci donne au site une qualité écologique qui lui permet de rester un habitat important pour des espèces d'oiseaux d'eau européennes et africaines. Il fait ainsi partie de diverses conventions : UNESCO (1973), RAMSAR (1982), SPA (Aire Spéciale de Protection), Natura 2000...

### 1) Localisation géographique

Le parc national de Las Tablas de Daimiel (1928ha) se situe dans la province de Ciudad Real à 180km au sud de Madrid entre les villages de Daimiel et Villarubia de los Ojos dans la communauté de Castilla-la-Mancha.

Le parc se situe à 606m d'altitude dans les grandes plaines de la Mancha.



Figure 20: Localisation du Parc naturel de Las Tablas de Daimiel en Espagne

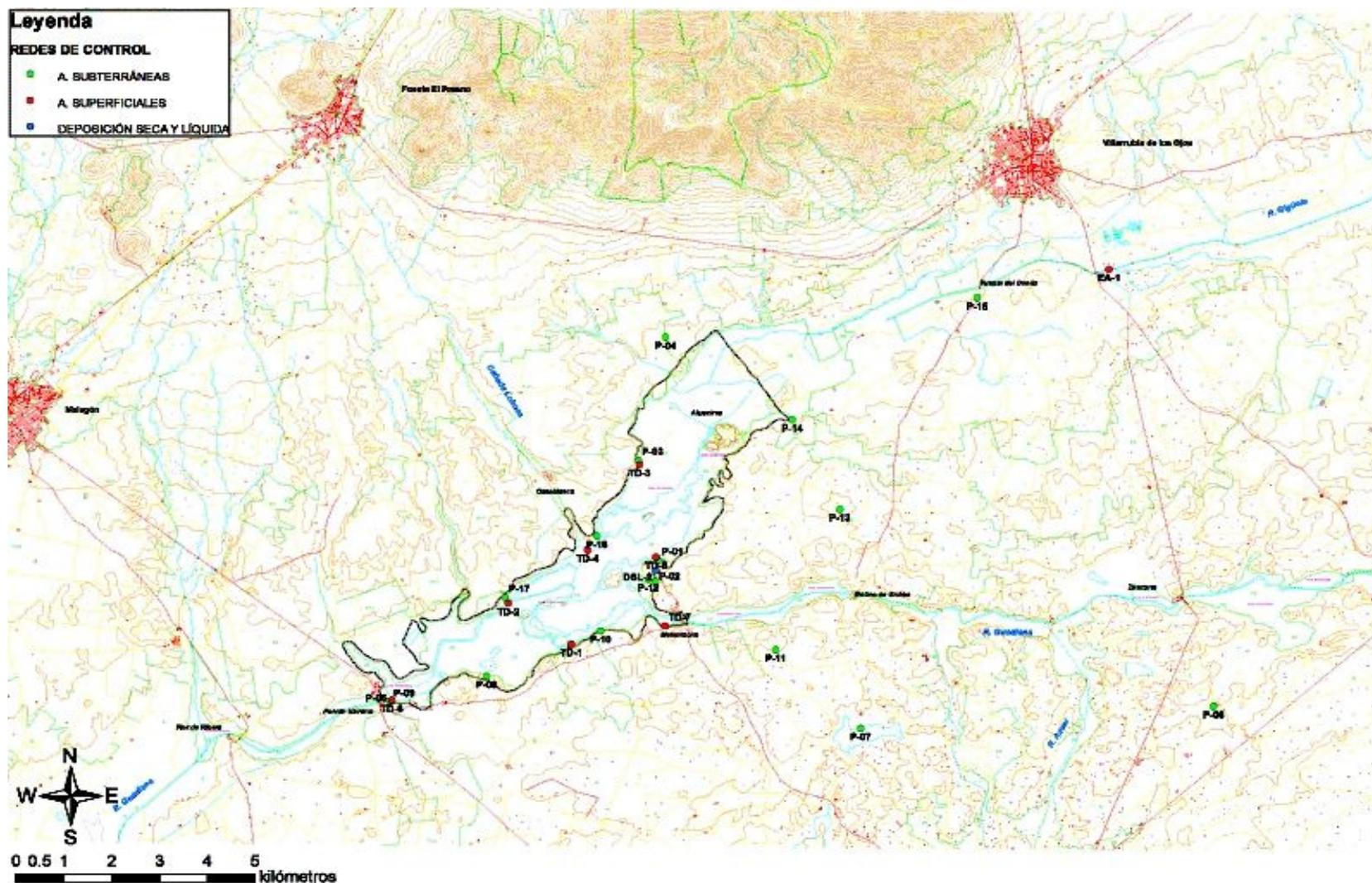


Figure 21: Le Parc national de Las Tablas de Daimiel

Sur la carte, figure 21, est représenté le contour du parc national de Las tablas de Daimiel, les différents puits de contrôle implantés, le réseau hydrographique.

## **2) Caractéristiques générales du site**

### **a) Contexte géologique**

L'unité dans laquelle se trouve le parc national de Las Tablas de Daimiel, a une forme quasi rectangulaire avec un axe maximum de direction Ouest-Est de 130km et un axe minimum de direction Nord-Sud de 50km.

Il se caractérise par un relief très doux avec des côtes oscillantes entre 600m et 750m. La zone se situe entre les montagnes de Tolède et la cordillère Ibérique et est principalement constituée par des dépressions qui se sont remplies au Miocène et Quaternaire.

Le socle et les bords sont formés par des matériels paléozoïques, triasiques, jurassiques et crétacés.

La stratigraphie est donc la suivante :

- Paléozoïque : quartzite et ardoises noires
- Trias : argiles, grés, dolomies, calcaires dolomitiques et marnes
- Crétacé: marnes, sables, calcaires et dolomies
- Pliocène : argiles, sables/calcaires et marno-calcaires
- Quaternaire : limons, argiles, sable

La zone occidentale est formée par les quartzites et ardoises alors que les zones orientale et centrale sont formées par les calcaires, dolomies et marnes.

Des phénomènes de dissolution et de karstification affectent le Trias et le Crétacé. La genèse des lacs est donc à mettre en relation avec l'effondrement de cavités karstiques. De nombreuses dolines sont répertoriées sur la zone.

### **b) Contexte climatologique**

Le type de climat dominant de la zone est méditerranéen tempéré, caractérisé par l'existence d'une saison sèche bien définie. Les températures moyennes annuelles oscillent entre 11,5 et 14,5 °C, décembre et Juillet étant les deux mois extrêmes. L'époque des gelées a une durée maximum de 6 mois.

Les pluies étant rares et irrégulières (300 à 400 mm/an avec un maximum en avril) et le taux d'évaporation des petits lacs, intense, cette région est plutôt aride.

### c) Contexte hydrogéologique

Le bassin s'étend le long de 13000km et le réseau hydrographique principal est formé par le fleuve permanent Guadiana (eau douce) que rejoint la rivière Azuer et le fleuve Cigüela saisonnier (eau salée). Leur confluence se produit dans le parc national. Le fleuve Guadiana est alimenté par un flux souterrain qui décroît jusqu'à atteindre le fleuve Cigüela. Ce dernier coule du NE vers le SW et naît dans la province de Cuenca, (voir figure 22).

L'existence de Las tablas de Daimiel a commencé simplement. Le Cigüela, fleuve avec un caractère saisonnier inonde la plaine durant l'hiver, alors que le Guadiana avec un caractère permanent apporte l'eau provenant de l'aquifère durant toute l'année. Las Tablas ont été réceptrices de ces eaux jusque dans les années 70, époque à partir de laquelle le développement important de la région a transformé les traditionnelles cultures non irriguées en cultures irriguées, le nombre de puits s'est multiplié. Cette transformation du système d'irrigation par la surexploitation de l'aquifère principal, l'irrégularité des pluies et l'évaporation intense des lacs ont entraîné la diminution du niveau piézométrique et l'assèchement des rivières, (*voir Annexe 10 : Historique de la piézométrie de Las Tablas de Daimiel*). De plus, les rivières ont été polluées par des pesticides et des fertilisants provoquant leur eutrophisation.

Grâce au Plan de Régénération Hydrique, on prétend à avoir un niveau d'inondation minimum au moins sur 600ha à la fin de la saison sèche. Ce plan consiste à mettre en place une série de solutions capables de diminuer le grand problème qui affecte las Tablas (manque d'eau), et ainsi permettre une rapide récupération des ressources en eau.



Figure 22 : Réseau hydrographique du Parc National de las Tablas de Daimiel

## II. Matériels et méthodes

### 1) Etudes préalables pour l'élaboration de la cartographie des caractéristiques hydrauliques de la ZNS

Depuis le commencement de ce projet diverses investigations ont été mises en place afin de caractériser les propriétés des différents matériaux constituant la ZNS de Las Tablas de Daimiel. Ainsi nous comptons six matériaux différents dénommés par leurs caractéristiques principales.

- « Arcillas verdes » : c'est un sol composé d'argiles vertes
- « Tourba » : tourbe
- « Ovias sucias » : c'est un sol composé essentiellement de charophytes de couleurs obscures
- « Ovias limpias » : c'est un sol composé essentiellement de charophytes de couleurs claires

Les charophytes sont des algues qui se développent sous l'eau et forment souvent de denses tapis au fond des marres et des eaux saumâtres.

- « Limos » : Limons
- « Alternancia sol organico y ovas » : Alternance de matière organique et de charophytes

De plus ces nombreuses investigations ont permis d'établir une répartition géographique de ces divers matériaux. Voir figure 23.

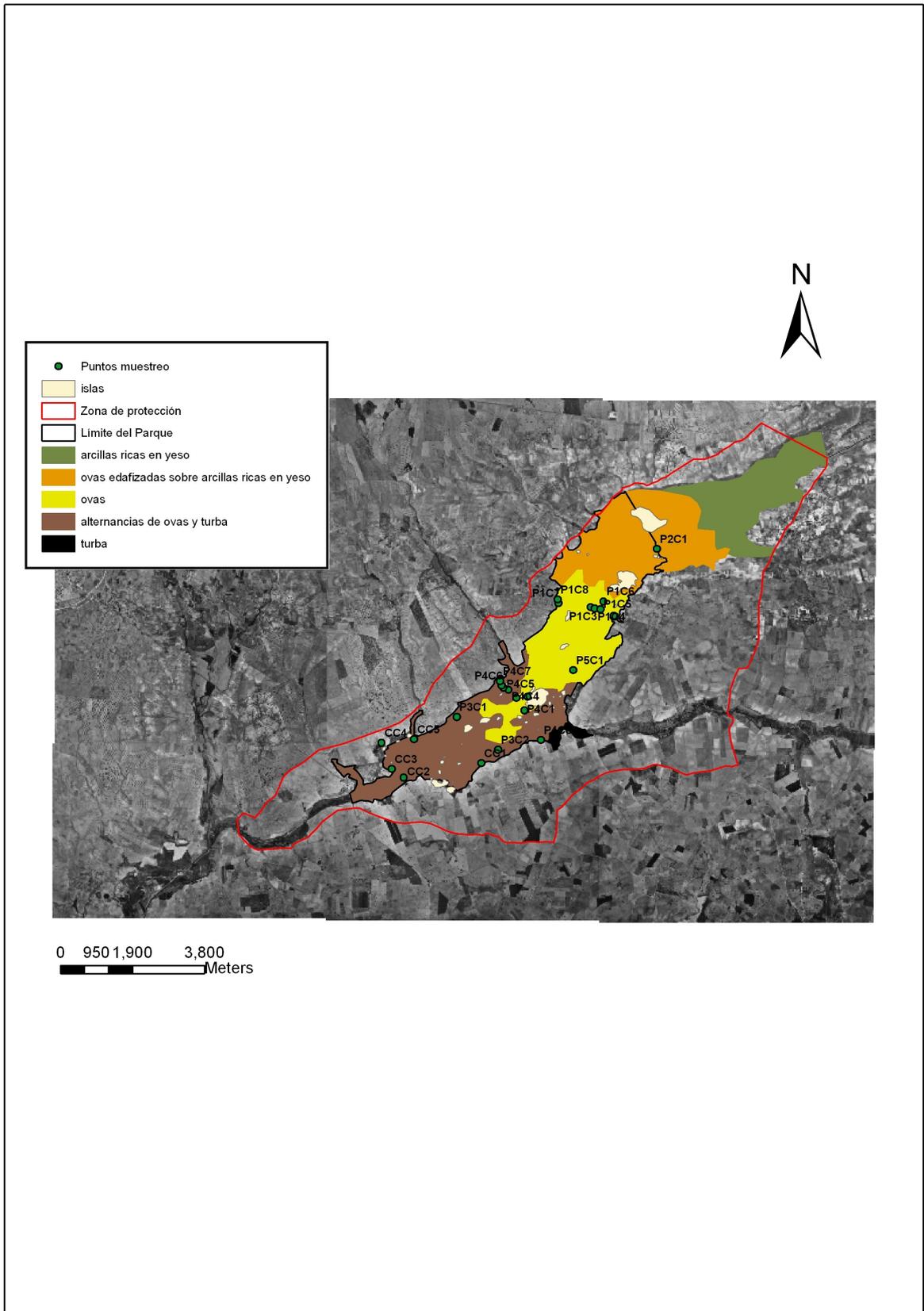


Figure 23: Carte de répartition des sols

Sur la carte figure 23 ,

Le vert correspond aux argiles vertes  
Le orange aux charophytes obscures  
Le jaune aux charophytes claires  
Le marron aux alternances matière organique et charophytes  
Le noir à la tourbe

Ces différentes formations étant identifiées, des campagnes de mesures sur le terrain ont été mises en place afin d'estimer par des analyses en laboratoire leurs caractéristiques hydrauliques générales telles que porosité, densité, humidité et conductivité hydraulique.

