



Rapport de stage

Auteur : Gaël THOMAS

Infiltration de l'eau dans les sols : Développement et utilisation d'infiltromètres

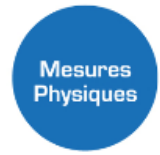
Maître de stage : M. Emmanuel BERTHIER
Professeur tuteur : M. Frédéric DAVID



Image couverture : Goute d'eau par *tomtom14000*, <http://www.pix-populi.fr/forum/>

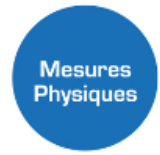


Infiltration de l'eau dans les sols : Développement et utilisation d'infiltromètres



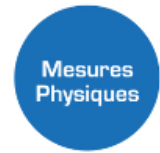
SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES	7
REMERCIEMENTS	9
INTRODUCTION	11
PRESENTATION DE L'ENTREPRISE ET CONTEXTE DU STAGE	13
1.1. STRUCTURE HIERARCHIQUE.....	13
1.2. LE DEPARTEMENT VILLE DURABLE	14
1.3. CONTEXTE DU STAGE.....	15
HYDROLOGIE : THEORIE	17
2.1. INFILTRATION : THEORIE.....	17
1.1.1. <i>Caractérisation d'un milieu poreux</i>	17
1.1.2. <i>Etat de l'eau dans les milieux poreux</i>	17
1.1.3. <i>Écoulement dans un milieu poreux</i>	19
2.2. METHODES DE MESURES	22
1.1.4. <i>Le test de Porchet à charge variable</i>	23
1.1.5. <i>L'infiltromètre à double anneau</i>	23
1.1.6. <i>Le Persan®</i>	24
DEROULEMENT DU STAGE	27
3.1. MESURES D'INFILTRATION SUR SOLS NATURELS : UTILISATION DU PORCHET A CHARGE CONSTANTE	27
1.1.7. <i>Descriptif et objectifs</i>	27
1.1.8. <i>Le Porchet à charge constante</i>	29
1.1.9. <i>Mesures effectuées</i>	32
1.1.10. <i>Conclusion</i>	38
3.2. MESURE D'INFILTRATION SUR CHAUSSEE : AMELIORATION D'UN PROTOTYPE.....	41
3.2.1. <i>Précédent prototype d'infiltromètre pour chaussée</i>	41
3.2.2. <i>Réflexions et objectifs</i>	44
3.2.3. <i>Réalisation du nouveau prototype</i>	46
3.2.4. <i>Utilisation du prototype</i>	49
3.2.5. <i>Conclusion</i>	55
CONCLUSION GENERALE	57
BIBLIOGRAPHIE	58
ANNEXES	59



Liste des figures

Figure 1 : CETE site de Trappes	1
Figure 2 : Infiltration de l'eau dans le sol en condition non saturée	18
Figure 3 : Infiltration de l'eau dans le sol en condition saturée	18
Figure 4 : Phénomène de succion.....	19
Figure 5 : Bulbe de saturation	20
Figure 6 : Variations la conductivité hydraulique en fonction du temps	21
Figure 7 : Classement des sols en fonction de de leur coefficient hydraulique de saturation....	1
Figure 8 : Exemple de système de Porchet permettant la mesure à charge variable.....	1
Figure 9 : Infiltromètre à double anneau à charge constante	24
Figure 10 : L'infiltromètre Persan [®]	24
Figure 11 : Le Porchet à charge constante du CETE de Trappes.....	1
Figure 12 : Système de maintient des électrodes	1
Figure 13 : Tableau de calcul pour le Porchet à charge constante	1
Figure 14 : Valeurs de conductivité hydraulique jour après jour	1
Figure 15 : Conductivité hydraulique en fonction du temps de saturation	37
Figure 16 : Prototype d'infiltromètre du LCPC.....	41
Figure 17 : Schéma de la réduction de section.....	1
Figure 18 : Mastic noir posé sur peinture bitumeneuse	1
Figure 19 : Schéma des flux d'infiltration	43
Figure 20 : Côtes de la réduction de section	43
Figure 23 : Les vérins hydrauliques et la pompe à main.....	47
Figure 21 : Prototype de l'infiltromètre pour chaussée	1
Figure 22 : Commutateur de la pompe hydraulique.....	1
Figure 24 : Manomètre de la pompe hydraulique	48
Figure 25 : Double chape	1
Figure 26 : Prototype d'infiltromètre pour chaussée définitif	50
Figure 27 : Evolution du débit d'infiltration en fonction de temps	52
Figure 28 : Prototype d'infiltromètre pour chaussée avec vase de Mariotte	1
Figure 29 : Boucle de serrage : base	54
Figure 30 : Boucle de serrage : tube de mesure	1



Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon maître de stage Emmanuel Berthier, chef de l'unité hydrologie, gestion des eaux pluviales, qui m'a intégré et accueilli au sein de son équipe pendant la durée du stage.

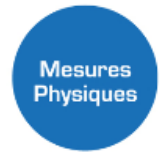
Un grand merci à Didier Gallis, pour son aide, ses idées et ses conseils techniques dans la conception de mon prototype ainsi qu'à chaque fois où j'ai requis son aide.

Mes remerciements vont aussi à David Ramier, pour son attention, son aide et ses renseignements.

Merci également à Jean-Marc Rouaud du LCPC de Nantes pour le matériel qu'il m'a prêté à toutes les personnes du bâtiment 1 du CETE de Trappes ayant pu m'aider au cours du stage.

Merci à Pascal Brivadier de m'avoir accepté dans son bureau pendant 11 semaines.

Et enfin, merci à Mini-Flo, Mensef, Aurore, Michelle, Serge, Yann, Pierre, Bernard, Florian, Rudy, Stéphanie, Céline, Mélisande pour tous les moments conviviaux que nous avons passés ensemble.



Introduction

Le sol se définit comme étant la partie superficielle de l'écorce terrestre et marque la frontière entre 2 mondes : le monde solide et celui de l'air. Il est en permanence soumis à des flux hydriques qui s'y infiltrent plus ou moins profondément, qui s'y déplacent latéralement mais aussi verticalement sous l'effet de la gravité, de la capillarité, de l'évapotranspiration... L'évaluation de ces flux a une importance considérable dans de nombreux domaines : connaître et mesurer les quantités d'eau qui ruissellent, celles qui vont servir à l'alimentation des plantes, celles qui vont s'évaporer ou pénétrer en profondeur pour remplir les nappes souterraines...

Le développement de notre société a profondément modifié les sols. Qu'ils proviennent des décharges, du traitement des eaux usées, des détritiques, des routes, les polluants auxquels sont soumis les sols sont nombreux. De tous types (hydrocarbures, graisse, produits ménager, médicaments, métaux, plastiques...), les particules rejetées par l'homme finissent par être véhiculées dans la nature et les sols environnants. Le ruissellement des précipitations joue un grand rôle dans ces flux.

La connaissance de la capacité des sols naturels et artificiels à conduire ces polluants passe donc par la caractérisation des comportements hydrologiques de ces surfaces, de leur capacité de rétention-épuration des particules. Les comportements hydrologiques des sols sont étudiés depuis de nombreuses années par l'homme qui en a fait une science : l'hydrologie.

La mesure des caractéristiques hydrologiques des sols consiste notamment à connaître la capacité des sols à infiltrer de l'eau. Pour cela des appareils ont été mis au point suite à de nombreuses recherches. Ils sont appelés infiltromètres. Ces instruments, dont le principe est de mesurer le débit à laquelle l'eau s'infiltré dans le sol, sont aujourd'hui encore plus qu'auparavant au cœur de la recherche car ils sont indispensables aux mesures environnementales.

La capacité des sols à infiltrer l'eau est la conductivité hydraulique appelée aussi coefficient de perméabilité ou plus simplement, perméabilité. Le terme perméabilité est aussi parfois employé pour désigner la perméabilité intrinsèque d'un matériau, composante de la conductivité hydraulique ; pour des soucis de simplification, dans la suite de mon rapport, le seul terme de conductivité hydraulique sera employé. La conductivité hydraulique peut être définie comme la capacité du sol à transmettre l'eau à travers le milieu poreux qui le constitue.



Première partie

Présentation et contexte du stage

Présentation de l'entreprise et contexte du stage

1.1. Structure hiérarchique

La DRIEA, Direction Régionale Interdépartementale de l'Équipement et de l'Aménagement est née le 1^{er} juillet 2010 de la fusion de plusieurs organismes publics de direction de recherches, de direction de l'équipement, de l'aménagement dont faisait partie la DREIF, Direction Régionale de l'Équipement de l'Ile de France. LA DRIEA est un organisme dépendant du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement.

Les CETE (prononcez CT) anciennement inclut dans la DREIF représentent la direction politique scientifique et technique de la DRIEA. Ce sont des Centres d'Études Techniques de l'Équipement qui contribuent à la conception et à la mise en œuvre des politiques publiques conduites par le ministère. Ils ont une vocation de recherche, d'innovation, d'expertise, d'études et de diffusion des connaissances scientifiques et techniques. Les CETE sont au nombre de huit répartis sur l'ensemble de la France.

Le CETE IF (Ile de France) est divisé en 5 domaines de recherches : Ville durable, Mobilité, Géosciences Risques, Infrastructures Durables, Laboratoire Eco-matériaux répartis sur 4 sites :

- le site de Trappes où a lieu mon stage appelé anciennement **LROP** (Laboratoire Régional de l'Ouest Parisien)
- le site de Melun
- le site du Bourget
- le site de Paris Miollis (site administratif)

Les locaux de Melun et le Bourget forment l'ancien LREP (Laboratoire Régional de l'Est Parisien)

Le CETE IF rassemble 240 agents dont 200 ingénieurs et techniciens sur l'ensemble des sites. Plus de 1500 études de recherche et de surveillance scientifiques sont effectuées par an, pour un budget de 15M€ par an.



Figure 1: CETE site de Trappes

1.2. Le Département Ville Durable

Le département Ville Durable est organisé en 2 divisions contenant chacune plusieurs unités réparties sur le site de Trappes et de Melun :

- la Division Environnement qui regroupe 24 personnes dans 3 unités :
 - Qualité des eaux et des sols dirigée par Philippe Branchu
 - **Hydrologie, Gestion des eaux pluviales** dirigée par Emmanuel Berthier
 - Qualité de l'air, Durabilité de la signalisation dirigée par Jean-François Petit
- la Division Aménagements, Ecoquartiers

Les thèmes abordés par le département sont :

- ❖ Qualité de l'eau
- ❖ Gestion des eaux pluviales des villes et des infrastructures
- ❖ Risque inondation
- ❖ Qualité de l'air
- ❖ Qualité des sols
- ❖ Lutte contre le bruit
- ❖ Bâtiment et énergie
- ❖ Bilan carbone
- ❖ Expertise environnementale
- ❖ Géothermie
- ❖ Ecoquartiers

L'unité Hydrologie, Gestion des eaux pluviales s'occupe en ce moment de plusieurs sujets. Notamment, la surveillance et gestion de l'évacuation de l'eau sur les routes, l'étude d'une toiture végétalisée (en cours de pose en ce moment même), des études d'infiltrations d'eau pour les assainissements non collectifs...

1.3. Contexte du stage

Le stage consiste dans le traitement de deux sujets en parallèle.

Dans le cadre d'un projet provenant du Projet National de Recherche en hydrologie de 2001 nommé « rôle des surfaces urbaines revêtues dans le fonctionnement des hydrosystèmes urbains », le L.C.P.C. a développé un prototype d'infiltromètre dédié à la mesure de l'infiltration à la surface d'une chaussée (au cours d'un stage par M.RAMUZ en 2002 et d'une étude complémentaire menée par L.LETELIER en mai 2003). L'objectif était de caractériser les propriétés hydriques et hydrodynamiques des enrobés encore actuellement mal connues. Pour l'état saturé, différents tests en laboratoire ont permis d'estimer une infiltration aux environs de 10-8m.s⁻¹. En revanche, aucune information précise n'est disponible pour l'état non saturé, état qui se rapproche le plus des conditions réelles.

Le sujet a ensuite été repris par le LROP en juin 2004, par N. DARBOUX, JD. BALADES, F. RODRIGUEZ, puis mis à jour en octobre 2004 par E. Tessier (stagiaire) et N. Darboux. L'actuel CETE Ile de France ne dispose que d'infiltromètres permettant des mesures de conductivité hydraulique sur les chaussées drainantes, soit, des revêtements à très forte conductivité hydraulique. La technique utilisée par ces infiltromètres n'est pas adaptée aux mesures sur routes classiques.

L'objectif était alors de mettre au point un appareil permettant des mesures *in-situ* (c'est à dire, en extérieur, sur chaussée existante), non destructives (pas de prélèvement d'échantillon) et rapides. L'appareil fonctionne dans une gamme de mesures comprise entre 10⁻⁶ et 10⁻⁹ m/s. Il a été amélioré en de nombreux points, mais deux principaux problèmes, qui nécessitent d'être modifiées limitent encore sa mise en œuvre.