### a) Campagne de terrain

#### - Prélèvement d'échantillon de sol (photo 12)

Nous avons prélevé plusieurs échantillons de chacun des sols identifiés. Pour cause d'intempérie lors de notre campagne de terrain, nous avons pu prélever uniquement les échantillons suivants :

- Echantillon 1 : Argiles vertes
- Echantillon 2 : Sol organique avec charophyte
- Echantillon 3 : Tourbe
- Echantillon 4 : Limons
- Echantillon 5 : Charophytes claires



*Photo 12 : Prélèvements d'échantillons de sol*

La prise d'échantillon a été réalisée de la même manière que pour le projet de la Partie 1 de ce rapport, voir p.16.

## - Essai d'infiltration

Des essais d'infiltration à charge constante (voir photo 13), ont été effectués sur les différentes formations en superficie afin d'estimer la conductivité hydraulique à saturation. Voir partie 1 p.17.



Photo 13: Essais d'infiltration à charge constante

Plusieurs essais ont été réalisés sur chaque sol afin d'augmenter la représentativité de la valeur calculée.

## b) Analyses de laboratoire

### - Echantillons de sol

Les prélèvements ayant été réalisés avec le matériel Ekjelkamp, nous avons pu en déterminer les mêmes paramètres que pour les échantillons du projet d'Arganda, (voir photo 14).



Photo 14 : Echantillons de sol de Las Tablas de Daimiel

Voir protocole expérimental et appareillage p.22, 23 et 24

### - Essais d'infiltration : voir Partie 1 p.18

## 2) Evaluation de la relation eaux superficielles / eaux souterraines

Après avoir identifié les caractéristiques des différents sols observés, nous nous sommes intéressés au fonctionnement hydraulique du parc national en tentant d'établir une relation entre ses eaux superficielles et ses eaux souterraines.

La zone humide de Las Tablas de Daimiel, est alimentée par le haut Guadiana et par l'écoulement de l'aquifère de La Mancha lorsque le niveau des eaux souterraines est élevé ; mais lorsque ce dernier est faible, la direction du flux des eaux souterraines s'inverse et l'eau se déplace vers le bas à partir de la zone humide, pour recharger l'aquifère. Comme il a déjà été expliqué plus haut, la faible pluviosité conjuguée au pompage de l'aquifère pour l'irrigation des cultures a entraîné un abaissement du niveau de la nappe phréatique, de telle sorte que la recharge de l'aquifère a dominé durant les années 1990. Cette situation a entraîné un grave assèchement de la zone humide.

Depuis plusieurs années des contrôles piézométriques sont réalisés plusieurs fois dans l'année afin de surveiller cette tendance en observant l'évolution de la nappe. Ainsi durant de mon stage, j'ai pu réaliser la campagne de contrôle des puits de Mai 2008.

D'autre part diverses études sont mises en place afin d'étudier cette relation eaux souterraines / eaux superficielles. Une d'entre elle a consisté à réaliser un profil du fleuve Cigüela en mesurant la conductivité, la température, la turbidité et en prélevant des échantillons afin de comprendre son fonctionnement. A posteriori des études complémentaires permettront de déterminer son origine précise.

### a) Campagne de terrain

#### - Contrôle piézométrique du parc

Comme nous l'avons expliqué plus haut, depuis la prise de conscience de ce réel problème d'assèchement, un réseau de puits a été mis en place afin de surveiller cette tendance. Certains de ces puits ne se trouvent pas dans la limitation du parc afin de connaître l'influence de l'environnement extérieur.

Le contrôle des puits complet (voir figure 19) s'effectue deux fois par an, en mai et en novembre et tous les mois, quelques uns d'entre eux sont vérifiés.

Lors de cette campagne de terrain en mai 2008 a été réalisé le relevé complet. Il consiste à suivre l'évolution du niveau piézométrique, à mesurer la température de la nappe et à déterminer la composition des eaux de Las Tablas de Daimiel en réalisant des prélèvements d'échantillon d'eau des puits.

Pour chacun des puits, différentes mesures sont effectuées :

- Le niveau piézométrique avec une sonde
- La température de l'eau
- La conductivité électrique de l'eau
- Le pH de l'eau

Puis nous avons prélevés des échantillons d'eau (voir matériel photo 15), pour le suivi de la composition chimique et isotopique de l'eau mais dont nous n'étudierons pas les résultats car les données ne sont pas encore disponible à l'heure actuelle.



*Photo 15 : Matériels de prélèvement des échantillons d'eau*

Dans cette étude, nous comparerons les valeurs de piézométrie observées lors de cette campagne de terrain avec les valeurs observées lors du mois de novembre 2007 afin de mettre en évidence l'évolution annuelle de la nappe. Nous utiliserons pour cela le logiciel Surfer V8.

Surfer est un logiciel de représentation cartographique en 3D. Ce dernier permet la création de plusieurs types de graphiques. Il convertit rapidement des données en cartes et surfaces. Il permet de contrôler toutes les options graphiques et d'obtenir exactement le résultat voulu.

#### - **Profil de la Cigüela**

La Cigüela est une lagune fluviale longue de 10,5km et de largeur variable, (voir photo 16). Depuis des décennies, le débit y est très irrégulier d'une année sur l'autre. L'objectif de cette campagne est d'établir un profil de ce fleuve afin d'en comprendre son comportement.



*Photo 16: Le fleuve Cigüela*

Nous avons effectué un profil le long de la Cigüela en partant de l'amont au Nord Est vers l'aval au Sud Ouest en réalisant différentes mesures en 17 points différents.

Voir **Annexe 11** : Localisation des différents points du profil de la Cigüela

Il est important de noter les particularités de quelques uns de ces échantillons qui nous aideront à une meilleure compréhension des résultats.

Echantillons 1 et 2 : échantillons prélevés au commencement de la Cigüela

Echantillon 3 : sortie de la station d'épuration de Villarubia de los ojos.

Echantillons 6 et 19 : excavations qui atteignent le niveau de la nappe phréatique.

En chacun de ces points nous avons prélevé des échantillons d'eau pour déterminer la composition chimique et isotopique.

- pH,
- Température de l'air,
- Température de l'eau,
- Conductivité électrique de l'eau
- Turbidité de l'eau



*Photo 17 : Mesures de terrain*

#### b) Analyse de laboratoire

Les analyses des échantillons d'eau sont réalisées par le laboratoire de l'IGME.

A l'heure actuelle, les résultats des analyses chimiques n'étant toujours pas disponibles, nous exploiterons uniquement les résultats de l'analyse de la composition isotopique.

### III. Résultats et discussion

#### 1) Etudes préalables pour l'élaboration de la cartographie des caractéristiques hydrauliques de la ZNS

##### a) Les échantillons de sol

Dans ce cas présent, nous ne pouvons pas comparer explicitement nos résultats obtenus pour chacun des sols, avec des valeurs empiriques que l'on peut rencontrer dans la littérature car certaines de ces formations ne peuvent pas être classées selon un type de sol précis. Seuls les sol 1 (argiles vertes), le sol 3 (tourbe) et le sol 4 (limons) pourront être comparés.

##### ➤ La porosité

Sols	Echantillon	Porosité 1 (%)	Porosité 2 (%)	Porosité 3 (%)	Porosité moyenne (%)
Argiles vertes	1	20,7	25,9	23,8	<b>23,4</b>
Sol organique avec charophytes	2	52,5	59,0	58,8	<b>56,8</b>
Tourbe	3	35,6	33,6	27,9	<b>32,4</b>
Limons	4	45,0	49,7	45,1	<b>46,6</b>
Charophytes claires	5	52,0	45,7	45,0	<b>47,6</b>

Tableau 11 : Valeurs de porosité des échantillons

##### ➤ La densité apparente :

Sols	Echantillon	Densité apparente 1	Densité apparente 2	Densité apparente 3	Densité apparente moyenne
Argiles vertes	1	1,17	1,38	1,34	<b>1,30</b>
Sol organique avec charophytes	2	0,61	0,71	0,68	<b>0,67</b>
Tourbe	3	0,24	0,23	0,20	<b>0,22</b>
Limons	4	0,48	0,56	0,52	<b>0,52</b>
Charophytes claires	5	0,70	0,61	0,64	<b>0,65</b>

Tableau 12 : Valeurs de densité des échantillons

Les analyses des échantillons de sol répertoriées dans les tableaux 11 et 12, mettent en évidence des valeurs relativement homogènes pour chacun des sols. Les échantillons de sol ne sont pas prélevés au même endroit, nous pouvons donc considérer que la porosité moyenne et la densité moyenne calculée pour chacun des sols sont représentatives de l'ensemble de la formation. Ainsi nous pouvons attribuer ces valeurs à ce sol sur l'ensemble du parc.

➤ La perméabilité :

La mesure de la perméabilité a été réalisée à différentes charges afin que la valeur moyenne soit plus représentative du sol étudié.

Type de sol	Conduc. hydraulique K1 (cm/jr)	Conduc. hydraulique K2 (cm/jr)	Conduc. hydraulique K3 (cm/dia)	Conduc. hydraulique K4 (cm/jr)	Conduc. hydraulique moyenne K (cm/jr)	Conduc. hydraulique moyenne K (m/s)
<b>Argiles vertes</b>	158,9	158,9	151,9	123,8	<b>148,4</b>	<b>1,7E-05</b>
<b>Sol organique avec charophytes</b>	748,0	689,3	579,0	295,1	<b>577,9</b>	<b>6,7E-05</b>
<b>Tourbe</b>	27502,0	28207,2	27051,1	21206,3	<b>25991,6</b>	<b>3,0E-03</b>
<b>Limons</b>	36,1	37,8	41,0	36,7	<b>37,9</b>	<b>4,4E-06</b>
<b>Charophytes claires</b>	82,9	81,9	86,0	104,2	<b>88,7</b>	<b>1,0E-05</b>

*Tableau 13 : Valeurs de conductivité hydraulique obtenues avec le perméamètre*

Lors de la mesure de la conductivité hydraulique avec le perméamètre de laboratoire, les différentes expériences sont réalisées avec le même échantillon de sol, seul la charge change. Les résultats obtenus donnent des valeurs relativement homogène pour chaque type de sol.

D'autre part, en comparant avec les valeurs empiriques (voir annexe 1), nous remarquons que la tourbe a effectivement une grande conductivité hydraulique et les limons et argiles ont des faibles conductivités hydrauliques.

Généralement les argiles ont une conductivité hydrauliques comprise entre  $10^{-9}$  et  $10^{-11}$  m/s, mais il faut garder à l'esprit que ce n'est qu'un sol composé d'argile et non une argile.

## b) Essais d'infiltration

La conductivité hydraulique à saturation en (cm/jr) a été déterminé pour chacun de ces essais à partir de la méthode de Wu et al, 1999. expliquée p.19. Les courbes peuvent être consultées en *Annexe 12 : essais d'infiltration aux différentes profondeurs*

	Argiles vertes	Alternance Charophytes et Matière organique	Tourbe	Limons	Charophytes claires	Charophytes Obscures
Essai 1	93,94	1325,15	1822,25	257,05	109,18	1450,23
Essai 2	83,54	383,56	1826,2	529,69	183,67	949,98
Essai 3	24,51		506,06	140,17	240,24	613,63
Essai 4	37,44		392,11	269,11	498,39	356,44
Essai 5	12,23		747,75	260,88	94,17	936,18
Essai 6	12,8		943,12	293,75	116,29	
Essai 7	27,56					
Essai 8	55,81					
Ks moyen (cm/jr)	43,48	854,36	1039,58	291,78	206,99	861,29
Ks moyen (m/s)	5,0E-06	9,9E-05	1,2E-04	3,4E-05	2,4E-05	1,0E-04

Tableau 14 : Détermination de la conductivité à saturation à partir de la méthode de Wu et al.

Si nous comparons les valeurs de Ks obtenues avec le perméamètre de laboratoire avec celui obtenu à l'aide de la méthode de Wu et al., nous obtenons des résultats de même ordre de grandeur. Le faible écart entre les valeurs est due à la différence d'échelle entre les deux méthodes. Le perméamètre de laboratoire utilise un cylindre de 5cm de diamètre ce qui n'est pas vraiment représentatif de l'hétérogénéité du milieu. Les valeurs déterminées à partir des essais d'infiltration mettent davantage en évidence cette hétérogénéité.

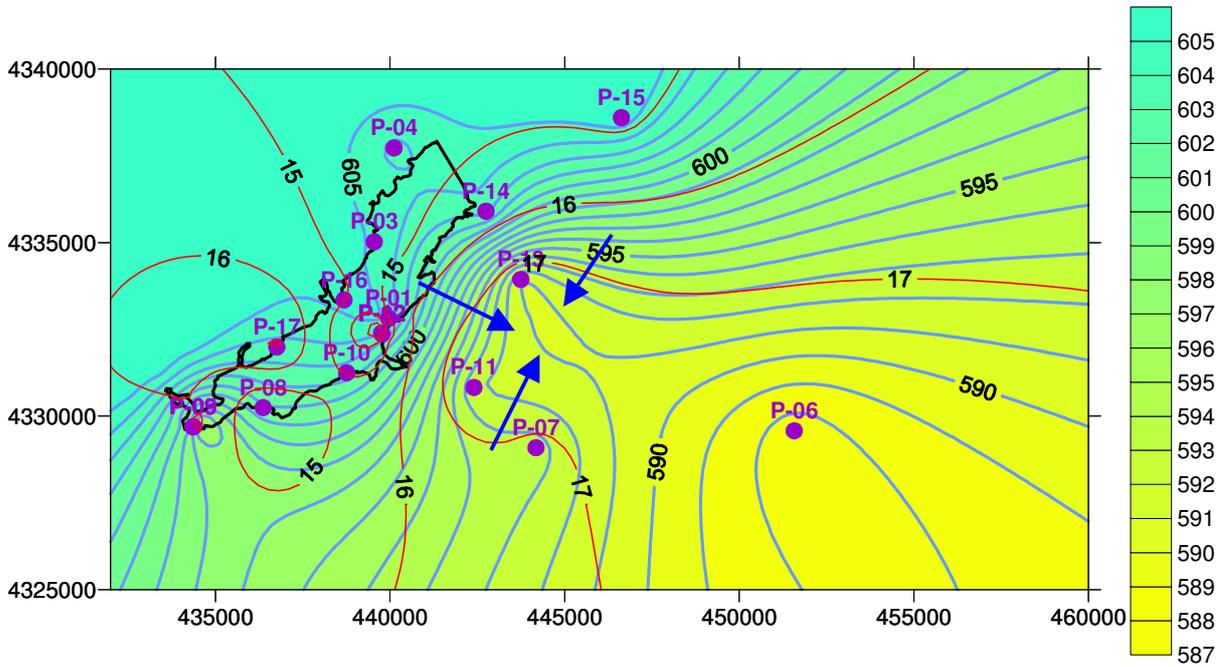
## 2) Evaluation de la relation eaux superficielles / eaux souterraines

## a) Contrôle piézométrique du parc

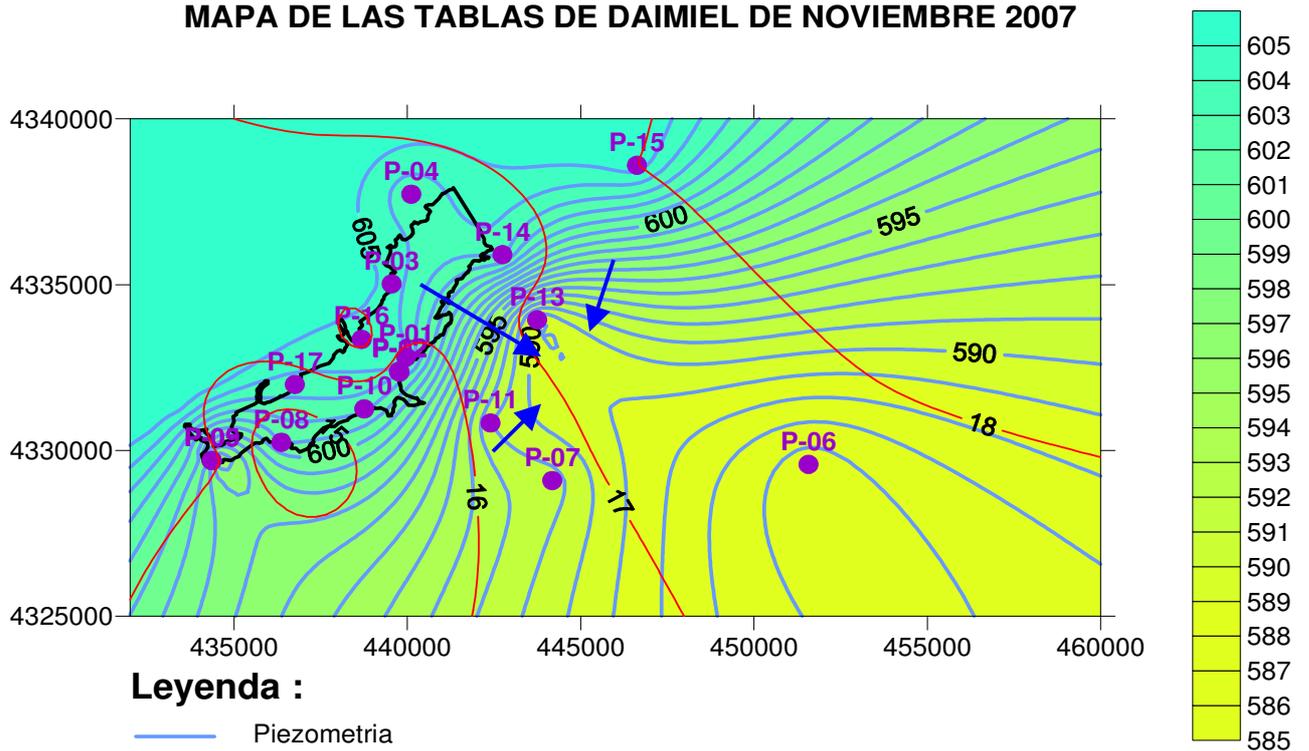
Voir résultats en *Annexe 13 : Données du contrôle des puits de Las Tablas de Daimiel Mai 2008.*

La mesure du niveau piézométrique réalisée en chacun des puits lors de cette campagne et les données disponibles de la précédente campagne (novembre 2007), nous ont permis d'établir deux cartes piézométriques, novembre 2007 et Mai 2008. Pour cela, nous avons utilisé le logiciel Surfer V8. La méthode d'interpolation des données choisie est la méthode par krigeage.

**MAPA DE LAS TABLAS DE DAIMIEL DE MAYO 2008**



**MAPA DE LAS TABLAS DE DAIMIEL DE NOVIEMBRE 2007**



**Leyenda :**

- Piezometria
- Delimitacion de Las Tablas de Daimiel
- Temperatura
- Pozos
- ➔ Direction du flux

*Figure 24 : Cartes piézométriques réalisées sur Surfer 8*

Comme nous l'avons expliqué plus haut (voir p.66), nous pouvons observer sur la figure 24, que la direction du flux principal durant toute l'année, au niveau du parc est Nord Ouest – Sud Est. La tendance se poursuit, les eaux du parc se dirigent vers le bas, ce qui décharge l'aquifère principal et assèche donc la zone.

Ces cartes seront utilisées primordialement pour le suivi et la vérification de cette tendance.

De plus nous remarquons que le niveau piézométrique augmente de quelques cm entre novembre et mai. Cette augmentation est due au fait que la majorité des précipitations annuelles se produisent entre ces deux mois.

#### b) Profil de la Cigüela

*Les données acquises lors de la réalisation du profil sont consultables en **Annexe 14**.*

##### - Composition isotopique des eaux du Cigüela

Il existe une relation entre le  $\delta^{18}\text{O}$  et le  $\delta^2\text{H}$  de l'eau démontrée par Craig en 1961. Cette relation définit la moyenne des eaux météoriques du monde (MLW : Mean Water Line).

$$\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$$

Cette droite est une représentation statistique de la composition isotopique des eaux étudiées.

Si la composition d'une eau se trouve sur la MLW, cela signifie qu'il n'y a pas eu de variation de composition des eaux météoriques. Cette eau correspond directement à l'eau de pluie. La relation entre  $\delta^{18}\text{O}$  et le  $\delta^2\text{H}$  peut se voir modifier par différents processus, de manière que les points représentatifs de la composition isotopique de certaines eaux se situent en dehors de la droite météorique MLW. Selon la position des nouveaux points par rapport à la MLW, nous pouvons en déduire quel est le processus modificateur responsable. Ainsi nous allons commencer l'interprétation de nos résultats en plaçant nos points sur le graphique de Craig, 1961, (voir figure 25).

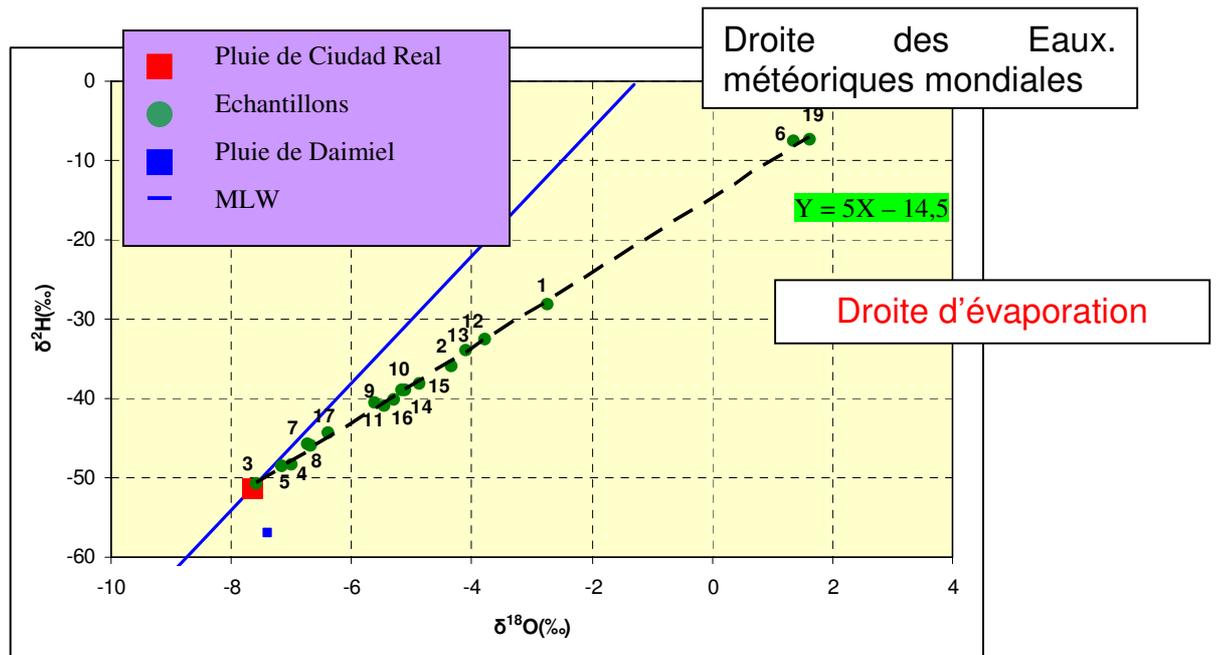


Figure 25 : Composition isotopique des eaux du Cigüela

Le tracé de la relation entre Oxygène 18 et Deutérium va nous permettre d'identifier l'origine de ces eaux, (voir figure 25).