Le stage a pour but d'améliorer le prototype et principalement ces points :

- rapidité de la mise en étanchéité du système
- élargissement de la gamme de mesures
- problème de bulles coincées dans le système

Le deuxième sujet est lié à un projet d'étude nommé Ancres (Assainissement Non Collectif, Rétention et Epuration par les Sols) ayant pour objectif de répondre à certaines questions sur l'impact environnemental de l'ANC. La mission intégrée au projet Ancres par laquelle je suis concerné a pour but de comparer différentes méthodes de mesures de conductivité hydraulique du sol tout en caractérisant les propriétés des sols drainant autour des assainissements non collectifs.

L'étude va durer une semaine et se déroulera en Bourgogne dans le département de l'Yonne, sur des terrains de particuliers possédant des assainissements non collectif. Mon rôle est de rénover, de prendre en main et enfin, d'effectuer des mesures de conductivité hydraulique avec le Porchet à charge constante réalisé au LROP et de mettre au point les calculs qui seront par la suite mis en commun avec les autres membres du projet.



Deuxième partie

Infiltration, Hydrologie : un peu de théorie

Hydrologie : théorie

2.1. Infiltration : théorie

Pour comprendre l'infiltration qui a lieu dans les sols naturels et chaussées, il est nécessaire de caractériser ce qu'est un milieu poreux.

1.1.1. Caractérisation d'un milieu poreux

Un milieu poreux est une région de l'espace occupée par un matériau hétérogène, à plusieurs phases, une des phases au moins étant la phase solide persistante dans le temps et éventuellement déformable. Les vides non occupés par la phase solide constituent l'espace poral ou pores. La porosité est définie, pour un volume (V), comme le rapport entre le volume des pores et le volume total.

$$P = \frac{V_{pores}}{V_{total}}$$

Dans un milieu poreux, l'écoulement se fait dans un réseau très complexe de pores interconnectés. Les lois classiques de la mécanique et de la thermodynamique qui décrivent les transferts de masse et de chaleur concernent des milieux continus et homogènes. Elles ne peuvent être écrites qu'à une échelle dite microscopique, inférieure à la taille des pores, où chaque phase peut être considérée comme un milieu continu.

L'arrangement des particules est généralement très complexe, on les caractérise ainsi par des concepts de structures qualitatifs :

- structure de particules isolées (particules séparées les unes des autres)
- structure massive (particules liées en gros blocs de dimension importante)
- structure intermédiaire (particules liées en petits grumeaux)

Pour des études d'écoulement, on caractérise plus régulièrement les milieux poreux par le concept de connectivité. Un milieu est connecté si deux points appartenant à ce milieu peuvent être reliés par un chemin interne à ce milieu. On peut définir trois types de connectivité :

- pores non connectés
- pores simplement connectés (il existe un seul chemin possible)
- pores multiconnectés (il existe plusieurs chemins possibles)

Le concept de connectivité est cependant très difficile à appliquer sur le terrain car c'est une caractéristique fortement variable dans l'espace et le temps.

1.1.2. Etat de l'eau dans les milieux poreux

Dans la théorie des milieux poreux, on caractérise généralement l'eau liquide par deux variables : sa quantité et son état énergétique.

La quantité est représentée par la teneur en eau volumique qui est le rapport volumique d'eau contenue dans un solide sur le volume de ce solide.

$$\theta = \frac{V_{eau}}{V_{total}}$$

On dit que le milieu est saturé d'eau lorsque la teneur en eau volumique est égale à la porosité, c'est à dire, quand tous les pores sont remplis d'eau.

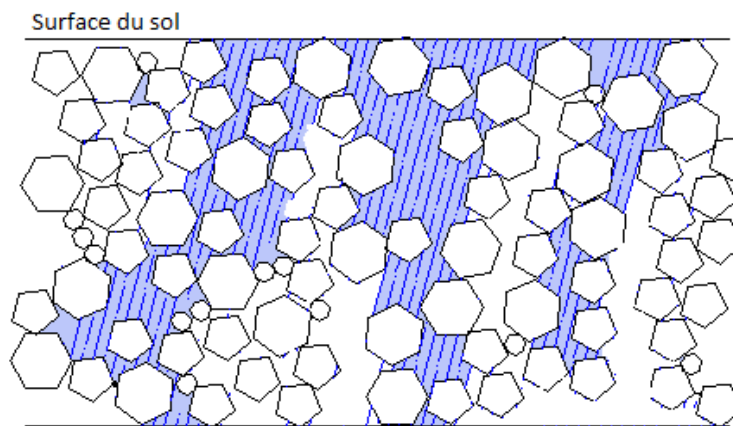


Figure 2 : Infiltration de l'eau dans le sol en condition non saturée

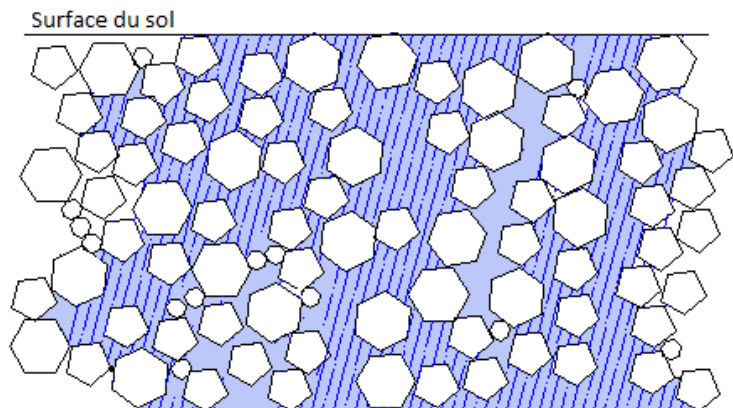


Figure 3 : Infiltration de l'eau dans le sol en condition saturée

L'état énergétique correspond lui à la charge hydraulique. On caractérise ainsi son énergie potentielle et on néglige l'énergie cinétique étant donné les vitesses d'écoulement très faibles.

La charge hydraulique (H) totale peut être considérée comme étant la somme de la charge gravitationnelle (z), de la charge de pression (h). Elle est assimilée à une hauteur mesurée en mètres.

$$H = z + h$$

La charge gravitationnelle est la force qui attire tout objet vers le centre de la Terre, force qui est égale au poids de cet objet. Elle est définie en un point par l'altitude de ce point par rapport à un niveau référence.

La charge de pression est représentée par h où h est la hauteur d'eau au-dessus du point considéré. Ainsi, la pression atmosphérique n'est pas prise en compte.

Une charge de pression positive revient à une pression hydraulique plus élevée que celle de l'atmosphère. Cette charge est égale à la hauteur de submersion au-dessus de la surface considérée.

Une charge de pression négative correspond à une sous-pression (inférieure à la pression atmosphérique). Elle résulte des forces de capillarité et d'adsorption dues à la phase solide qui attirent et lient l'eau : on parle de succion.

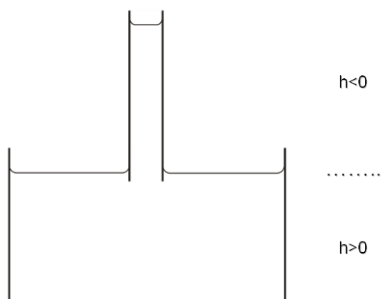


Figure 4 : Phénomène de succion

1.1.3. Écoulement dans un milieu poreux

Afin d'établir les équations qui régissent l'écoulement de l'eau, il est nécessaire de faire des hypothèses concernant le milieu et les écoulements :

- l'écoulement est isotherme
- l'approche est monophasique : pas de prise en compte du mouvement de la phase gazeuse qui est considérée comme à pression constante égale à la pression atmosphérique ; la phase solide est considérée comme indéformable et immobile.
- l'eau est pure, incompressible.

1.1.3.1 Equation dynamique

Les écoulements d'eau dans un milieu poreux sont provoqués par les différences d'état énergétique de l'eau en différents points du milieu, l'écoulement se faisant de l'état énergétique le plus élevé vers le plus faible (l'équilibre est atteint si l'état énergétique est constant). Henry Darcy (1803-1858), ingénieur des Ponts et Chaussées a montré qu'en milieu saturé, la vitesse de l'eau entre deux points est proportionnelle au gradient de l'état énergétique entre ces deux points.

$$F = \frac{Q}{S} = -K * \frac{\Delta H}{L} \quad \text{Loi de Darcy}$$

F : débit par unité de surface (m/s)

Q : débit d'écoulement du liquide, (m³/s)

S : aire de contact liquide-sol (m²)

K : conductivité hydraulique du milieu (m/s)

$\frac{\Delta H}{L}$: gradient hydraulique du milieu poreux où ΔH est la charge hydraulique et L la longueur de sol mouillé.

❖ *Bulbe de saturation*

Les mesures d'infiltration de l'eau dans les sols se fait à partir d'une source locale différente d'une infiltration de pluie également répartie sur le sol. L'eau s'infiltré donc en formant un bulbe en dessous de la source dû à la dualité des forces de gravité et de succion des parois.

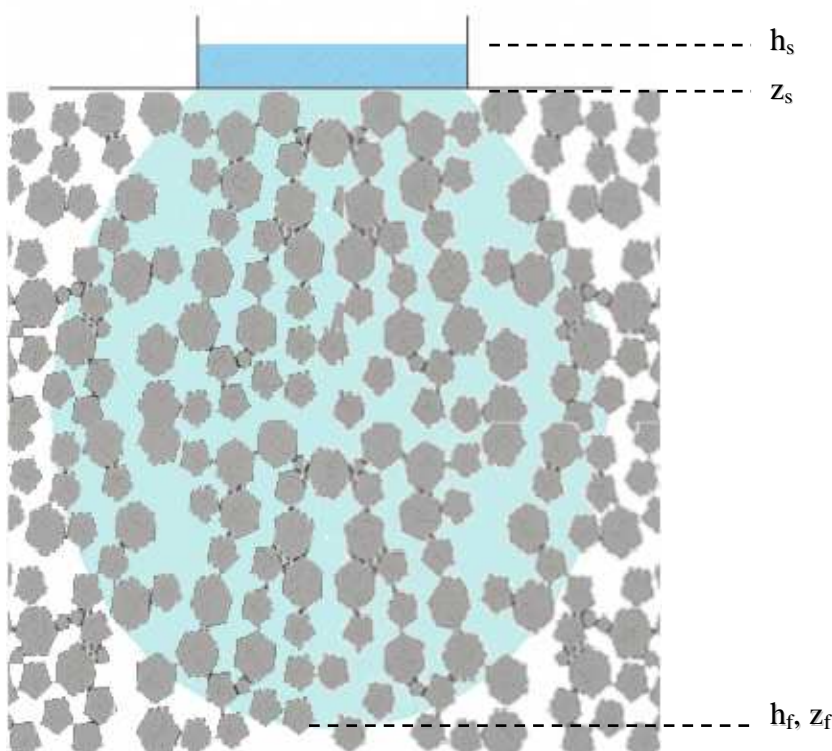


Figure 5 : Bulbe de saturation

Le gradient hydraulique est défini comme suit :

$$\text{On a : } H_s = h_s + z_s$$

$$\text{Et } H_f = h_f + z_f$$

On peut en déduire l'écriture suivante du gradient :

$$\frac{\Delta H}{L} = \frac{H_f - H_s}{z_f - z_s} = \frac{h_f + z_f - h_s - z_s}{z_f - z_s}$$

On prend z_s comme référence des hauteurs (égale à zéro).

On obtient alors :

$$\frac{\Delta H}{L} = \frac{h_f - z_f - h_s}{-z_f} = 1 + \frac{h_s - h_f}{z_f}$$

1.1.3.2 Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique est une propriété liée aux caractéristiques du milieu poreux, c'est à dire à la taille, à la forme, au nombre de pores conducteurs du milieu poreux ; mais elle dépend aussi des variations de l'état du sol.

En effet, alors que le sol est humidifié et se sature peu à peu, la perméabilité va décroître avec le temps jusqu'à atteindre une valeur minimum appelée conductivité hydraulique de saturation.