L'évaporation des eaux superficielles est un processus de non-équilibre qui enrichie l'eau résiduelle en isotopes lourds avant de s'infiltrer. La pente de la relation entre  $\delta^{18}\text{O}$  et le  $\delta^2\text{H}$  passe de 8 à des valeurs comprises entre 4 et 6, en fonction de la température, l'humidité et la salinité.

Dans ce cas présent, la pente obtenue par l'alignement de nos points est de 5, nous pouvons en déduire que ces eaux correspondent à des eaux d'évaporation depuis la surface libre.

#### - Conductivité électrique des eaux



Figure 26 : Profil de conductivité électrique de la Cigüela

La figure 26 met en évidence des conductivités électriques comprises entre 1000 et 4000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en ce qui concerne le court d'eau de la Cigüela et 12800  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en ce qui concernent les eaux d'affleurement de la nappe phréatique. Dans un premier temps nous pouvons noter que cette salinité est très importante. Une eau d'irrigation avec une teneur en sel élevée peut avoir de graves conséquences sur les sols ce qui peut affecter les cultures et ainsi provoquer une pollution des eaux souterraines.

La conductivité électrique donc la salinité est importante avant la sortie de la station d'épuration. Puis après le rejet, (échantillon 3) l'eau a une conductivité faible mais celle-ci augmente d'amont en aval jusqu'à la fin de profil. Cette augmentation de salinité doit provenir d'un mélange progressif des eaux météoriques avec les eaux souterraines originaires des formations gypsifères qui constitue la sierra située plus au Nord.

Des analyses supplémentaires telles que la composition isotopique des eaux du puits P-15 et P-14 permettront de confirmer ou de refuser cette hypothèse.

## Conclusion

Cette étude fait partie du projet global de caractérisation du comportement de l'eau et des contaminants de la ZNS du Parc national de Las Tablas de Daimiel.

L'acquisition des diverses données obtenues sur le terrain et en laboratoire, caractérisant les différents types de sols du parc, permettra par la suite l'élaboration de la cartographie hydraulique de la ZNS.

Le contrôle des puits du parc continuera à être réalisé de la même manière afin de suivre l'évolution du phénomène d'assèchement de cette zone humide.

Par ailleurs le profil de la Cigüela réalisé a permis d'amorcer l'étude de son comportement. D'autres analyses apporteront des renseignements complémentaires afin de déterminer son origine.

## CONCLUSION GENERALE

La protection et la gestion des aquifères sont un enjeu important pour les populations alimentées en eau potable grâce aux eaux souterraines ainsi que pour les écosystèmes auxquels ils appartiennent. Cette connaissance est rendue possible par diverses études géologiques, hydrogéologiques et hydrochimiques et la mise en place de modèles informatiques.

Les deux études réalisées lors de mon stage apportent une vision globale des différentes analyses qui peuvent être réalisées pour étudier les zones non saturées du territoire espagnol.

L'essai de traçage et les analyses d'échantillons de sol réalisés sur la parcelle expérimentale d'Arganda del Rey permettront le calage du modèle de simulation du comportement de la ZNS et donc l'estimation d'un temps de transit jusqu'à la nappe. Les processus physiques et hydrauliques de cette ZNS désormais connus, des analyses supplémentaires permettront d'aborder les processus biologiques qui se produisent et notamment la dégradation de la matière organique. Ainsi il sera possible d'appréhender l'impact d'un épandage de boues de station d'épuration sur ce site et de préciser l'estimation du temps de transit.

D'autre part, les différentes campagnes de terrains réalisées dans le Parc national de Las Tablas de Daimiel et toutes les données qui en découlent vont permettre l'avancement de ce projet d'envergure qui consiste en la caractérisation de la ZNS du parc. Par la suite, d'autres études sont prévues sur ce sujet afin de mettre en place des mesures pour le rétablissement ou du moins la préservation de ce parc national.

## BILAN PERSONNEL

Ce stage a été une expérience très enrichissante tant sur le plan professionnel que relationnel. J'ai eu la chance de participer à des projets des plus intéressants et d'intégrer une équipe de professionnels disponible et compétente.

Par ailleurs j'ai pu appliquer et approfondir mes connaissances en hydrogéologie en général et en modélisation informatique avec les différents programmes utilisés.

De plus le fait de travailler dans une nouvelle langue et dans un nouveau pays m'a beaucoup apporté et m'a permis en outre de comparer les techniques utilisées en France et en Espagne.

# BIBLIOGRAPHIE

**L.Wu, L.Pan, J.Mitchell, and B. Sanden**, 1999. Measuring Saturated Hydraulic Conductivity using a generalized Solution for Single-Ring Infiltrimeters. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, VOL. 63.

**Schulze-Makuch, D.** (2005) Longitudinal dispersivity data and implications for scaling behavior. *Ground Water*, vol. 43, no. 3, p. 443-456.

**Van Genuchten M.Th.**, 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci Am.J* 44. pp892-898.

<http://www.eijkelkamp.com>.

<http://intranet.igme.es/intranet/oiforgeoceanifica/ingeos/cartografia>

<http://www.educa.madrid.org/web/ies.alpajes.aranjuez/argos/atlasma/capitulo%20-mapas%20fisicos.pdf>

<http://www.ussl.ours.usda.gov/MODELS/rosetta/rosetta.htm>

<http://estudiosgeolrevistas.csic.es/index.php/estudiosgeol/article/view61/59>

<http://www.cmontmorency.qc.ca/~jvaillancourt/semain13.ppt>

Logiciel Surfer version 8

Logiciel VS2D version 2.

## LISTE DES ANNEXES

- Annexe 1** : Valeurs typiques de conductivité hydraulique et de porosité
- Annexe 2** : Tableau de valeurs des courbes de rétention
- Annexe 3** : Graphique des essais d'infiltration à charge constante aux différentes profondeurs
- Annexe 4** : Triangle des textures
- Annexe 5** : Tableau de valeurs des analyses chromatographiques
- Annexe 6** : Tableau de valeurs des mesures de la conductivité électrique
- Annexe 7** : Tableau de valeurs de la densité apparente
- Annexe 8** : Tableau de valeurs des précipitations journalières d'Arganda
- Annexe 9** : Tableau de valeurs de l'ETP estimée à partir de la formule de Thornthwaite et valeurs de la pression potentielle atmosphérique
- Annexe 10** : Historique de la piézométrie de las tablas de Daimiel
- Annexe 11** : Localisation des différents ponts du profil du Cigüela
- Annexe 12** : Essais d'infiltration sur les différents sols observés
- Annexe 13** : Données du contrôle des puits de Las Tablas de Daimiel
- Annexe 14** : Données du profil de la Cigüela

**Annexe 1** : Valeurs typiques de conductivité hydraulique et de porosité

<b>Type de sol</b>	<b>Conductivité hydraulique (m/s)</b>
Gravier pur	$10^1$ à $10^{-2}$
Sable	$10^{-2}$ à $10^{-4}$
Sable très fin	$10^{-4}$ à $10^{-7}$
Silt, limons	$10^{-7}$ à $10^{-9}$
Argile	$< 10^{-11}$

Cours d'hydrogéologie François Renard – Octobre 2007

**Annexe 2 :Tableau de valeurs des courbes de rétention**

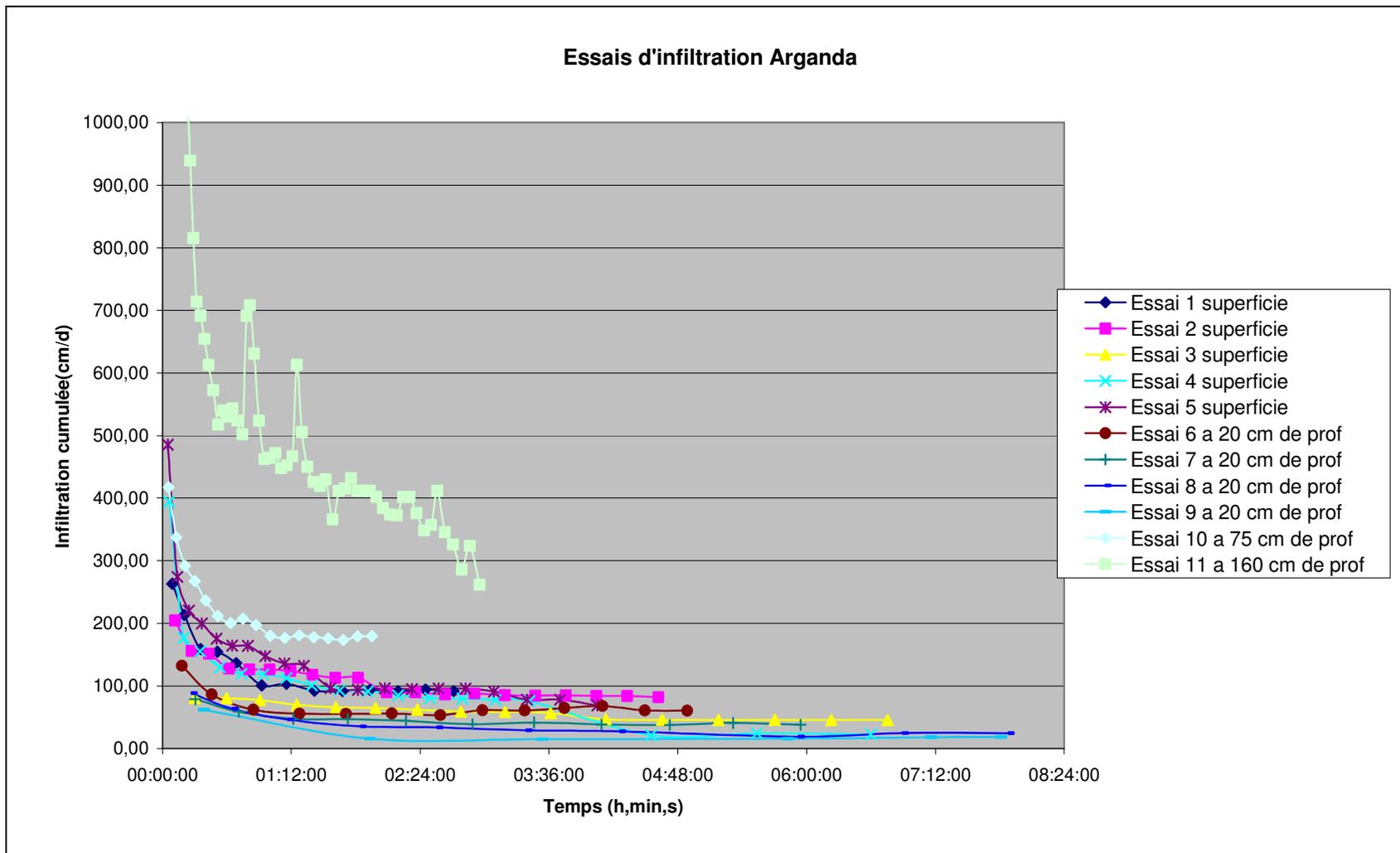
➤De 0 à 10 cm

Profondeur	pF	Contenu en eau (% volume)	Moyenne	Desv.Stad.	Int.de confiance (95%)
0-10 cm	0	49,94			
	0	45,20			
	0	45,35	<b>46,83</b>	2,69	3,05
0-10 cm	0,4	45,71			
	0,4	41,00			
	0,4	41,17	<b>42,63</b>	2,67	3,02
0-10 cm	1	42,90			
	1	38,89			
	1	39,19	<b>40,33</b>	2,23	2,53
0-10 cm	2	33,49			
	2	30,47			
	2	30,86	<b>31,61</b>	1,64	1,86
0-10 cm	2,3	29,88			
	2,3	27,41			
	2,3	27,74	<b>28,34</b>	1,34	1,52
0-10 cm	2,7	22,97			
	2,7	21,14			
	2,7	21,47	<b>21,86</b>	0,98	1,10
0-10 cm	3	23,18			
	3	22,33			
	3	22,66	<b>22,72</b>	0,43	0,48
0-10 cm	3,4				
	3,4				
0-10 cm	4,2	10,00			
	4,2	10,00			
	4,1 5	10,08	<b>10,02</b>	0,05	0,05