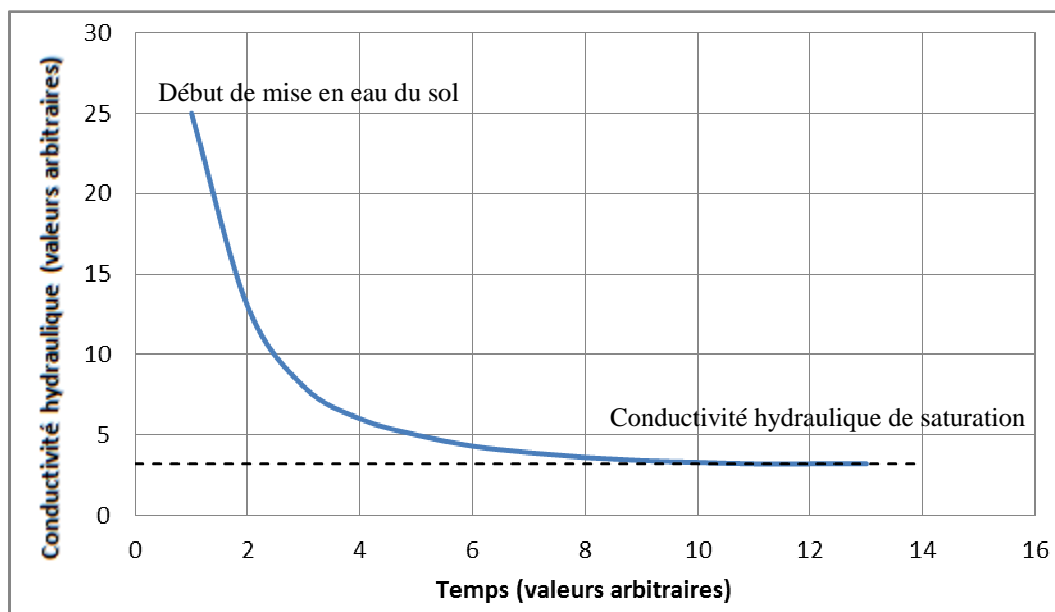


Figure 6 : Variations la conductivité hydraulique en fonction du temps

En admettant les hypothèses faites, à saturation, la conductivité hydraulique ne dépend plus que des caractéristiques du milieu poreux.

La conductivité hydraulique permet d'établir un classement des sols en fonction de leur capacité à infiltrer l'eau :

$K_s \text{ ms}^{-1}$	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}
Qualification	perméable		semi-perméable			impermeable				
Composition granulométrique approximative	graviers		sables grossiers à sables fins		sables très fins limons grossiers		limons fins, argiles			

Figure 7 : Classement des sols en fonction de de leur coefficient hydraulique de saturation

Les chaussées se classent généralement dans les mêmes gammes de conductivité hydraulique que les argiles.

2.2. Méthodes de mesures

Il existe de nombreuses méthodes de mesure de la conductivité hydraulique dans les sols adaptées aux différentes situations, textures, gammes de mesure. Les mesures peuvent être réalisées soit en laboratoire soit *in situ* c'est-à-dire directement sur le sol à analyser.

Les mesures faites en laboratoire consistent à effectuer un carottage et à le ramener dans l'enceinte du laboratoire afin de réaliser des tests de conductivité hydraulique dessus. Cette technique permet de réaliser des mesures précises dans des conditions de température, de pression, bien contrôlées. Le test en laboratoire présente aussi l'avantage de pouvoir effectuer des mesures à répétition après une longue attente permettant de s'assurer de la conductivité hydraulique et d'en déduire des incertitudes de mesure.

Cependant, les mesures en laboratoire, si elles présentent de nombreux avantages, ne sont pas toujours représentatives de la réalité. Les conditions de mesures dans l'environnement extérieur étant ce qu'elles sont, c'est-à-dire extrêmement variables, il est difficile de bien les reproduire en laboratoire. La variabilité géographique sur une surface relativement réduite est aussi un problème majeur.

Les mesures *in situ* restent très largement utilisées, parfois en complément des mesures de laboratoire, mais aussi pour une question de coût et de rapidité.

Il existe de nombreux appareils conçus par divers laboratoires et entreprises permettant de mesurer la conductivité hydraulique *in situ*.

1.1.4. Le test de Porchet à charge variable

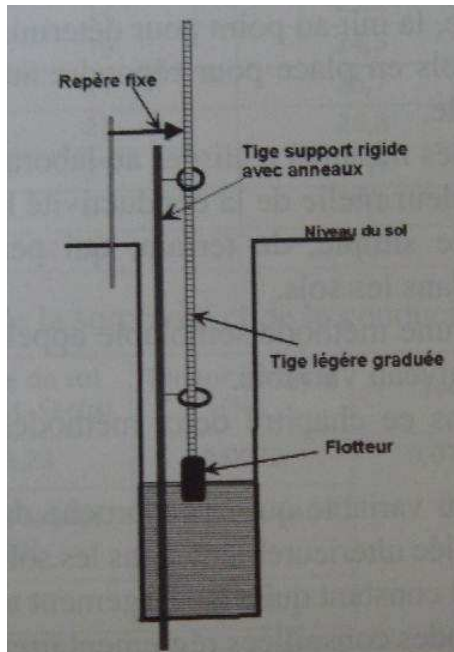


Figure 8 : Exemple de système de Porchet permettant la mesure à charge variable

C'est le test le plus simple qui existe. Le test de Porchet consiste à creuser un trou de surface et de profondeur connue, à y placer une certaine hauteur d'eau et à mesurer le temps mis pour par l'eau pour s'infiltrer. Il est parfois nécessaire de placer quelques centimètres de graviers de forte conductivité au fond du trou afin d'empêcher la déformation du trou. La théorie suggère d'attendre au moins 4 heures que les parois du trou saturer.

Le calcul de conductivité hydraulique est fait grâce à la loi de Darcy en admettant que le gradient hydraulique vaut 1 du fait que l'humectation préalable était longue et en tenant compte de la variation de hauteur d'eau.

Les avantages du test sont une mise en œuvre rapide, à faible coût et avec peu de matériel.

Cependant, la mesure effectuée n'est pas la vraie conductivité hydraulique car elle est fonction de la hauteur d'eau et du diamètre du trou de tarière. La hauteur d'eau, et donc la surface de sol en contact avec l'eau, n'est pas la même tout au long de la mesure. La décroissance de la hauteur d'eau ne permet pas non plus de tracer un profil de variation de l'infiltration en fonction du temps, ce qui empêche la vérification du régime (s'il est bien permanent ou non).

1.1.5. L'infiltromètre à double anneau

Il est composé de deux anneaux concentriques. L'anneau extérieur est rempli d'eau qui va s'écouler verticalement et saturer le sol. On crée ainsi une « barrière » circulaire qui va favoriser l'infiltration verticale de l'eau contenue dans l'anneau intérieur. Il suffit ensuite de mesurer la diminution de l'eau dans cet anneau et on en déduit le flux d'infiltration.

Les anneaux extérieurs et intérieurs sont remplis à la même hauteur d'eau afin que celle-ci s'infiltrer à la même vitesse autour et dans de l'anneau de mesure.

Les anneaux sont biseautés et doivent être enfoncés dans le sol jusqu'à la profondeur voulue mais il est aussi possible d'utiliser des anneaux de surface ; il faut dans ce cas placer des joints étanches entre les anneaux et le sol.

Cette technique permet de mesurer une infiltration verticale tout en gardant une charge constante au cours de la mesure.



Figure 9 : Infiltromètre à double anneau à charge constante

1.1.6. Le Persan[®]

Le PERSAN[®] est basé sur le principe d'une réduction de section entre la base de l'infiltromètre et le tube au sein duquel fluctue le niveau d'eau. Bien que faible, le débit vertical à travers la base, ramené à la section du cylindre supérieur, se traduit par une variation très nette et mesurable du niveau d'eau. Le cylindre supérieur est amovible, pour permettre de s'adapter aux conditions de conductivité hydraulique.

La deuxième technique du Persan repose sur le fait de s'intéresser aux variations d'infiltration durant la période d'écoulement en régime transitoire.

Son défaut est sa mise en œuvre, longue et délicate. Elle consiste à fixer l'infiltromètre au sol en coulant du ciment tout autour qui met plusieurs heures à sécher. La mesure reste tout de même assez rapide car l'attente d'un régime permanent n'est pas nécessaire.

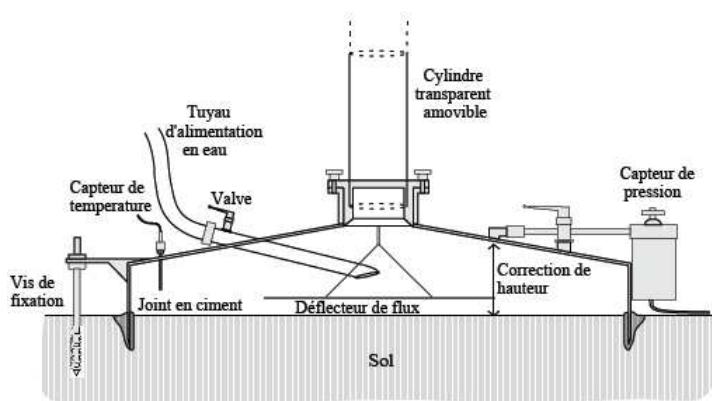


Figure 10 : L'infiltromètre Persan[®]



Troisième partie

Déroulement du stage

Sujet n°1 :

Mesures sur sol naturels : utilisation de Porchet à charge constante

Déroulement du stage

3.1. Mesures d'infiltration sur sols naturels : utilisation du Porchet à charge constante

1.1.7. Descriptif et objectifs

1.1.7.1 Objectifs personnels

Le sujet de mon stage est de réhabiliter le Porchet à charge constante se trouvant au CETE Ile de France. Le test de Porchet à charge constante reprend le principe du test de Porchet mais la charge d'eau dans le trou est maintenue constante tout au long de la mesure. L'appareil avait été fabriqué il y a de nombreuses années en respectant la circulaire de 1997 sur les assainissements non collectifs. Cependant, le CETE était aujourd'hui dépourvu de notice d'utilisation ainsi que de fiche de calcul.

Il a aujourd'hui été décidé de réhabiliter l'appareil dans l'optique de l'utiliser lors d'une mission encadrée par un projet à échelle nationale sur les assainissements non collectifs qu'est le projet Ancres.

Mon stage consiste donc en la remise en état du Porchet, la création d'un protocole d'utilisation après recherche de normes adaptées, et l'établissement des fiches de mesure et calculs. Vient ensuite la manipulation sur le terrain de l'appareil lors d'une mission d'une semaine en Bourgogne dans le département de l'Yonne.

1.1.7.2 Le projet Ancres

Le projet Ancres (Assainissement Non Collectif – Rétention et Epuration par les Sols) a été lancé par Olivier FOUCHÉ-GROBLA, enseignant chercheur au LEESU¹, en juillet 2010. Il s'inscrit dans le cadre du plan d'action ANC du MEEDDM². Une action de ce plan national consiste à organiser et structurer la recherche en matière d'ANC pour favoriser le développement et l'expérimentation de procédés de traitement performants du point de vue économique, sanitaire et environnemental.

Les études en question sont focalisées sur les sols soumis à des eaux usées traitées avant évacuation dans le sol par des systèmes d'assainissement. L'assainissement non collectif (ANC) à l'échelle de l'habitat inclut un ensemble de techniques qui jusqu'à présent ont été considérées comme suffisantes pour neutraliser la part de polluants que le système de prétraitement des eaux n'est pas capable de détruire.

¹ Laboratoire Eau, Environnement Système Urbains est un laboratoire commun de l'École des Ponts ParisTech, l'Université Paris-Est Créteil, l'Université Paris-Est Marne-la-Vallée et AgroParisTech.

² Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer actuellement devenu le Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement

Si la théorie et les anciennes études admettent l'efficacité des installations actuelles pour des pollutions « classiques », la dégradation et la migration de polluants plus complexes, que sont les substances qui témoignent d'une part de la modernisation des techniques d'analyse et d'autre part de l'évolution des produits de nettoyage, d'hygiène corporelle et de santé au sein des ménages : les surfactants, les biocides, les médicaments.

Pour cela, il est entre autre question de vérifier si la fonction de transfert des polluants représentée par le couple rétention/épuration des sols permet de façon satisfaisante l'infiltration d'une eau usée traitée. L'évaluation de ces propriétés passe par l'établissement de la valeur de la conductivité hydraulique du sol.

L'objectif d'Ancre est de réaliser des études techniques sur les filières de traitement actuellement utilisées en ANC, afin de mettre en place une méthodologie de caractérisation de certaines fonctions du sol soumis à l'ANC. C'est-à-dire notamment d'évaluer les appareils adaptés à l'étude des sols destinés à l'ANC.

Pour avoir une idée des chiffres, 5,4 millions d'installations d'assainissement non collectif couvrent encore les besoins de 13 millions de personnes et chaque année, entre 100 000 et 150 000 installations neuves ou réhabilitées sont réalisées.

1.1.7.3 La mission en Bourgogne

La mission d'une semaine en Bourgogne à laquelle le CETE Ile de France participe fait partie intégrante du projet Ancre. La mise en place du rapport a besoin de données de terrain mesurées par les dispositifs d'observation.

Du 23 au 27 mai, nous sommes donc partis dans l'Yonne vers Toucy pour effectuer des mesures avec le Porchet. Des représentants de différents organismes participent à cette mission, amenant chacun son matériel et ses compétences propres :

Organismes	Représentants	Travaux effectués, Matériel
CEMAGREF ³	C. Boutin, V. Dubois, N. Forquet	Mesures avec Perméamètre double anneau, perméamètre de Guelph ⁴ , appareil de mesure de résistivité du sol, appareil de mesure des gaz du sol
CETE Ile de France	E. Berthier, D. Ramier, G. Thomas	Mesures avec Porchet à charge constante

³Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts

⁴ Conçu par l'université de Guelph au Canada, l'infiltromètre de Guelph est un appareil qui permet des mesures de conductivité hydraulique comprises entre 10^{-4} et 10^{-8} m/s

LAMI ⁵	P. Breul	Mesures avec Pénétrromètre Panda, appareil permettant de mesurer la force nécessaire à appliquer au sol pour y faire pénétrer une tige métallique, Endoscope, petite caméra permettant de filmer la texture du sol en profondeur
LEESU-Cnam ⁶	C. Saillé, B. Nasri, T. Reboza	Coordination de l'équipe, prélèvements de terres pour analyse enzymatique en laboratoire
Burgéap	A. Bost	Mesures et formation à l'infiltrromètre Persan

Le territoire de Toucy se trouve dans la région d'alimentation de la nappe des sables de l'Albien, dont la préservation en tant que ressource stratégique justifie une attention particulière vis-à-vis de toute forme d'atteinte environnementale. Les sols sont sablonneux, argileux ou calcaires selon les sites

Pendant trois jours et demi, nous avons effectué nos mesures chez des particuliers ayant accepté d'ouvrir les portes de leur jardin sans aucune compensation. Au total, 6 sites ont été visités.

1.1.8. Le Porchet à charge constante

1.1.8.1 Principe de fonctionnement

Le Porchet à charge constante du CETE Ile de France a été fabriqué il y a plusieurs années sur le principe simple d'une électrovanne qui s'ouvre et se ferme.

Le perméamètre est composé d'une colonne transparente de 5 litres servant de réservoir et de tube de mesure. Les mesures sont faites sur une règle fixée avec une précision d'un millimètre.

Le système permettant de maintenir le niveau d'eau constant est composé de plusieurs éléments :

- Une électrovanne alimentée par une batterie de voiture 12V et contrôlée par un boîtier contenant une carte électronique.
- Un boîtier permettant de contrôler deux électrovannes avec deux interrupteurs. Les interrupteurs possèdent deux modes : le mode automatique et le mode manuel. Le mode manuel a pour action de maintenir l'électrovanne ouverte ; le mode automatique bascule le contrôle de l'électrovanne sur les électrodes.
- Les électrodes : ce sont deux pannes de métal maintenues au raz de l'eau au même niveau par un support adapté au diamètre de la tarière (10cm) et qui va ainsi rester coincé aux parois au niveau souhaité.

⁵ Laboratoire de Mécanique et Ingénieries rattaché à l'université de Clermont-Ferrand

⁶ Conservatoire National des Arts et Métiers

Le principe du mode automatique est celui-ci :

- Si les électrodes sont en contact avec l'eau, l'électrovanne est fermée.
- Si les électrodes sont hors de l'eau, l'électrovanne s'ouvre.

Ainsi, lorsqu'on lance une mesure, avec les électrodes hors de l'eau, l'appareil va ouvrir l'électrovanne jusqu'à ce que l'eau remonte jusqu'aux électrodes. La vanne se referme alors. L'eau présente dans le trou creusé s'infiltrant, les pannes ne sont bientôt plus en contact avec l'eau et l'électrovanne se rouvre laissant couler une petite quantité d'eau ; l'électrovanne se referme et ainsi de suite.

1.1.8.2 Protocole d'utilisation



Figure 11: Le Porchet à charge constante du CETE de Trappes

La mesure commence par creuser un trou à la tarière de la profondeur souhaitée. Les parois du trou sont parfois lissées par la tarière, surtout sur des sols de type argileux. Ce lissage peut conduire à créer une barrière fortement imperméable et perturber la mesure de manière artificielle. Il doit être éliminé par un grattage des parois à la brosse métallique.

Le trou doit ensuite être rempli d'eau sur une hauteur au moins deux fois égale à la hauteur à laquelle va être faite la mesure afin de bien saturer les parois et le fond du trou.

Pour que le régime permanent soit atteint, la circulaire de 1997 sur les ANC préconise de saturer le sol pendant 4h. (cf. Annexe 2) La norme Afnor destinée aux mesures du même type sur les sols destinés au stockage des déchets préconise elle d'attendre 30 minutes. Pour des raisons pratiques évidentes, et par observation des mesures, attendre 30 minutes semble être une bonne solution. Il est toutefois indispensable de vérifier par la suite si le régime permanent était bien atteint.

Lorsque le temps de saturation est écoulé, il faut placer le tube avec les électrodes et le tuyau d'arrivée d'eau en haut du trou et lancer le mode automatique (interrupteur vers le bas) afin de remplir le trou jusqu'aux électrodes. L'électrovanne doit alors commencer à s'ouvrir et se fermer rapidement pour garder le niveau constant (d'où le tac tac).

Une précaution doit être prise sur le début de la mesure. Il est préférable d'attendre quelques minutes après le lancement du mode automatique de l'électrovanne pour lancer le

chronomètre. En effet, la première injection d'eau peut être importante et il faut attendre un peu que l'eau se stabilise en surface.

Il n'y a plus ensuite qu'à lancer le chronomètre et noter les valeurs de hauteur d'eau aux intervalles de temps choisis sur la feuille de terrain. Le choix du pas doit être fait en fonction de l'observation de la vitesse d'infiltration à l'œil nu. Il peut aller de 1 à 5 minutes.

1.1.8.3 Remise en état

Le Porchet à charge constante du CETE n'ayant pas été utilisé depuis longtemps, j'ai dû effectuer quelques remises à niveau avec les conseils de Didier Gallis, technicien de l'unité hydrologie.

Les premiers tests réalisés m'ont permis d'observer que l'eau ne coulait pas, bien que les électrodes soient en contact avec l'eau. Ce problème était dû à l'électrovanne qui s'était coincée à cause du calcaire, l'électrovanne fonctionnant sur le principe du coulissement d'un piston. J'ai donc gratté le tartre du piston et du tube de coulissement et les ai graissés ainsi que les jointures des tuyaux afin que le piston glisse bien et que l'ensemble soit bien étanche.

Le boîtier électronique a lui aussi été ré-étanchéifié par Didier Gallis.

Est venu ensuite un second problème : A présent, l'électrovanne s'ouvrait et se fermait en présence et absence d'eau, cependant en effectuant une mesure pendant un certain temps, j'ai pu observer que la mise à niveau de l'eau ne se faisait plus : l'électrovanne restait ouverte et vidait tôt le réservoir d'eau d'un coup faisant ainsi déborder l'eau du trou de tarière.

L'ouverture de la vanne en continu signifiait que le courant ne passait plus entre les deux électrodes. Le remplacement des électrodes n'a pas suffi à résoudre le problème ; j'ai donc dû changer l'ensemble du système partant du boîtier jusqu'aux électrodes. L'oxydation des câbles empêchait le courant de passer correctement. Ce faisant, le problème a été résolu.



Figure 12 : Système de maintien des électrodes

1.1.9. Mesures effectuées

1.1.9.1 Mesures et calculs effectués

❖ *Mesure sur le terrain*

Sur chaque site, les mesures ont été effectuées dans la mesure du possible. Chaque site ayant des conductivités hydrauliques différentes, il a fallu s'adapter en choisissant un pas idéal.

Dans le cadre des mesures sur ANC, les trous ont été creusés à 60 - 70cm de profondeur, profondeur préconisée par la circulaire de 1997 à laquelle se trouve la zone d'épandage.

Jean-Claude Chossat, dans *La mesure de la conductivité hydraulique dans les sols*, préconise pour le test de Porchet à charge constante d'appliquer une charge d'eau de 15cm. Cependant, le tube support des électrodes étant exactement au même diamètre que le trou de tarière, il n'était pas aisé de l'enfoncer suffisamment profond.

La fiche de mesure est donnée en Annexe 3. Pour l'établissement de chaque mesure, il est nécessaire de noter les conditions météorologiques des jours précédents qui nous donnent une indication sur l'état des sols avant lancement de la mesure. En effet, si la pluie a été récurrente, il y aura une forte probabilité pour que les sols soient déjà saturés. En l'occurrence, lors de la mission, le temps était très sec et très chaud, hormis le dernier jour.

La mesure en elle-même consiste à noter l'heure de mise en eau du trou qui va nous permettre de comparer les résultats obtenus, noter l'heure de début et de fin de mesure et de noter à chaque laps de temps la hauteur d'eau dans la colonne.

❖ *Report des mesures*

Le report des mesures se fait ensuite sur le tableur Excel que j'ai fait de la manière exposée à la page suivante.

Sur cette feuille, on trouve en vert les cases à remplir par l'utilisateur, en jaune les cases remplies automatiquement et en rouge les valeurs de conductivité hydraulique attendues.

Après avoir rempli les données du haut (dates, heures, durées), il faut compléter les cases portant sur le trou de tarière. Doivent être indiquées la hauteur du trou et la distance entre la hauteur d'eau pendant la mesure (à son niveau constant) et le niveau du sol ; cette astuce simple n'a d'autre but que de mesurer la charge d'eau sans qu'il soit nécessaire d'immerger un mètre dans l'eau qui pourrait l'endommager. Le calcul de la charge est ainsi simplement :

$$\text{Charge hydraulique} = \text{Profondeur du trou} - \text{Hauteur entre le sol et l'eau}$$

La case « surface totale du trou » permet de calculer la surface du fond du trou plus celle de la paroi du cylindre selon la formule :

$$S = \Pi * R^2 + 2 * \Pi * R * h$$

R rayon de la cavité

h charge hydraulique

A	B	C	D	E	F	G
Creusez un trou plus profond						
3	Date de mise en eau	23/05/2011	Date de la mesure	23/05/2011	Durée de saturation (min)	13
4	Heure de la mise en eau	17h20	Heure de lancement	17h33	Durée de la mesure (min)	13
7	Profondeur du trou (cm)	55	Surface totale du trou (cm carré)	1274,112171	Colonne	
8	Diamètre du trou (cm)	10,5			Surface (cm carré)	78,54
9	Hauteur entre le sol et l'eau (cm)	19	Elancement de la cavité	3,428571429		
11	Pas (min)	1	Facteur de forme	11,18914033	Charge appliquée (cm)	36
15	n° mesure	Temps de mesure (min)	Hauteur d'eau (cm)	Variations de hauteur d'eau	Débit d'eau dans la cavité (m cube / s)	Vérification du régime d'écoulement
16	1	0	50			Permanent
17	2	1	49,4	0,6	7,85E-07	Transitoire
18	3	2	42,7	6,7	8,77E-06	Permanent
19	4	3	38	4,7	6,15E-06	Permanent
20	5	4	34,4	3,6	4,71E-06	Transitoire
21	6	5	31,6	2,8	3,67E-06	Permanent
22	7	6	26,9	4,7	6,15E-06	Transitoire
7	23,4	3,5	4,58E-06	Permanent		
8	19,9	3,5	4,58E-06	Permanent		
9	16,5	3,4	4,45E-06	Permanent		
10	13,1	3,4	4,45E-06	Permanent		
11	9,7	3,4	4,45E-06			
12	6,4	3,3	4,32E-06			
13	3,2	3,2	4,19E-06			
Les calculs sont déterminés sur les valeurs de 7 et 13 minutes.						
Perméabilité (m/s)						
3,70E-05						
Perméabilité (mm/h)						
133						
Perméabilité (m/s) -Afnor-						
1,11E-05						
4,71E-06						

ont à remplir par l'utilisateur, les cellules jaunes sont calculées ou données par le tableur, les cellules rouges sont les valeurs attendues

Figure 13 : Tableau de calcul pour le Porchet à charge constante

Les temps de mesures fait à rythme constant sont calculés automatiquement à partir du pas.

Les hauteurs d'eau relevées dans la colonne du Porchet sont à reporter dans la colonne prévue à cet effet. Les calculs vont ensuite se faire automatiquement.

Certains éléments du tableau sont relatifs à la norme Afnor X-30-434. Je les ai laissés dans mon tableau car les mesures effectuées sur le terrain se rapprochent beaucoup des conditions dictées par la loi :

- La toute première ligne du tableau est relative à la forme de la cavité. Selon la norme, une cavité valable doit avoir un élancement d'au moins 5. L'élancement (E9) correspond au rapport de la profondeur en contact avec l'eau de la cavité sur son diamètre. Pour les mesures, je n'ai pas respecté la norme qui imposait des valeurs inadaptées à la mesure sur ANC.

- Le calcul de conductivité hydraulique selon la loi Afnor (H40) se fait grâce à une variante de la loi de Darcy :

$$k = \frac{Q}{mBh}$$

k conductivité hydraulique du sol mesuré

Q débit volumique

m facteur de forme

B diamètre de la cavité

h charge hydraulique

- Le facteur de forme (E10) est le paramètre qui prend en compte la forme du trou. Il est déterminé en fonction de l'élancement $c = L / B$:

Elancement de la cavité c	Facteur de forme m
$5 \leq c \leq 10$	$\frac{2 * \pi * c}{\ln(c + \sqrt{c^2 + 1})}$
$c > 10$	$\frac{2 * \pi * c}{\ln(2c)}$

Le calcul de la conductivité hydraulique par la loi Afnor est intéressant car il permet de pouvoir comparer avec celui obtenu classiquement par la loi de Darcy.