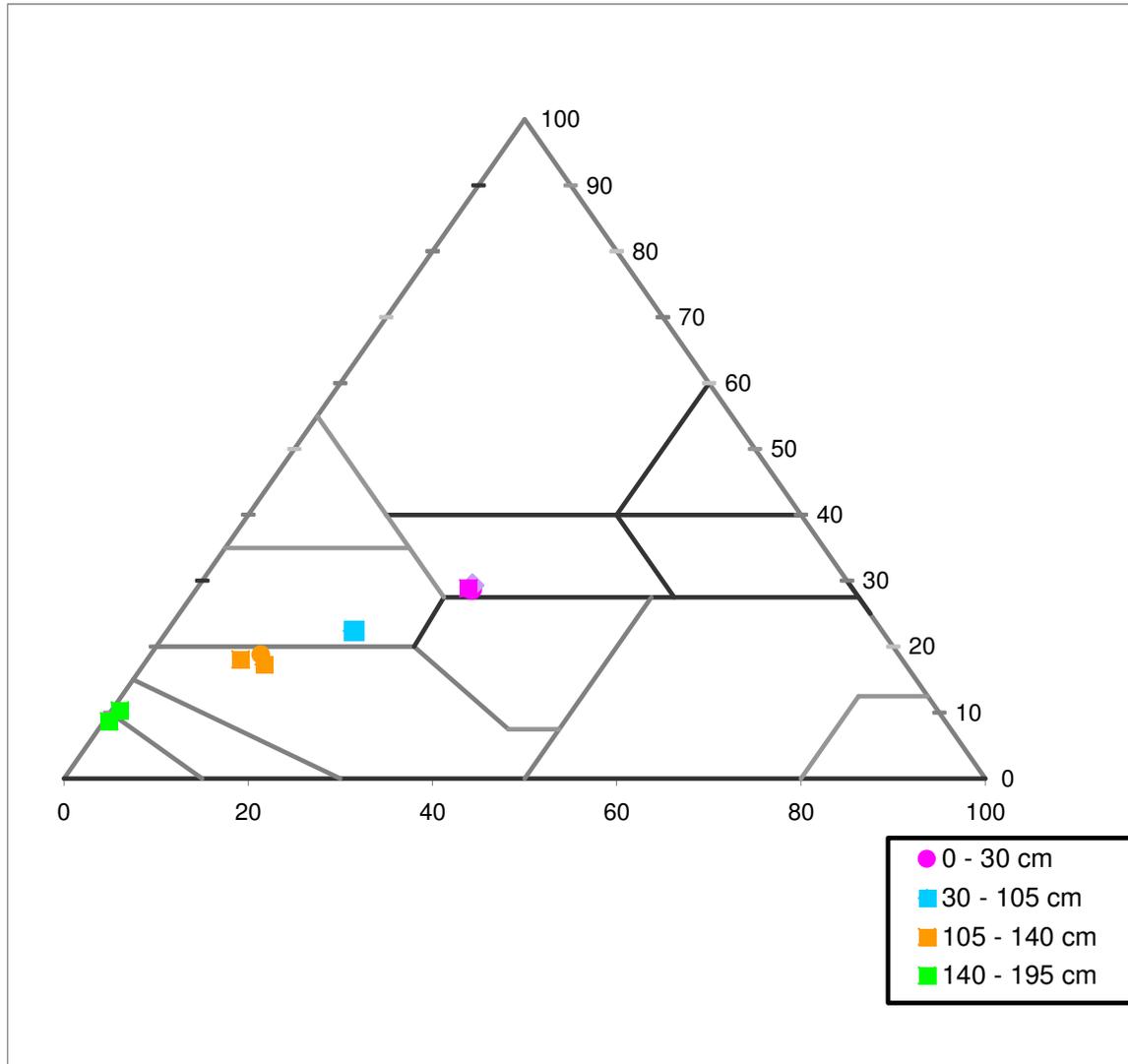
## ➤ De 20 à 30 cm

Profondeur	pF	Contenu en eau (% volume)	Moyenne	Desv.Stand.	Int.Confiance (95%)
20-30 cm	0	41,90			
	0	43,29			
	0	33,63	<b>39,61</b>	5,22	5,91
20-30 cm	0,4	41,12			
	0,4	42,45			
	0,4	32,69	<b>38,75</b>	5,29	5,99
20-30 cm	1	40,65			
	1	42,05			
	1	32,13	<b>38,28</b>	5,37	6,08
20-30 cm	2	35,62			
	2	35,86			
	2	26,27	<b>32,58</b>	5,47	6,19
20-30 cm	2,3	33,15			
	2,3	33,43			
	2,3	23,20	<b>29,93</b>	5,83	6,59
20-30 cm	2,7	27,75			
	2,7	27,55			
	2,7	17,27	<b>24,19</b>	5,99	6,78
20-30 cm	3	30,08			
	3	30,37			
	3	30,20	<b>30,22</b>	0,15	0,17
20-30 cm	3,4	22,12			
	3,4	23,10	<b>22,61</b>	0,70	0,97
20-30 cm	4,2	13,34			
	4,2	13,28			
	4,15	13,31	<b>13,31</b>	0,03	0,04

### Annexe 3 : Graphique des essais d'infiltration à charge constante aux différentes profondeurs



### Annexe 4 : Triangle des textures



Les points de la même couleur correspondent aux différents échantillons réalisés à la même profondeur.

**Annexe 5 : Tableau de valeurs des analyses chromatographiques**

n° Échantillon	Profondeur	Profondeur	[Br-] T1	[Br-] T2
		cm	mg/l	mg/l
1	0	0-5	72,018	28,484
2	5	5-10	182,184	0
3	10	10-15	269,368	374,634
4	15	15-20	382,006	497,943
5	20	20-25	303,035	405,983
6	25	25-30	67,515	197,287
7	30	30-35	4,511	52,329
8	35	35-40	1,236	7,673
9	40	40-45	0	0
10	45	45-50	0	0
11	50	50-55	0	0,989
12	55	55-60	0	1,106
13	60	60-65	0	0
14	65	65-70	0	0
15	70	70-75	0	0
16	75	75-80	0	0
17	80	80-85	0	0
18	85	85-90	0	0
19	90	90-95	0	0
20	95	95-100	0	0
21	100	100-105	0	18,62
22	105	105-110	0	0
23	110	110-115	0	0
24	115	115-120	0	0
25	120	120-125	0	0
26	125	125-130	0	0
27	130	130-135	0	0
28	135	135-140	0	0
29	140	140-145	0	0
30	145	145-150	0	0
31	150	150-155	0	0
32	155	155-160	0	0
33	160	160-165	0	0
34	165	165-170	0	0
35	170	170-175	0	0
36	175	175-180	0	0
37	180	180-185	0	0
38	185	185-190	0	0
39	190	190-195	0	0
40	195	195-200	0	0

**Annexe 6 : Tableau de valeurs de la conductivité électrique**

n° échantillon	Profondeur (cm)	Conductivité. T-0 mS/cm	Conductivité. T-1 mS/cm	Conductivité. T-2 mS/cm
1	5	340,0	324,0	344,0
2	10	296,0	345,0	324,0
3	15	316,5	431,0	503,0
4	20	325,5	478,0	635,0
5	25	315,5	452,0	573,0
6	30	312,5	348,0	472,0
7	35	396,5	325,0	1677,0
8	40	2010,0	463,0	1783,0
9	45	1932,5	2010,0	1501,0
10	50	1564,5	2050,0	1838,0
11	55	2070,0	1649,0	1287,0
12	60	1713,5	994,0	1091,0
13	65	1266,5	1083,0	650,0
14	70	1477,5	443,0	1139,0
15	75	977,0	490,0	1184,0
16	80	886,5	597,0	1137,0
17	85	342,5	1026,0	909,0
18	90	311,5	998,0	618,0
19	95	360,5	1212,0	697,0
20	100	970,5	623,0	1179,0
21	105	1218,5		814,0
22	110	544,0	1639,0	629,0
23	115	443,5	708,0	364,0
24	120	1377,0	368,0	680,0
25	125	2190,0	417,0	1126,0
26	130	1219,0	864,0	431,0
27	135	3030,0	1196,0	2290,0
28	140	1030,0	2420,0	898,0
29	145	290,5	1419,0	400,0
30	150	243,0	600,0	226,0
31	155	245,5	162,9	119,4
32	160	325,0	133,5	105,2
33	165	921,0	125,4	99,9
34	170	205,5	112,0	90,5
35	175	253,0	109,8	88,8
36	180	217,2	114,5	99,4
37	185	222,6	109,0	122,4
38	190	196,7	149,4	129,1
39	195	176,2	160,8	120,5
40	200			138,5

Les cases bleues correspondent aux échantillons altérés donc à ne pas prendre en compte

**Annexe 7 : Tableau de valeurs de la densité apparente**

n° échantillon	Profondeur (cm)	Densité T-0 (g/cm <sup>3</sup> )	Densité T-1 (g/cm <sup>3</sup> )	Densité T-2 (g/cm <sup>3</sup> )
1	5	0,41	1,06	0,99
2	10	1,12	1,18	0,97
3	15	1,13	1,28	1,08
4	20	1,21	1,31	1,31
5	25	1,32	1,17	1,32
6	30	1,30	1,27	1,27
7	35	1,36	1,28	1,27
8	40	1,28	1,15	1,26
9	45	1,24	1,21	1,25
10	50	1,26	1,26	1,27
11	55	1,30	1,35	1,27
12	60	1,30	1,38	1,30
13	65	1,19	1,40	1,29
14	70	1,36	1,38	1,22
15	75	1,34	1,36	1,24
16	80	1,41	1,42	1,27
17	85	1,33	1,32	1,28
18	90	1,35	1,15	1,27
19	95	1,40	1,37	1,29
20	100	1,39	0,41	1,27
21	105	1,37	1,28	1,18
22	110	1,29	1,35	1,38
23	115	1,34	1,32	1,47
24	120	1,38	1,47	1,39
25	125	1,46	1,57	1,48
26	130	1,45	1,50	1,45
27	135	1,43	1,43	1,37
28	140	1,47	1,40	1,31
29	145	1,47	1,32	1,51
30	150	1,51	1,51	1,54
31	155	1,48	1,52	1,56
32	160	1,46	1,55	1,44
33	165	1,52	1,53	1,50
34	170	1,49	1,54	1,45
35	175	1,48	1,42	1,46
36	180	1,43	1,33	1,42
37	185	1,52	1,49	1,45
38	190	1,56	1,62	1,44
39	195	1,43	1,01	1,54
40	200	1	1	1,45

Les cases bleues correspondent aux échantillons altérés donc à ne pas prendre en compte

## Annexe 8 : Tableau des précipitations journalières d'Arganda del Rey

Nombre de jours cumulés	Nombre de jours	Pluie (cm/jr)
30	30	0
38	8	0
39	1	0,39
43	4	0
47	4	0,58
66	19	0
67	1	0,13
94	27	0
95	1	0,92
113	18	0
115	2	0,32
129	14	0
130	1	0,3
132	2	0
133	1	3,1
150	17	0
154	4	1,1625
170	16	0
171	1	0,13
199	28	0
201	2	1,835
227	26	0
228	1	0,6
229	1	0
230	1	1,6
231	1	0
232	1	0,9
241	9	0
244	3	0,4
251	7	0
252	1	1
253	1	0
254	1	4,5
255	1	0
256	1	5
277	21	0
280	3	0,53