Le fait qu'on attende 30 minutes dans la plupart des mesures au lieu des 4 heures requises par la circulaire de 1997 peut induire une erreur sur l'interprétation des mesures. En effet, on ne peut être sûr que la saturation est bien atteinte. Cependant, la loi Afnor nous donne un moyen de vérifier si l'état de saturation est suffisant pour effectuer une mesure. J'ai donc utilisé cette formule comme booléen m'indiquant si oui ou non la valeur pouvait être utilisée pour le calcul. La condition de vérification s'applique sur le régime du débit mesuré. Si le régime atteint est permanent, on peut directement en déduire que le sol est saturé.

Les débits volumiques d'écoulement sont calculés (F16:44) selon la formule :

$$Q = \frac{\Delta h * A}{\Delta t}$$

Δh variation de hauteur d'eau mesurée dans la colonne

A surface de la colonne

Δt pas

Par convention, le régime permanent est atteint lorsque le critère ci-après est respecté sur au moins 2 périodes consécutives du pas.

$$\frac{Q(t) - Q(t + 2\Delta t)}{Q(t + \Delta t) - Q(t + 3\Delta t)} - 1 \leq 5\%$$

Une vérification secondaire est faite grâce au graphique représentant la variation de la hauteur d'eau en fonction du temps. Une droite décroissante possédant un bon facteur de corrélation (supérieur à 0.99) est signe d'une bonne obtention de la saturation.

Ensuite, il ne reste que le calcul de la conductivité hydraulique grâce à la loi de Darcy. Il est effectué à partir de la formule suivante :

$$k = \frac{Q}{S}$$

k conductivité hydraulique du sol mesuré

Q débit volumique moyen en régime permanent

k conductivité hydraulique du sol mesuré

S surface totale du trou immergée

Δh variation de hauteur d'eau mesurée dans la colonne

A surface de la colonne

Δt pas

Le débit volumique moyen (F45) est la moyenne des débits volumiques pour lesquels le régime permanent est vérifié.

La conductivité hydraulique est donnée en m/s ainsi qu'en mm/h, la première unité étant principalement employée en hydrologie et la seconde largement utilisée pour les ANC.

1.1.9.2 Exploitation des mesures

L'exploitation des mesures sont personnelles et seront revues par la suite après mise en commun des valeurs relevées avec les différents appareillages. Elles seront faites en détail, site par site dans un court rapport fait dans le cadre du projet Ancres début juillet 2011.

Résumé des valeurs

Le tableau suivant a été obtenu en rassemblant les mesures effectuées pendant la semaine.

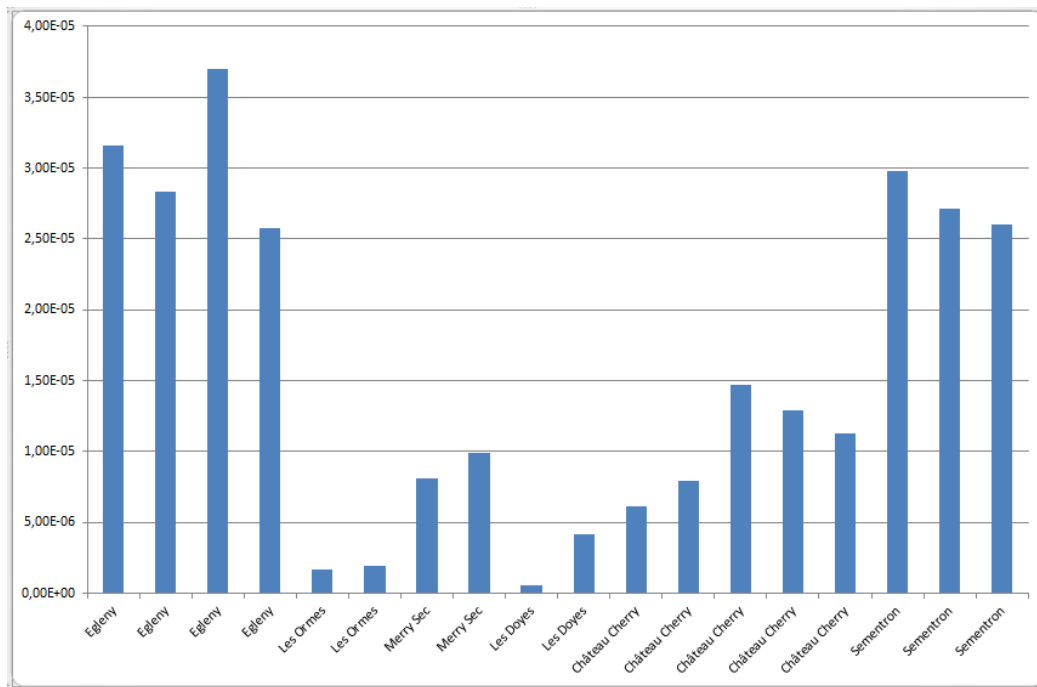


Figure 14 : Valeurs de conductivité hydraulique jour après jour

Il permet d'apprécier les variations d'échelle entre les coefficients d'infiltration des différents sites. En effet, on observe des variations de plusieurs ordres d'un site à l'autre. La valeur la plus faible, environ 5.10^{-7} m/s a été mesurée sur le site des Doyes ; à Eglény de $3.7.10^{-5}$.

La mesure sur le site d'Eglény a pris seulement 13 minutes pour infiltrer les 50cm d'eau contenus dans la colonne. Au contraire, le relevé effectué aux Doyes a pris près d'une heure pour écouler seulement 5cm d'eau. Ces valeurs sont représentatives des limites du Porchet à charge constante. Une infiltration trop rapide ne permettrait pas de relever suffisamment de mesures et donnerait une grande imprécision ainsi que l'impossibilité de vérifier le régime d'écoulement. Au contraire, une infiltration inférieure à celle mesurée aux Doyes ne serait évaluable qu'en faisant des relevés sur plusieurs heures. La lecture des hauteurs d'eau étant faite aux millimètres.

On en déduit une gamme de conductivité mesurable de l'appareil comprise entre 5.10^{-7} m/s et 5.10^{-5} .

Temps de saturation

Dans l'optique de vérifier l'état de saturation du sol et surtout les suppositions faites par la formule de la loi Afnor sur le régime d'écoulement, j'ai tracé les graphiques de la conductivité hydraulique en fonction du temps de saturation.

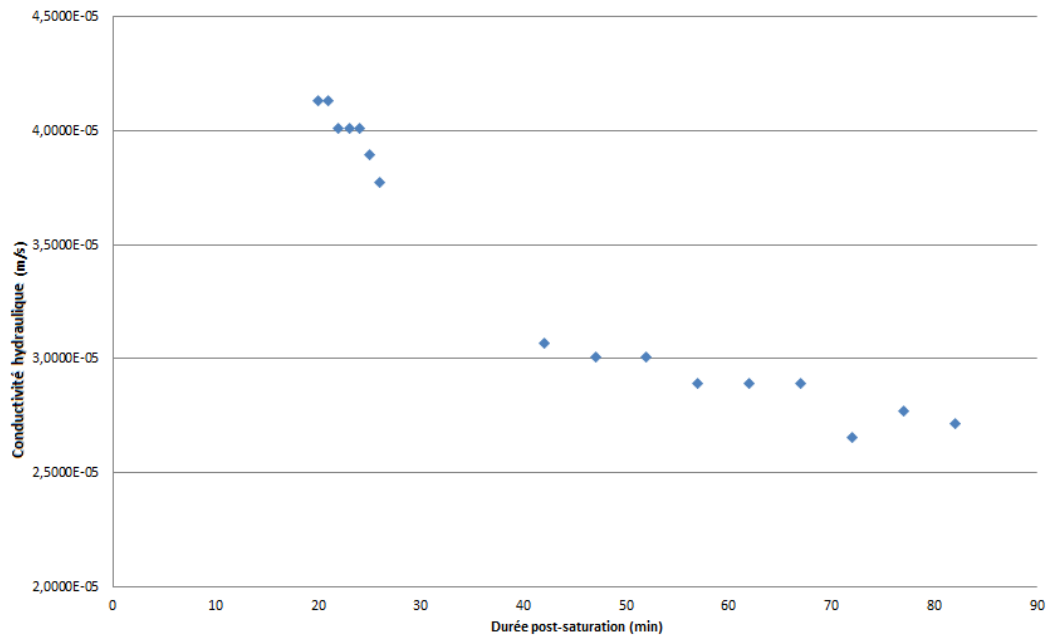


Figure 15 : Conductivité hydraulique en fonction du temps de saturation

En observant ce graphique, on voit deux groupes de mesures ; celles-ci ont été effectuées dans le même trou de tarière mais l'une un quart d'heure après l'autre. On observe très nettement la différence de pente entre les deux mesures. La condition de vérification du régime par la loi Afnor était pourtant vérifiée pour chacun des relevés. Les conductivités hydrauliques moyennes obtenues sur les zones constantes respectives sont $3,6 \cdot 10^{-5}$ puis $2,6 \cdot 10^{-5}$ m/s. L'écart entre les deux valeurs n'est en réalité que de 3% mais il y a bien une différence sensible.

De plus, on observe toujours une décroissance des valeurs de conductivité hydraulique jusqu'à l'arrêt de la mesure.

En ne respectant pas la durée de saturation de 4h préconisée par la circulaire de 1997 sur les ANC, le test de Porchet nous donne une estimation en ordre de grandeur de la valeur de conductivité hydraulique choisie, mais cette valeur ne doit pas être admise à la lettre ; la valeur de conductivité hydraulique vraie est en général légèrement inférieure à celle mesurée.

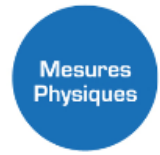
1.1.10. Conclusion

Le bilan de la mission ayant pour objectif de déterminer les appareils adaptés à la mesure sur sol destinés à l'assainissement non collectif n'a pas encore été fait et les mesures effectuées sur le terrain n'ont donc pas encore été complètement analysées.

Cependant, mes conclusions quant à l'utilisation du Porchet à charge constante sont une apparente efficacité du test. Pour obtenir une première estimation des propriétés du sol, un test avec une attente rapide de 30 minutes est une bonne solution. Pour une valeur exacte, un test après une attente de 4h minimum est largement préférable. Des tests réalisés en dehors dans l'enceinte du laboratoire de Trappes m'ont démontré une très légère décroissance du débit au bout des 4h et plus aucune variation au bout d'une journée de saturation.

Le Porchet à charge constante du CETE IdF permet d'effectuer des mesures in situ avec une mise en œuvre très facile, et rapide une fois le sol saturé. Le matériel est peu coûteux et facile à transporter. Le point négatif est sur la mesure qui ne peut être effectuée qu'après obtention de la saturation du sol, ce qui nécessite un long temps d'attente.

La poursuite de mon stage en tant que vacataire au CETE Ile de France va me permettre de rédiger mon rapport destiné au projet Ancres et aussi, je l'espère, de lire les comptes rendus des autres organismes ayant participé à la mission dans l'Yonne.



Troisième partie

Déroulement du stage

Sujet n°2 :

Mesures d'infiltration sur chaussée : amélioration d'un prototype

3.2. Mesure d'infiltration sur chaussée : amélioration d'un prototype

3.2.1. Précédent prototype d'infiltromètre pour chaussée

3.2.1.1 Développement

Après avoir longtemps considéré que les enrobés de chaussées étaient imperméables, des études (menées notamment par le L.C.P.C. de Nantes) ont montré que ces surfaces laissaient infiltrer l'eau. Déterminer la conductivité hydraulique des enrobés de chaussées a un rôle important :

- dans la compréhension de l'écoulement des eaux lors d'évènements pluvieux très peu importants mais courants (hauteur de pluie : 1 à 2 mm) ;
- dans la compréhension et la quantification de ces phénomènes qui pourraient permettre d'estimer leur impact quantitatif dans le cas notamment de chaussées en matériaux recyclés (appelé « MIOM ») sur le milieu naturel sous-jacent.

L'objectif de mon stage est de poursuivre les recherches effectuées sur un prototype d'infiltromètre dédié à la mesure de l'infiltration à la surface d'une chaussée.



Figure 16 : Prototype d'infiltromètre du LCPC

❖ Prototype du LCPC

Ce prototype a été créé en 2002, par le L.C.P.C.⁷. L'objectif était de mettre au point un appareil permettant des mesures *in-situ* non destructives (pas de prélèvement d'échantillon) et rapides. Après des études bibliographiques, les éléments suivants ont été mis au point :

- Choix du produit pour obtenir l'étanchéité entre l'enrobé et le système : Après plusieurs essais avec différents produits, un mastic en élastomère posé sur la route recouverte d'une couche de peinture bitumineuse a été sélectionné. (cf. figure 17) Il se pose facilement et est en plus réutilisable. Les seuls inconvénients sont le temps de séchage de la peinture (environ 4h) et le fait que si la température est trop basse le mastic reste rigide et empêche une bonne étanchéité.
- Rendre verticale l'infiltration mesurée : Afin d'éliminer l'infiltration horizontale qui ne doit pas être prise en compte dans les résultats, un système du double anneau a été utilisé. En effet des résurgences dues à l'infiltration horizontale, c'est-à-dire des remontées d'eau autour de l'anneau avaient été observées lors d'essais avec un simple anneau. La charge d'eau appliquée dans chacun des deux anneaux étant égale.
- Rendre visibles les fuites : Afin de rendre bien visibles les fuites d'eau s'échappant de l'anneau central malgré la présence du double anneau, un colorant : la fluorescéine a été utilisée.
- Rendre visible l'infiltration : Sachant que l'infiltration serait lente dans le cas des enrobés de chaussée par rapport à un sol naturel, l'anneau intérieur a été réduit par un tube de mesure de diamètre 15 fois inférieur à celui de l'anneau central afin de rendre mesures lisibles et plus rapides (cf. figure 16). Cette réduction permet d'observer un faible volume d'infiltration sur une surface importante.
- Supprimer les bulles d'air : L'horizontalité du support de réduction de section amenait à la présence de bulles d'air au moment du remplissage de l'anneau intérieur. Un capillaire a donc été utilisé pour supprimer la majorité de ces bulles.

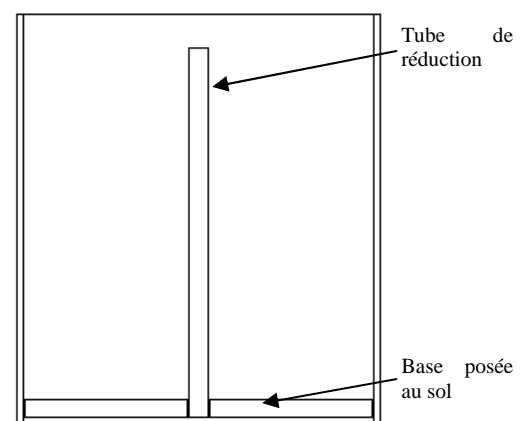


Figure 18 : Mastic noir posé sur peinture bitumineuse

Figure 17 : Schéma de la réduction de section

⁽⁷⁾ Laboratoire National des Ponts et Chaussée (ayant fusionné avec l'INRETS pour devenir l'IFSTTAR² depuis le 1er janvier 2011)

⁽²⁾ Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux

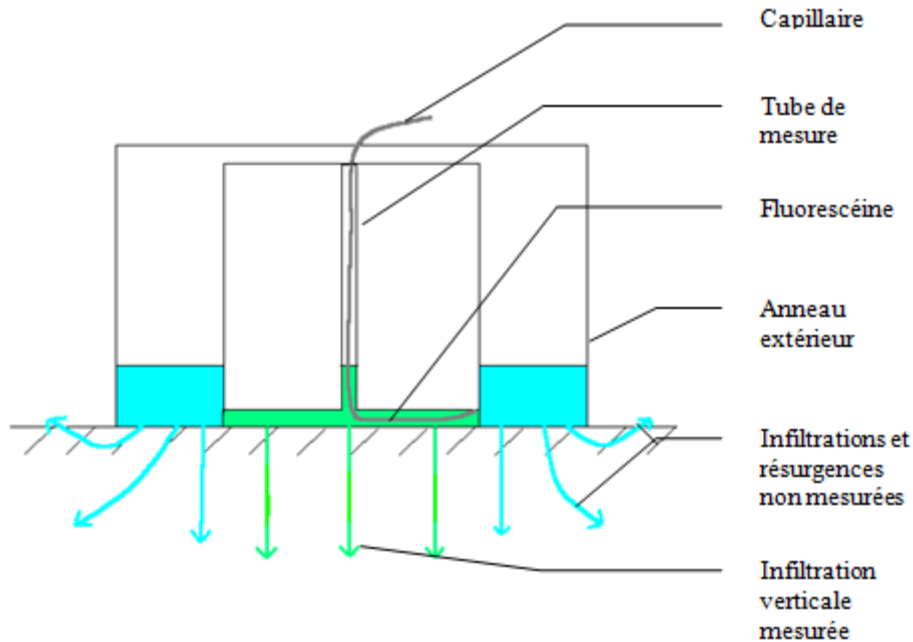


Figure 19 : Schéma des flux d'infiltration

L'appareil fonctionnait dans une gamme de mesures comprise entre 10^{-6} et 10^{-9} $m \cdot s^{-1}$.

❖ *Infiltromètre du LROP*

En 2004, N. DARBOUX, JD.BALADES, F.RODRIGUEZ et M.TESSIER (stagiaire) de l'ex-LROP ont repris l'étude afin d'améliorer le prototype sur de nombreux points qui limitaient son utilisation.

- Réduire la hauteur d'eau appliquée sur le sol : Un vase de Mariotte relié au bas de l'anneau intérieur permettait de choisir la charge appliquée. L'utilisation d'une charge faible (inférieure à 1cm) permet de se rapprocher des conditions réelles d'infiltration d'eau par les précipitations.
- Evacuer l'air : Le capillaire mis en place par le LCPC était assez efficace mais peu aisé à utiliser. Il a donc été remplacé par un trou de vis creusé sur la surface plane de support du tube de mesure.
- Mise en place de capteurs : Afin de pouvoir placer les capteurs souhaités dans l'anneau central, le tube de réduction a été rehaussé passant de 5mm à 105mm.

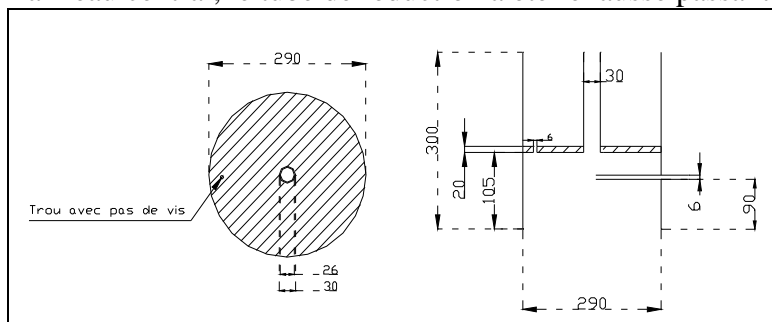


Figure 20 : Cotes de la réduction de section

Les capteurs suivants ont été mis en place :

- Une sonde de température afin de calculer les variations de chaleur et d'apporter un facteur de correction à l'infiltration mesurée. En effet, toute variation de température implique une modification de la viscosité de l'eau dont dépend l'infiltration.
- Une sonde volumique permettant de mesurer les variations de volume au cours du temps dans le tube de réduction.
- Un capteur de pression permettant de vérifier la charge apportée par le tube de Mariotte.

3.2.1.2 Points à améliorer

L'objectif est d'améliorer l'infiltromètre notamment, sur le temps très long de mise en étanchéité du système. La peinture bitumineuse mettant près de 4 heures à sécher, il est actuellement difficile d'enchaîner des mesures. Le but étant de posséder un appareil permettant de réaliser sur le terrain plusieurs mesures rapidement et sans temps d'attente préalable. Le mastic noir limite lui-même aussi la mesure car, une fois mouillé, il n'assure plus bien l'étanchéité ; il faut donc le laisser sécher ou bien utiliser un deuxième boudin qu'on place à la place du premier. Une mesure sur route existante doit en effet pouvoir être réalisée sans bloquer la circulation pendant une journée entière.

L'autre problème majeur est la présence de bulles d'air dans le système qui s'accumulent sous la plaque de plexiglass liant le l'anneau interne en contact avec le sol et le tube de réduction de mesure. Malgré le trou de vis percé qui permet à la majorité des bulles d'air de s'échapper, une grande partie reste piégée. Les bulles d'air sont un problème gênant car la mesure d'infiltration suppose d'être en présence d'un milieu monophasique. En effet, l'air, loin d'être incompressible peut voir son volume varier de manière importante avec la température extérieure et la charge d'eau appliquée. De plus une bulle d'air qui remonterait dans le tube au cours de la mesure ferait varier la hauteur d'eau de manière importante.

Le troisième objectif est d'améliorer la gamme de mesure. En effet l'infiltromètre permet d'apprécier des valeurs de conductivité hydraulique entre 10^{-6} et 10^{-9} mais l'utilisation d'un unique tube de réduction ne permet pas de s'adapter. On observera donc des variations trop rapides pour des mesures de sol perméables et au contraire, les mesures sur chaussées peu conductrices prennent de longues heures.

3.2.2. Réflexions et objectifs

3.2.2.1 Objectifs

L'objectif du stage est d'améliorer le prototype déjà existant en le récupérant si possible et en l'adaptant. Si aucune solution n'est trouvée pour améliorer directement le modèle existant, il faudra fabriquer un autre prototype correspondant aux objectifs fixés.

Le prototype final devra permettre des mesures plus rapides, sans bulles d'air perturbatrices et avec une large gamme de mesure.

Si le délai le permet, il serait idéal d'effectuer des premières mesures sur les chaussées du CETE et d'établir un protocole permettant son utilisation.

3.2.2.2 *Principes à conserver de l'ancien prototype*

Les études du LCPC puis celles sur CETE ont permis d'inventer un appareil adapté à des mesures sur chaussées classiques. Seule la mise en œuvre des mesures nécessite d'être améliorée. Les principes de base du prototype précédent devront être conservés.

Ces points sont les suivants :

- la réduction de section
- le double anneau
- une étanchéité parfaite
- le raccord d'un tube de Mariotte
- l'adaptation possible des capteurs

Dans une moindre mesure, le colorant sera aussi réutilisé afin de vérifier l'absence de fuites entre l'anneau central et l'anneau extérieur. La suppression de cet outil pourra être envisagée à l'avenir lorsque l'efficacité parfaite de l'infiltromètre aura été prouvée.

Au contraire, dans un premier temps, les capteurs ne seront pas réutilisés. L'objectif du stage n'étant pas l'instrumentalisation de l'essai. Une fois le prototype au point, toute l'instrumentation choisie par le CETE devra pouvoir être réutilisée.

3.2.2.3 *Premières mesures et premières idées*

Dans l'objectif de réfléchir à l'amélioration du prototype existant, un essai avec l'infiltromètre existant a été réalisé. Il m'est dès lors apparu évident que le prototype existant ne pouvait être adapté.

Afin d'obtenir l'étanchéité voulue, il était nécessaire de ne plus utiliser la peinture bitumeuse. Le mastic noir est un matériau qui a été choisi il y a longtemps après des études de différents mastics ; il présente des propriétés d'étanchéité idéales. J'ai donc décidé de le réemployer. Pour assurer l'étanchéité sans utiliser la peinture primaire, j'ai émis l'hypothèse que la bonne solution était d'appliquer une forte charge sur le mastic. Des vérins hydrauliques étaient disponibles au CETE, j'ai donc été choisi de les utiliser pour mon système. Après avoir réfléchi sur la manière d'adapter les vérins sur l'infiltromètre actuel, je n'ai pas trouvé de solution réalisable ; à cause, notamment de l'anneau extérieur fait d'une plaque de plexiglass enroulée et collée au silicone. Il était évident qu'il ne pouvait pas supporter les charges appliquées par un vérin.

Pour résoudre le problème des bulles d'air, une solution était proposée à la fin du rapport sur l'ancien prototype : l'emploi d'une cavité conique pour réduire la section, au lieu du système plat actuel. Cette solution est la seule permettant d'éliminer les bulles efficacement et facilement. Là encore, le prototype existant étant fait d'un seul bloc collé, il n'était pas possible de le démonter pour adapter un cône.

Dans le but d'élargir la gamme de mesure, l'idéal est d'utiliser un moyen permettant d'adapter l'un ou l'autre tube de mesure de diamètres différents selon la conductivité hydraulique du sol.

Toutes ces modifications étant impossible à adapter sur le prototype actuel, j'ai décidé d'en fabriquer un entièrement tout en gardant les principes de l'ancien.

3.2.3. Réalisation du nouveau prototype

3.2.3.1 Récupération de pièces

La partie conique de l'infiltromètre n'étant pas évidente à usiner, sa fabrication nécessiterait de la faire fabriquer par une entreprise spécialisée dans le modelage du plastique ou de l'acier. Pour des raisons de coût et de temps, j'ai récupéré le matériel disponible sur place.

J'ai alors démonté un ancien infiltromètre pour chaussées drainantes disponible au CETE et inutilisé. J'ai récupéré sur celui-ci l'anneau blanc de résine possédant les fixations pour les vérins hydrauliques. Cet anneau blanc est un support idéal pour la conception du nouveau prototype. Il a une section conique à l'intérieur de diamètre **MM** intérieur et se resserre en haut sur un diamètre de **mm** cm. La forme intérieure m'a permis de fixer l'anneau intérieur après un léger usinage pour adapter le diamètre.