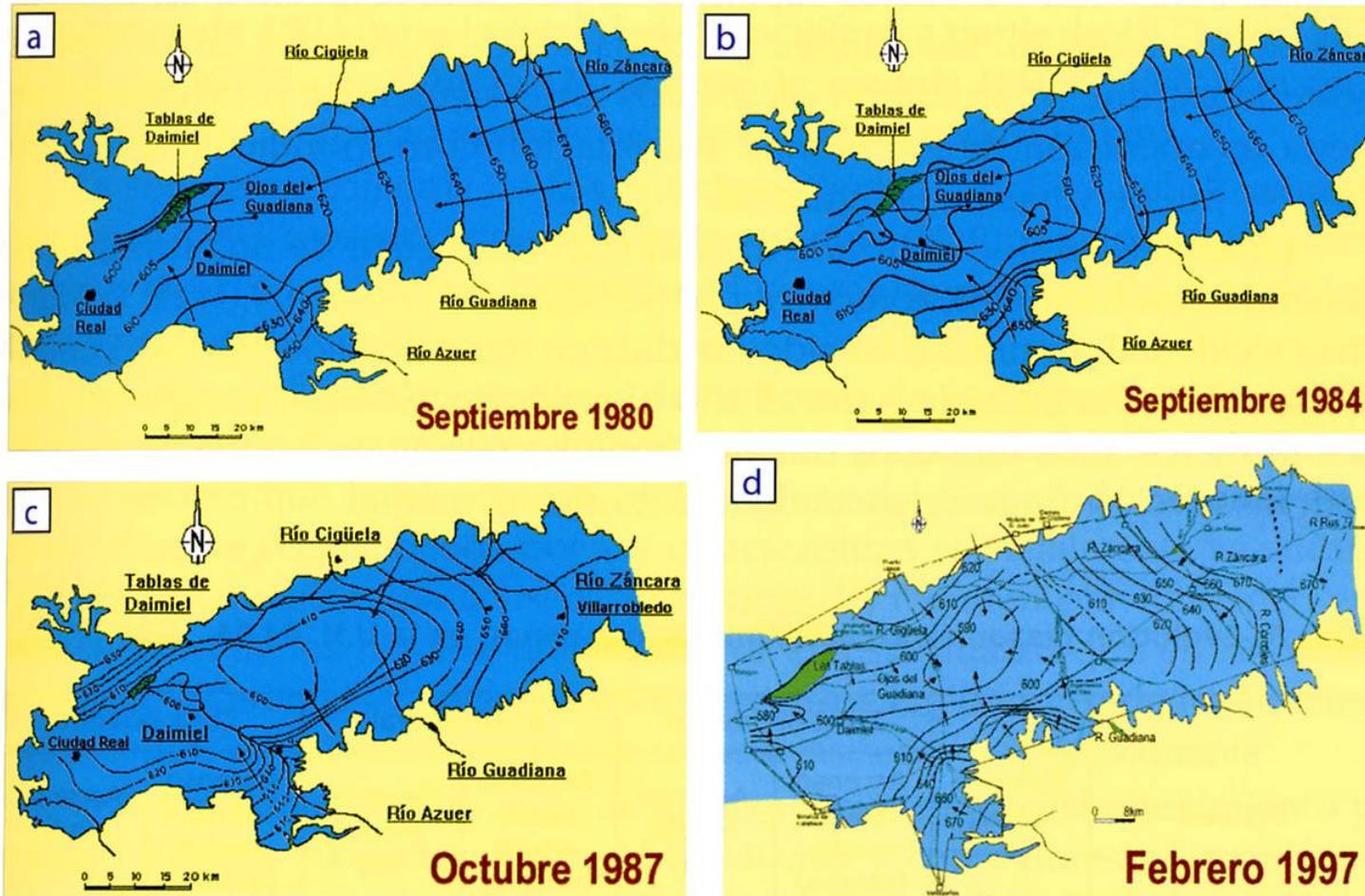
Nombre de jours cumulés	Nombre de jours	Pluie (cm/jr)
293	13	0
296	3	0,61
299	3	0
301	2	0,61
303	2	0
304	1	2,2
327	23	0
328	1	3
335	7	0
336	1	2,4
343	7	0
348	5	0,628
352	4	0
356	4	0,695
373	17	0
377	4	1,08
378	1	0
382	4	0,3125
384	2	0
385	1	0,51
387	2	0
388	1	0,09
389	1	0
390	1	0,92
391	1	0
392	1	0,85
396	4	0
398	2	0,3575
400	2	0
401	1	1,1
403	2	0
405	2	1,15
406	1	0
407	1	0,57
411	4	0
412	1	0,57
488	76	0

Le premier jour de l'essai de traçage correspond au 31<sup>ème</sup> jour car les 30 premiers jours servent de mise à l'équilibre du système avec homogénéisation de l'humidité.

**Annexe 9 : Tableau de valeurs de l'ETP estimée par Thornthwaite et de la Pression potentielle atmosphérique**

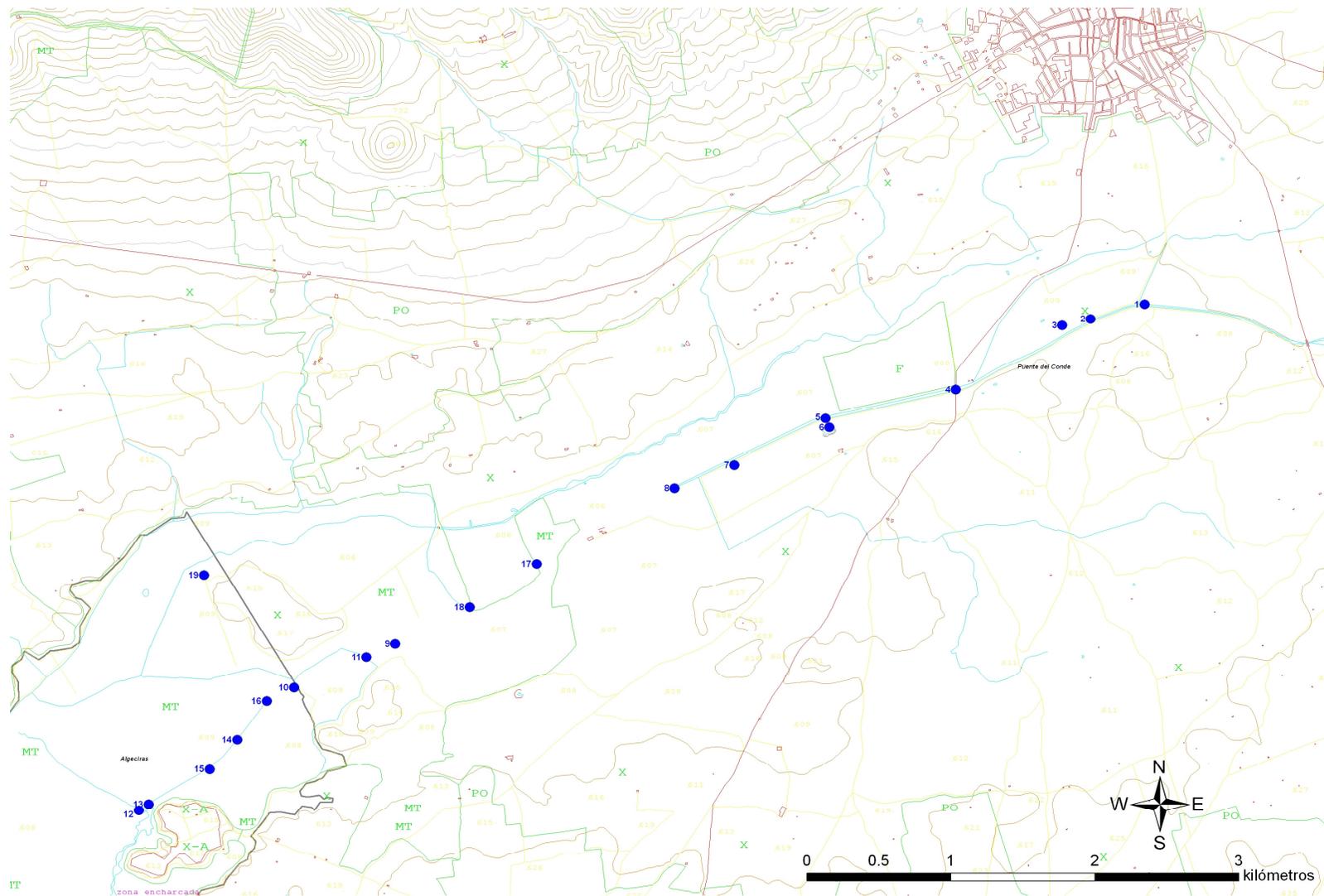
<b>Date</b>	<b>T en Kelvin</b>	<b>Humidité moyenne</b>	<b>i Indice thermique mensuel</b>	<b>ETP par jour</b>	<b>HA Pression Potentielle atmosphérique (cm)</b>
<b>juin-07</b>	292,90	0,32	8,00	0,46	-1574924
<b>juil-07</b>	297,69	0,24	11,12	1,29	-2016946
<b>août-07</b>	296,84	0,24	10,54	1,07	-1978563
<b>sep-07</b>	293,39	0,50	8,31	0,51	-957040
<b>oct-07</b>	287,58	0,35	4,98	0,17	-1403323
<b>nov-07</b>	280,81	0,30	1,91	0,06	-1611712
<b>déc-07</b>	278,24	0,40	1,03	0,05	-1187105
<b>janv-08</b>	280,60	0,29	1,83	0,06	-1622860
<b>fev-08</b>	281,25	0,38	2,08	0,07	-1271655
<b>mar-08</b>	283,71	0,31	3,10	0,09	-1572795
<b>avr-08</b>	286,39	0,30	4,37	0,14	-1625833
<b>mai-08</b>	288,78	0,31	5,62	0,21	-1608648
<b>juin-08</b>	290,17	0,28	6,39	0,27	-1725453

### Annexe 10 : Historique de la piézométrie de Las Tablas de Daimiel



Fuentes: SGOP (1991), CHG (1997).

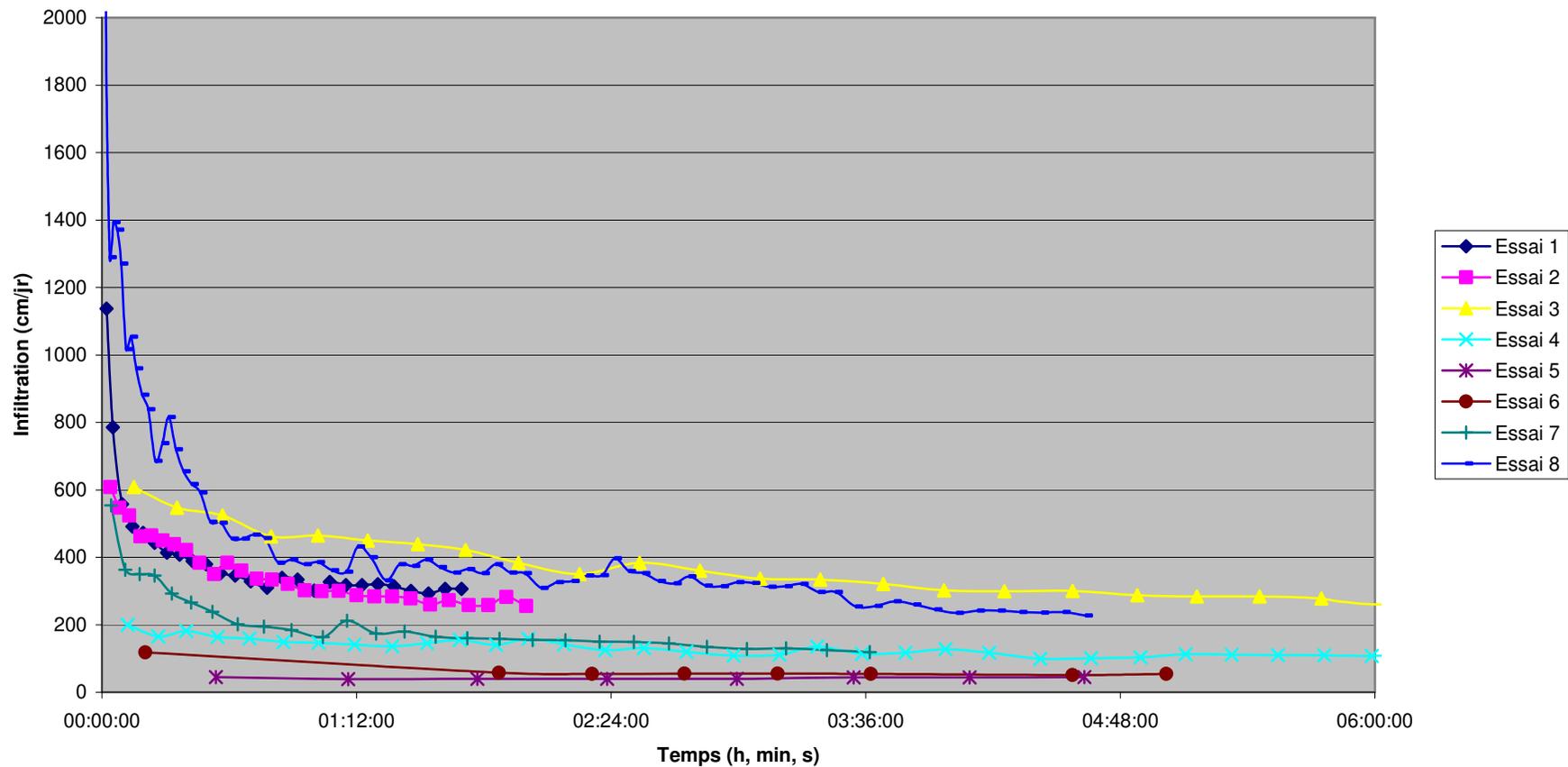
### Annexe 11 : Localisation des différents points du profil du Ciguëla