L'anneau intérieur est un anneau découpé dans un tuyau de chantier en PVC. Deux anneaux ont été découpés de manière préventive.

L'anneau extérieur est lui aussi une découpe d'un gros tuyau en PVC.

Le tube de réduction et de mesure est un petit tube en plastique transparent gradué en volume donné par Didier Gallis.

3.2.3.2 Montage des pièces

Les pièces ont été montées dans cet ordre :

- Tube de réduction : Il a nécessité la découpe et la pose d'un support en PVC permettant d'adapter le diamètre du trou du disque blanc à celui du tube de réduction, notablement plus petit. L'ensemble des jointures a été siliconée pour assurer l'étanchéité. On retrouve ici le problème d'une zone plate dans laquelle vont rester bloquer des bulles d'air. Bien que moindre qu'auparavant, ce système devra par la suite être remplacé. Ce n'est qu'un pré-système destiné à effectuer de simples essais de fonctionnement.

- L'anneau intérieur : il est fixé au disque blanc par un boudin de mastic noir de diamètre fin. Sur son autre section est placé un gros boudin de mastic destiné à l'étanchéité entre la route et l'infiltromètre. Un deuxième boudin de diamètre important est fixé sur le deuxième anneau en PVC découpé. Le haut de l'anneau intérieur étant fixé par un mastic noir fin, il est aisé de décoller cet anneau pour y placer le second. Le mastic noir n'assurant plus l'étanchéité une fois mouillé, il est pratique de pouvoir placer le deuxième anneau possédant un mastic sec.

- Dans un second temps, après avoir fait quelques essais concluants avec le simple anneau, j'ai installé l'anneau extérieur. Le deuxième anneau extérieur est fixé au disque blanc par des barres d'acier vissées dans la résine blanche.

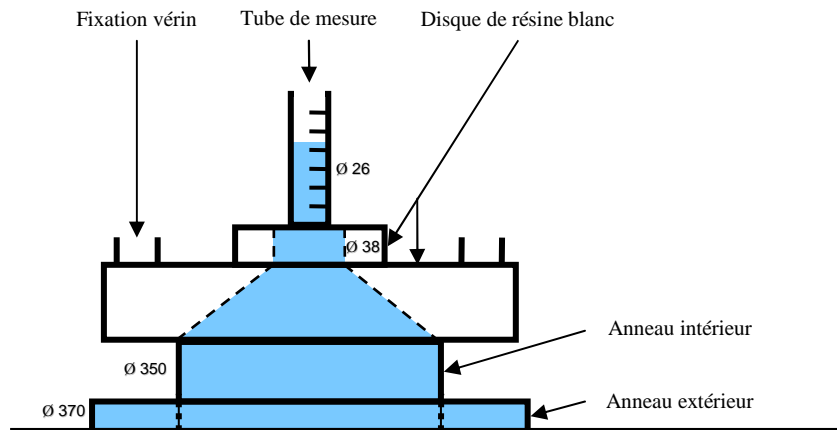


Figure 21: Prototype de l'infiltromètre pour chaussée

3.2.3.3 Utilisation des vérins hydrauliques

Les vérins hydrauliques étaient disponibles au CETE. Autrefois utilisés pour l'infiltromètre à chaussée drainante, ils étaient inutilisés depuis de nombreuses années et ont nécessité un nettoyage et un graissage minutieux.

❖ Principe de fonctionnement

Leur utilisation est simple. La pompe permet soit d'injecter de l'huile dans les vérins et ainsi de les faire s'allonger, soit de les aspirer pour les rétracter. Le choix de l'une ou l'autre fonction se fait par le simple basculement d'un commutateur sur le côté de la pompe.



Figure 23 : Les vérins hydrauliques et la pompe à main



Figure 22 : Commutateur de la pompe hydraulique

❖ Contrôle de la charge appliquée

Sur la pompe, un manomètre nous donne la pression de l'huile dans le système. Cependant, l'aiguille permettant de lire la charge est cassée, et l'évaluation de cette pression se fait donc avec une grande imprécision en observant tourner le support de l'aiguille. La petite pointe indiquée par la flèche rouge pointe environ vers la pression dans les vérins moins 10 bars. Je l'ai donc utilisé pour relever mes mesures en ajoutant 10 bars à la valeur lue.

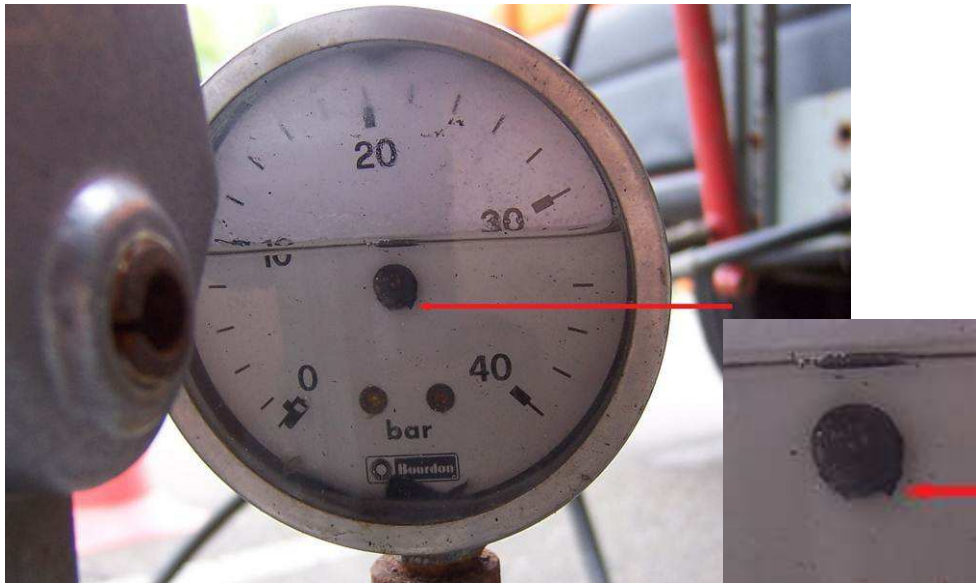


Figure 24 : Manomètre de la pompe hydraulique

❖ Répartition de la charge

Les deux vérins hydrauliques alimentés en parallèle par la même pression appliquent chacun une charge sur l'infiltromètre. Chaque charge est calculée par la formule suivante :

$$\text{Pression (bar)} * \text{Surface (cm}^2\text{)} = \text{Charge appliquée (DaN)}$$

La lecture de pression de fait en bar et la surface utile, c'est-à-dire celle du piston à l'intérieur du vérin qui supporte la pression d'huile est égale à :

$$\Pi * R_{\text{piston}}^2 = \Pi * 1,75\text{cm} = 9,62\text{cm}^2$$

En convertissant les unités, on a:

$$\text{Charge totale appliquée (DaN)} = 2 * 9,62 * \text{Pression lue (bar)}$$

Le précédent infiltromètre était plaqué au sol simplement en s'asseyant dessus, c'est donc une charge égale à environ :

$$F = 70\text{kG} * 9,8 = 682\text{N}$$

Avec les vérins, on peut atteindre 40 bars c'est-à-dire :

$$F = 2 * 9,62 * 40 = 7692\text{N}$$

Les vérins permettent donc d'appliquer des charges plus de deux fois plus importantes que celles appliquées lorsque la peinture bitumineuse était utilisée.

3.2.4. Utilisation du prototype

3.2.4.1 Protocole d'utilisation

Après avoir fait quelques tests avec le simple anneau central, j'ai établi un protocole me permettant d'effectuer une mesure efficace. Je l'ai ensuite adapté au double anneau dans la théorie, mais des problèmes sont apparus quant à l'utilisation des mastics. Ces problèmes seront détaillés par la suite.

Il faut tout d'abord préparer les deux anneaux intérieurs qui permettront d'enchaîner rapidement les mesures. Les mastics noirs doivent être bien modelés pour former un boudin de diamètre homogène d'environ 1,5cm. Les boudins sont placés sur le contour de l'anneau intérieur en les centrant bien par rapport au disque de PVC. Ils doivent ensuite être bien écrasés sur les côtés intérieur et extérieur. Un autre boudin doit être appliqué sur l'anneau extérieur. Il est préférable d'utiliser un diamètre légèrement inférieur d'environ 1cm afin de préférer l'étanchéité anneau intérieur – anneau extérieur à celle entre l'anneau extérieur et le contour qui n'a pas d'influence sur la mesure. Un troisième boudin fin (moins de 0,5cm) doit être appliqué autour de de l'anneau inférieur du disque en résine où sera fixé l'anneau central.

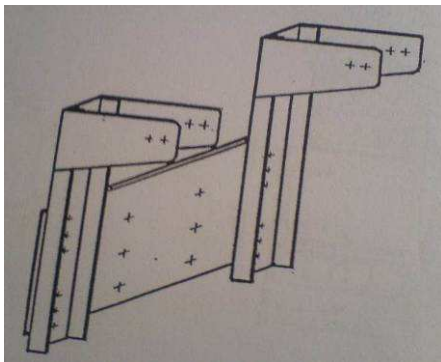


Figure 25 : Double chape

Ensuite, l'anneau central doit être enfoncé sur le disque de résine en écrasant légèrement le mastic mais en prenant soin de garder parallèles l'anneau central et le disque en résine. La double chape doit elle être fixée sur la tige arrière du camion.

La zone sur laquelle la mesure va avoir lieu doit être soigneusement balayée, afin d'incruster au minimum de cailloux dans le mastic et d'améliorer l'étanchéité.

Il faut ensuite fixer les vérins hydrauliques sur la chape puis, poser l'infiltromètre au sol en dessous des vérins et rabaisser précautionneusement ceux-ci jusqu'à ce qu'ils atteignent les fixations sur l'infiltromètre. Après avoir placé les vis/écrous reliant l'infiltromètre aux vérins, il faut remonter l'infiltromètre en décompressant les vérins afin de bien l'aligner verticalement puis le rabaisser doucement ensuite en s'assurant de son parallélisme avec le sol. Ajuster le parallélisme en remontant puis rabaisant l'infiltromètre plusieurs fois si nécessaire. L'infiltromètre est bien posé au sol lorsqu'on ne voit plus le jour sous l'anneau extérieur.

Il faut maintenant appliquer la force sur l'infiltromètre en pompant jusqu'à observer la pression choisie sur le manomètre. Il est préférable d'attendre 5 minutes sous charge avant de verser l'eau.

L'eau doit maintenant être ajoutée pour lancer la mesure. Il faut d'abord verser le colorant dilué par le tube de mesure; une quantité permettant d'observer des fuites dans l'eau

claire puis remplir d'eau l'infiltromètre. L'anneau extérieur doit être rempli par l'espace interstitiel sur le contour de l'infiltromètre.

Quelques bulles peuvent remonter au moment du remplissage de la cavité intérieure, il faut attendre la fin de ces remontées et lancer la mesure. Les valeurs peuvent être notées sur la fiche de mesure adaptée (Annexe 4).

Pour effectuer une autre mesure, il est nécessaire de suivre le protocole suivant :

D'abord, l'infiltromètre doit être décollé et remonté en inversant la pompe de sens pour remonter les vérins.

L'anneau intérieur doit être remplacé par l'autre anneau possédant un mastic sec. L'anneau se décolle facilement avec l'aide d'un tournevis plat. Le petit boudin de mastic doit lui aussi être remplacé par un autre sec et non écrasé sans quoi on observe des fuites à ce niveau. Afin d'éviter des fuites trop importantes, il est aussi préférable de remodeler le boudin de mastic posé sur l'anneau extérieur.

Il n'y a ensuite plus qu'à répéter l'opération.



Figure 26 : Prototype d'infiltromètre pour chaussée définitif

3.2.4.2 Essais et analyse

❖ Premiers essais

J'ai d'abord effectué 2 premiers essais en appliquant une charge assez faible : 10bar pendant 2h puis 4h sans relever de vitesse d'infiltration lorsque seul le simple anneau était installé. L'observation m'a permis de voir que l'étanchéité au niveau du sol et des autres jointures de l'infiltromètre était bonne. Devant l'absence de fuite, j'ai admis la bonne efficacité de l'appui des vérins sur l'infiltromètre et j'ai installé l'anneau extérieur.

❖ Seconds essais

J'ai donc repris les essais avec le prototype complet. Les premiers essais présentant de nombreuses fuites, j'ai établi les points du protocole suivant :

- Entre chaque mesure, le mastic de l'anneau extérieur doit être remodelé afin d'éviter de trop grosses fuites.
- Entre chaque mesure, au moment du changement de l'anneau central, il est nécessaire de remplacer le petit boudin de mastic qui, trop déformé par la mesure et mouillé ne peut plus permettre l'étanchéité.