### Annexe 12 : Essais d'infiltration sur les différents sols observés

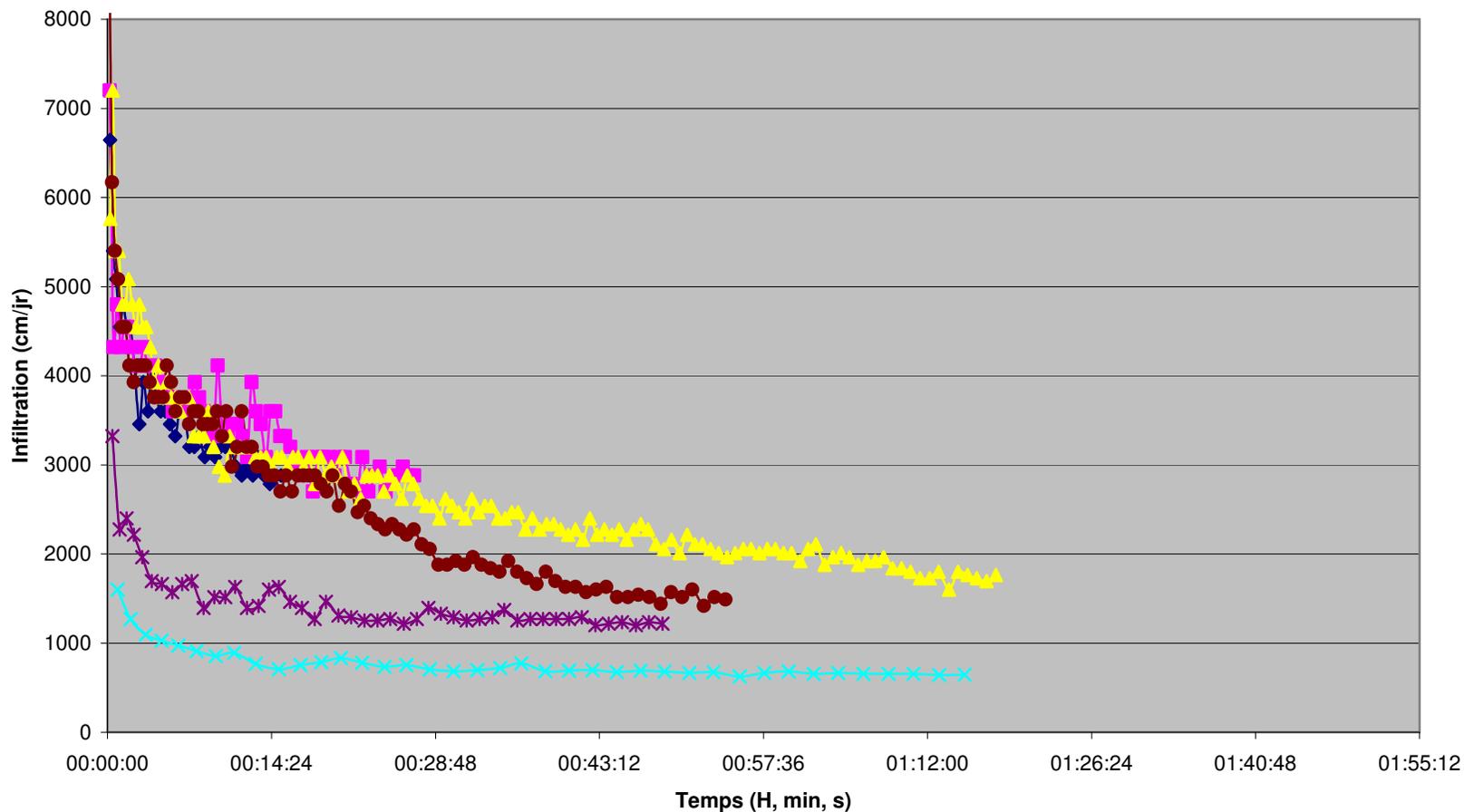
#### ➤ Argiles vertes

Essais d'infiltration sur Argiles vertes



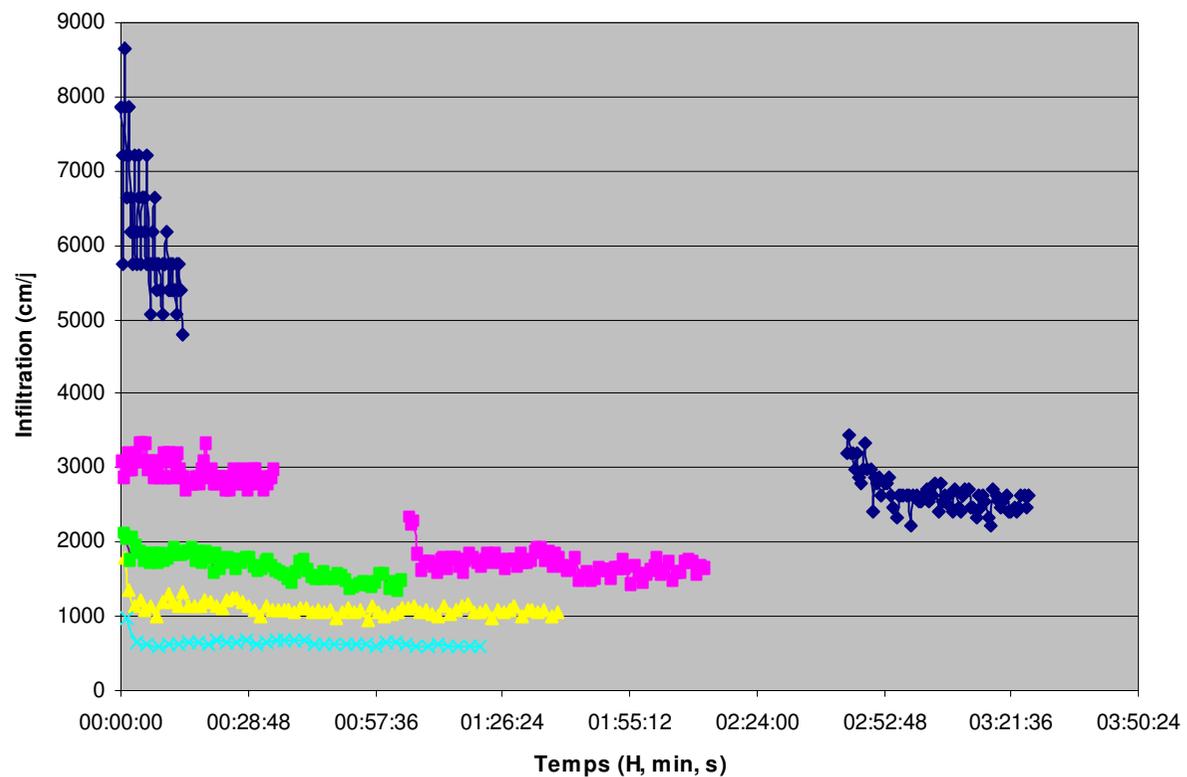
➤ **Tourbe**

**Essais d'infiltration sur Tourbe**



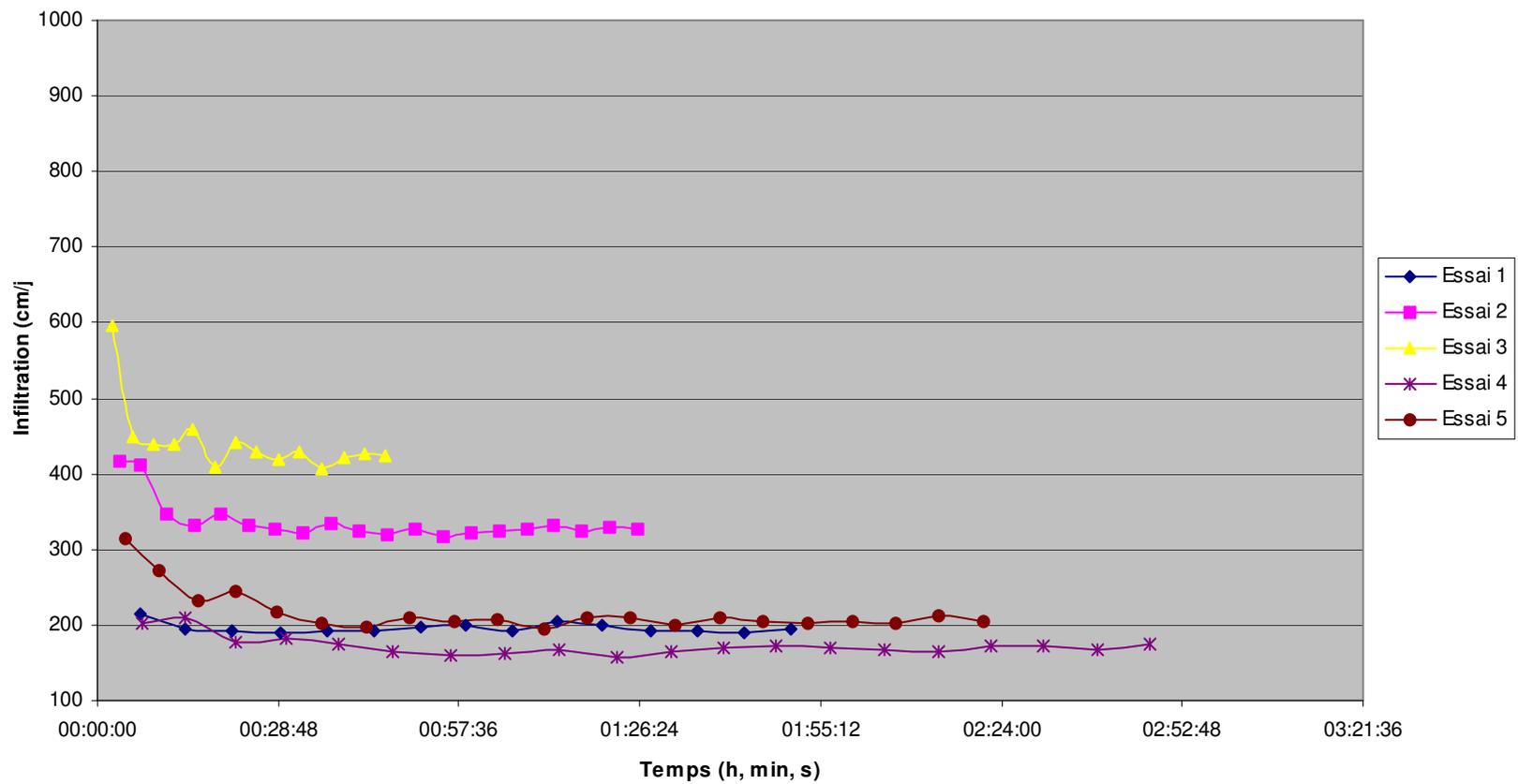
➤ **Charophytes obscures**

**Essais d'infiltration Charophytes obscures**



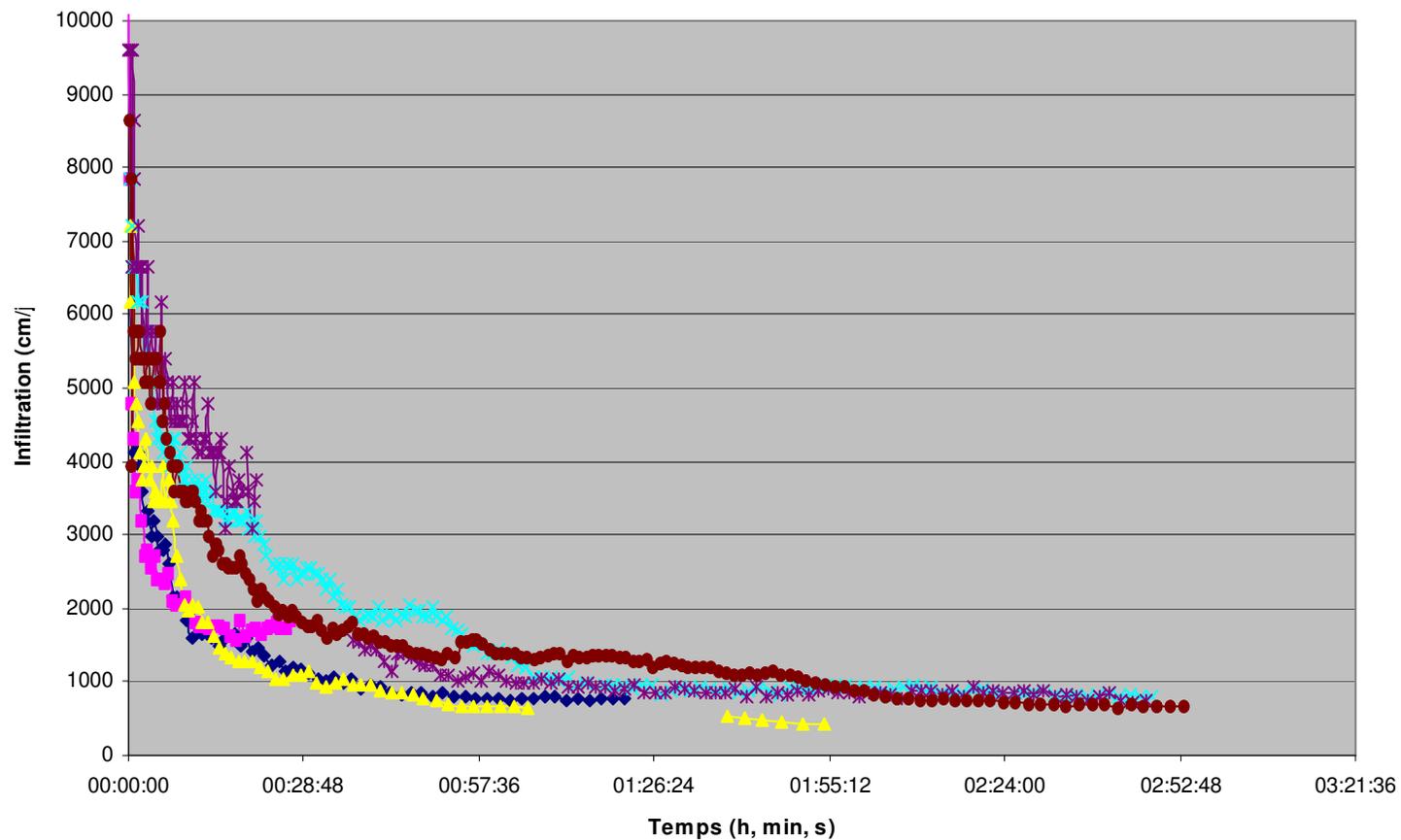
➤ **Charophytes claires**

**Essai d'infiltration Charophytes claires**



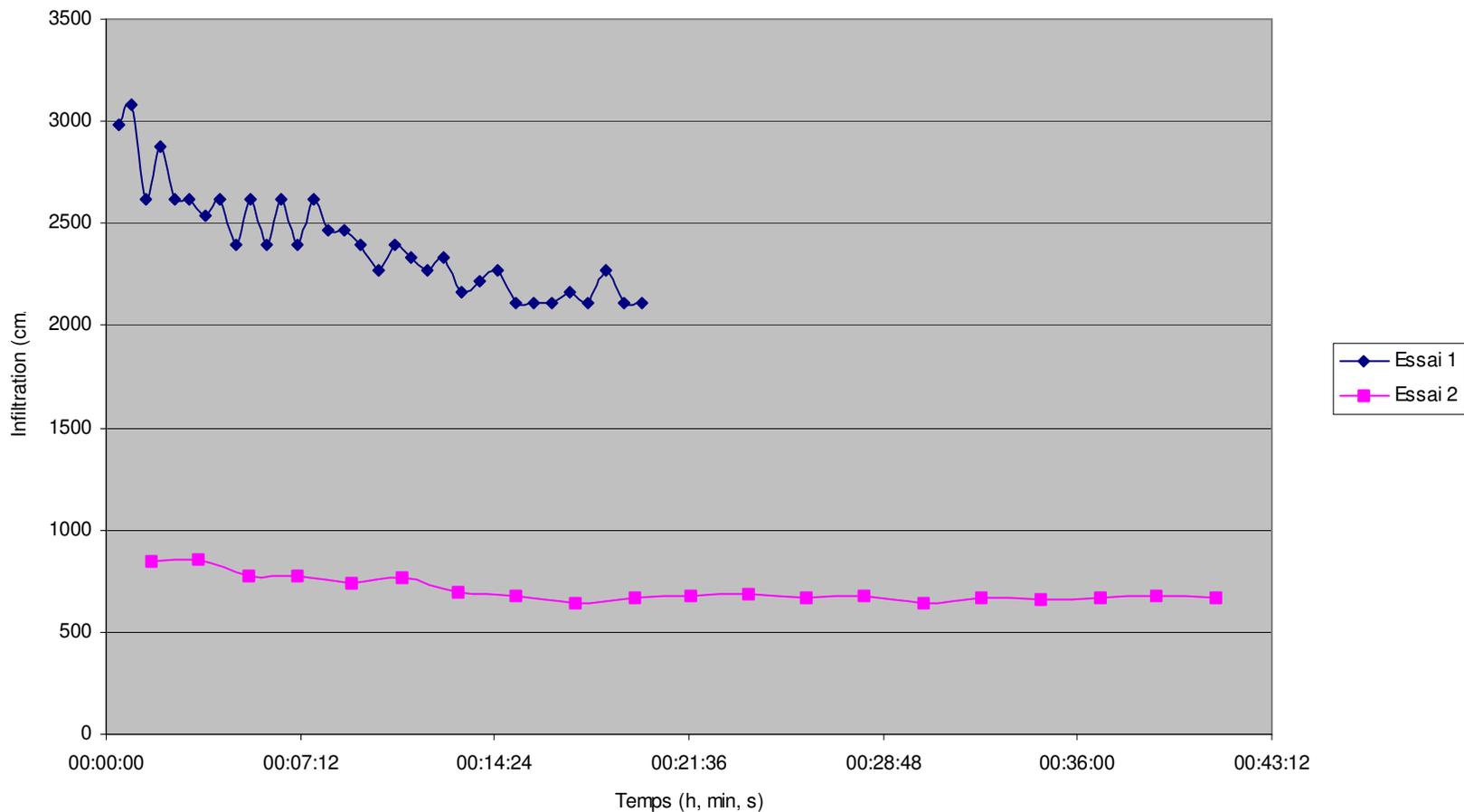
➤ **Limons**

**Essais d'infiltration Limons**



### ➤ Alternance charophytes et matière organique

Essais d'infiltration Alternance charophytes et sol organique



## Annexe 13 : Données du contrôle des puits de las Tablas de Daimiel

### ➤ Novembre 2007

Puits	X_UTM	Y_UTM	Côte (m)	Piézometrie (m)	Temp (°C)
P-01	439965	4332815	609,29	604,11	15,7
P-02	439775	4332362	609,43	602,7	15,7
P-03	439548	4335023	606,59	604,44	16,6
P-04	440114	4337728	613,2	603,2	SEC
P-05	434358	4329691	606	598,96	16,2
P-06	451573	4329577	617	585,36	17,8
P-07	444180	4329090	615	591,53	16,7
P-08	436366	4330245	606,68	601,1	14,1
P-09	434363	4329693	606	593,86	16,2
P-10	438757	4331250	608,47	602,23	15,5
P-11	442402	4330826	620,98	590,98	SEC
P-12	439758	4332389	608,33	603,9	15,8
P-13	443746	4333939	618,9	588,8	17,3
P-14	442746	4335905	608,33	603,36	16,4
P-15	446625	4338600	609,61	605,6	18
P-16	438683	4333348	607,09	604,6	17,3
P-17	436757	4331990	607,56	603,49	

### ➤ Mai 2008

Puits	X_UTM	Y_UTM	Côte (m)	Piézométrie (m)	Temp (°C)	Conductivité hydr.	pH
P-01	439965	4332815	609,29	604,76	15,4	10700	6,59
P-02	439775	4332362	609,43	603,32	14,4	10120	6,65
P-03	439548	4335023	606,59	604,81	14,3	12450	6,3
P-04	440114	4337728	613,2	603,7			
P-05	434358	4329691	606	598,95	15,7	5780	6,36
P-06	451573	4329577	617	587,41	17,9	736	6,53
P-07	444180	4329090	615	593,57	16,8	1331	6,33
P-08	436366	4330245	606,68	600,96	13,9	2300	6,69
P-09	434363	4329693	606	594,76	16,3	3640	6,44
P-10	438757	4331250	608,47	602,54	15	3170	6,65
P-11	442402	4330826	620,98	592,11	17,8	1656	6,57
P-12	439758	4332389	608,33	604,38	11,1	10090	6,85
P-13	443746	4333939	618,9	590,72	17,4	1751	6,66
P-14	442746	4335905	608,33	603,5	15,6	8200	6,31
P-15	446625	4338600	609,61	605,72	14,8	3800	6,34
P-16	438683	4333348	607,09	605,17	15,1	12520	5,8
P-17	436757	4331990	607,56	603,62	17,2	1782	6,55

**Annexe 14 : Données du profil du Cigüela**

<b>Échantillon</b>	<b>CoorX</b>	<b>CoorY</b>	<b><math>\delta^{18}\text{O}</math> ‰</b>	<b>C.E. (mS/cm)</b>	<b>T Eau (°C)</b>	<b>T Air (°C)</b>	<b>Turbidité</b>
<b>1</b>	447980	4339439	-2,73	4480	14,8	16,6	37,2
<b>2</b>	447603	4339329	-4,33	3810	15,2	19,51	19,51
<b>3</b>	447406	4339283	-7,57	1010	17,2	17,2	6,6
<b>4</b>	446667	4338812	-7,15	1320	15,4	18,6	138
<b>5</b>	445765	4338602	-7	1715	14,7	17,6	144
<b>7</b>	445131	4338259	-6,67	1870	14,1	19,4	170
<b>8</b>	444716	4338094	-6,73	1873	15,1	18,3	64
<b>17</b>	443761	4337534	-6,38	1850	16,8	17,2	7,74
<b>18</b>	443294	4337219		2190	17,1	16,9	31,44
<b>9</b>	442777	4336951	-5,61	2450	17,3	26,4	10,1
<b>11</b>	442579	4336854	-5,46	2530	17,7	23,2	9,16
<b>10</b>	442076	4336630	-5,16	2580	17,2	23,4	5,63
<b>16</b>	441887	4336533	-5,28	2660	17,7	20,4	6,63
<b>14</b>	441682	4336249	-5,09	2810	18,8	23,2	42,63
<b>15</b>	441490	4336032	-4,86	2760	18,6	18,7	7,88
<b>13</b>	441067	4335778	-4,1	3050	18,1	22,8	3,64
<b>12</b>	440999	4335733	-3,77	3120	19,1	18,9	7,26
<b>6</b>	445791	4338537	1,36	6130	16,4	10,82	10,82
<b>19</b>	441451	4337451	1,64	12790	17,7	14,4	9,94
<b>Eau de pluie Daimiel</b>	447126	4324488 4	-7.40				