❖ Essais finaux

Une fois l'étanchéité bonne, il s'est posé un autre problème : les mastics peuvent mettre des temps très longs à s'écraser. L'observation de ce phénomène se fait par une remontée notable de l'eau dans le tube de mesure. L'infiltration très faible dans la chaussée ne peut être observée que si le système est parfaitement inerte et elle était ici largement compensée par l'écrasement des mastics.

Pour résoudre ce problème, j'ai émis plusieurs hypothèses qui pourraient permettre l'étanchéité :

- Réduire l'épaisseur des mastics
- Appliquer des charges plus importantes
- Appliquer une charge importante et relâcher au moment de la mesure
- J'ai donc commencé par réduire le diamètre des boudins par deux. Des fuites sont d'abord apparues. Le problème a été résolu en réduisant le boudin de mastic de l'anneau extérieur et en augmentant d'ores et déjà la pression appliquée jusqu'à 30 bar. Les résultats obtenus ont montré une augmentation de la hauteur d'eau au lieu de sa décroissance par infiltration. Le problème n'était donc pas résolu.

J'ai effectué une mesure sur plusieurs heures pour suivre l'évolution de la déformation du mastic conjuguée à l'infiltration dans le sol. En observant la variation du débit d'écoulement, on s'aperçoit qu'il reste encore négatif au bout de trois heures, signe de la remontée de l'eau dans le tube de mesure.

La charge importante additionnée à la réduction de l'épaisseur des mastic n'a pas permis de régler le problème.

- J'ai donc tenté d'appliquer la troisième hypothèse. Le test suivant a été réalisé en appliquant une charge de 40 bar pendant 5 minutes, puis en relâchant la pression avant de verser l'eau.

Le résultat obtenu fut une fuite instantanée au niveau de l'anneau intérieur.

Des temps d'attente plus long pourraient être tentés mais je n'ai pas eu le temps de les effectuer, cependant, la mesure ayant pour objectif d'être la plus rapide possible, l'utilisation du mastic noir semble être une impasse. La solution pourrait être d'utiliser un autre type de mastic, en joint siliconé. Ceux-ci sont imperméables, se déforment plus vite et ne collent pas au revêtement de la chaussée.

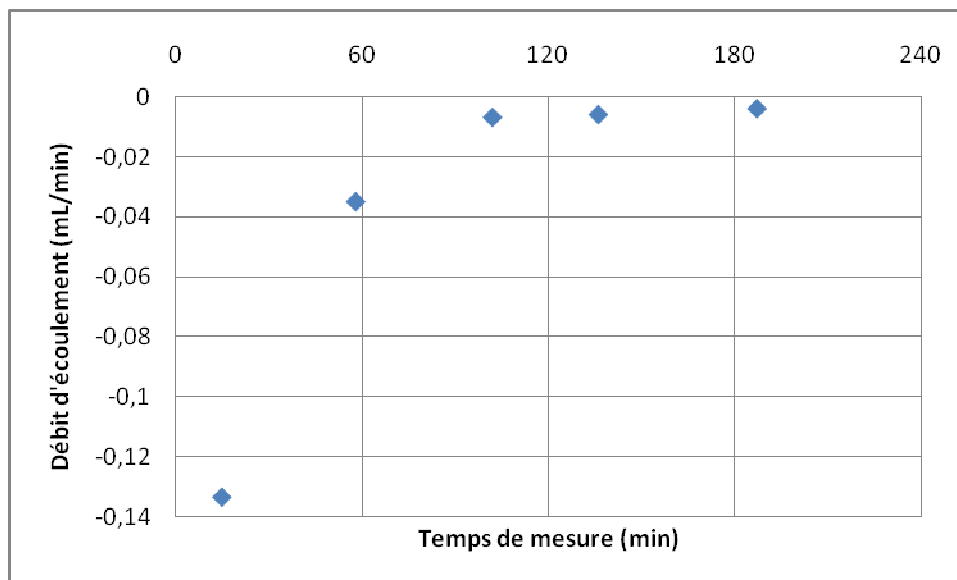


Figure 27 : Evolution du débit d'infiltration en fonction de temps

3.2.4.3 Points à améliorer

Certains points restent à améliorer sur le prototype d'infiltromètre afin de pouvoir envisager d'en construire une version définitive qui nous permettra d'effectuer :

- une exploitation des mesures aisée
- des mesures rapides et efficaces sur le terrain.

Améliorations envisageables pour l'exploitation de mesures

- La mesure devra être faite à niveau constante afin d'effectuer une meilleure exploitation des mesures. La charge appliquée devra être la plus faible possible afin de se rapprocher le plus possible des conditions réelles d'infiltration (simulation d'une flaque d'eau) ; (voir la norme sur l'infiltromètre double anneau type fermé : NF X 30-420).

→ La solution la plus évidente est de travailler à charge constante en utilisant un vase de Mariotte dont la hauteur de charge sera réglée afin d'appliquer une hauteur d'eau équivalente de moins d'1cm d'eau. Ce qui revient à appliquer une hauteur h_1 dans le vase de Mariotte de : $h_2 \leq h_1 \leq h_2 + 1\text{cm}$ (voir Annexe1).

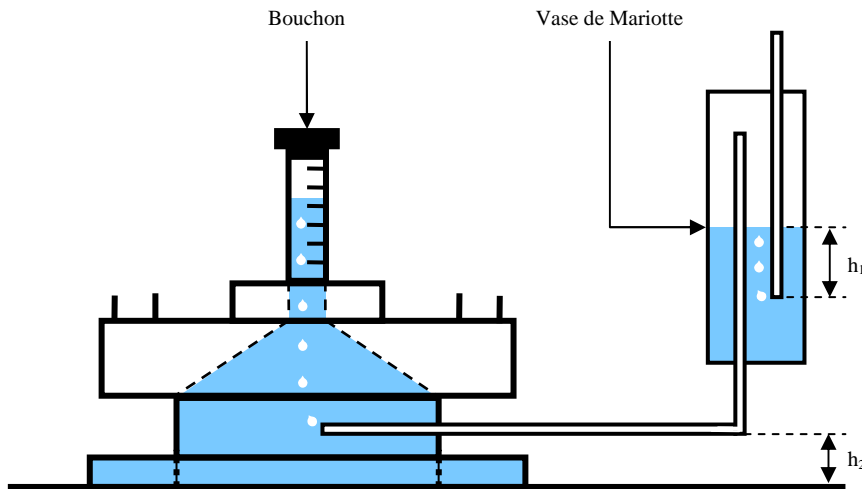


Figure 28 : Prototype d'infiltromètre pour chaussée avec vase de Mariotte

Améliorations envisageables pour l'amélioration des mesures effectuées

- Le problème de l'étanchéité doit être résolu avant toute chose. L'utilisation des vérins semble idéale, mais le mastic noir, trop modelable pour être utilisé par écrasement continu doit être remplacé.

→ L'utilisation de joints silicone épais pourrait être une bonne solution. Il existe sur le marché des mastic en silicone très élastiques, qui pourraient donc bien s'adapter à la forme de la chaussée. Les silicones ont l'avantage sur le mastic noir de se déformer instantanément sous charge et de ne plus bouger ensuite. De plus, ils ne collent pas à la chaussée ce qui serait une avancée importante sur le point de vue de la vitesse de mise en œuvre de la mesure.

- La gamme de mesure mérite d'être élargie, quoiqu'adaptée aux mesures effectuées jusqu'à l'heure actuelle sur les chaussées sur CETE. Et la durée maximale de mesure devra être augmentée afin d'améliorer la précision des mesures.

→ Pour cela, un système permettant de remplacer le tube de mesure aisément peut être envisagé. Il serait ainsi possible de choisir parmi les 2 ou 3 tubes de diamètres différents selon la gamme de mesure de conductivité hydraulique du sol dont on est en présence.

Les tubes devront avoir une hauteur suffisamment grande pour pouvoir réaliser des mesures d'infiltration dans de bonnes conditions.

Un système de type « boucle de serrage » peut être imaginé comme sur l'image ci-dessous.

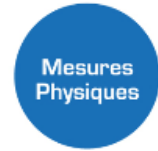


Figure 29 : Boucle de serrage : base



Figure 30 : Boucle de serrage : tube de mesure

- La mesure de hauteur d'eau faite à l'œil nu manque de précision, de plus, les variations de température, dues aux changements climatiques ne doivent pas être négligées.
 - Les avancées précédentes du CETE sur l'infiltromètre quant aux capteurs et à l'acquisition des mesures doivent être réutilisés. Il faudrait idéalement réinstrumenter l'appareil par :
 - Un capteur de hauteur d'eau pour mesurer le débit d'infiltration de l'eau,
 - Un capteur de température afin d'évaluer les variations entropiques et d'en déduire une correction de température,
 - Eventuellement un capteur de pression au niveau du bas du vase de Mariotte pour évaluer précisément la charge d'eau appliquée.



3.2.5. Conclusion

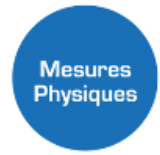
Le prototype d'infiltromètre dont la réalisation et l'expérimentation a commencé il y déjà presque 10 ans est encore en construction.

L'objectif de créer un infiltromètre pour chaussée utilisable rapidement pose de nombreux problèmes de réalisation. L'étanchéité a pu être maîtrisée, la solution permettant des mesures enchaînées rapidement a été trouvée par l'utilisation de vérins hydrauliques, mais les deux paramètres ne fonctionnent pas encore ensemble.

Les principaux problèmes que j'ai rencontrés sont liés à l'utilisation du mastic noir qui n'a pas les propriétés adaptées à des mesures rapides sur le terrain.

Les objectifs du stage ont cependant ont été atteints. Le premier point à améliorer qu'est la vitesse de mesure se solde par un échec me permettant de conclure sur la nécessité de changer le mastic et d'ouvrir sur de nouvelles idées à tenter à l'avenir. Quant aux problèmes des bulles d'air il été (presque) entièrement résolu par l'utilisation d'une réduction de section conique. « Presque » car quelques bulles d'air coincées juste en dessous du tube du mesure gênent encore. Cela me permet d'ouvrir sur le troisième objectif, le tube de mesure actuel n'est destiné qu'au test du fonctionnement de l'infiltromètre. Faute de temps, je n'ai pas pu monter de nouveau système mais des idées sont là et peuvent amener à des études futures.

La poursuite du prototype actuel pourrait être un futur sujet de stage tout comme j'ai pris la suite des travaux fait en 2005 au cours du stage de Manuel TESSIER.



Conclusion générale

Le stage au sein du CETE Ile de France m'a beaucoup appris sur le monde de l'entreprise : budgets limités, difficultés et délais des commandes de matériels, relations pas toujours évidentes entre les différents organismes de travail, convivialité au sein des groupes...

Au travers du stage j'ai pu approfondir mes connaissances scientifiques et apprendre les bases d'une nouvelle discipline qu'est l'hydrologie. Rapidement étudiée à l'IUT en mécanique des fluides, travailler dans l'unité Hydrologie et Gestion des eaux pluviales m'a permis d'apprendre toute l'envergure de la science de l'eau et notamment l'importance qu'elle avait dans notre société actuelle.

Durant les 10 semaines passées au CETE Ile de France, j'ai pu rencontrer beaucoup de gens travaillant dans des domaines variés avec qui j'ai pu discuter et ainsi découvrir de nombreux essais et études.

La semaine passée en Bourgogne fut extrêmement enrichissante autant d'un point de vue de la manipulation sur le terrain qui m'a permis de concrétiser mes mesures d'infiltration que sur un point de vue humain, c'est-à-dire, la vie en petite communauté à discuter sur des thèmes scientifiques.

J'ai beaucoup acquis en autonomie ; étant assez libre pendant la durée de mon stage, j'ai dû apprendre à bien gérer mon temps, choisir mes manipulations, réfléchir et poser des questions.

Pour finir, je dirais que l'expérience en entreprise fut un réel apprentissage de la vie au travail et je ne peux désormais plus envisager une formation sans insertion dans le milieu professionnel. Ainsi, le stage m'a aussi aidé à prendre ma décision de partir en licence professionnelle l'année prochaine.

BIBLIOGRAPHIE

André Musy, Cours d'hydrologie générale
<http://echo2.epfl.ch/e-drologie/>

Berthier E., 1999 : *Contribution à une modélisation hydrologique à base physique en milieu urbain. Elaboration du modèle et première évaluation.* Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble.

Lamalle R., Roura M., 1992 : Rapport : *Drainomètre de chantier, Evolution de son système d'application sur chaussées*

Letellier L., Ramuz M., Berthier E., 2003 (L.C.P.C.) : Rapport : *Mesure de la capacité d'infiltration in situ dans les enrobés de chaussées non saturées.*

Mermoud A., 2001 : Cours de physique du sol, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne.

Raoul Calvet : 2003 : *Le sol: propriétés et fonctions*, Volume 2. Par Google livre.

Jean-Claude Chossat, *La mesure de la conductivité hydraulique dans les sols*, Editions TEC et DOC

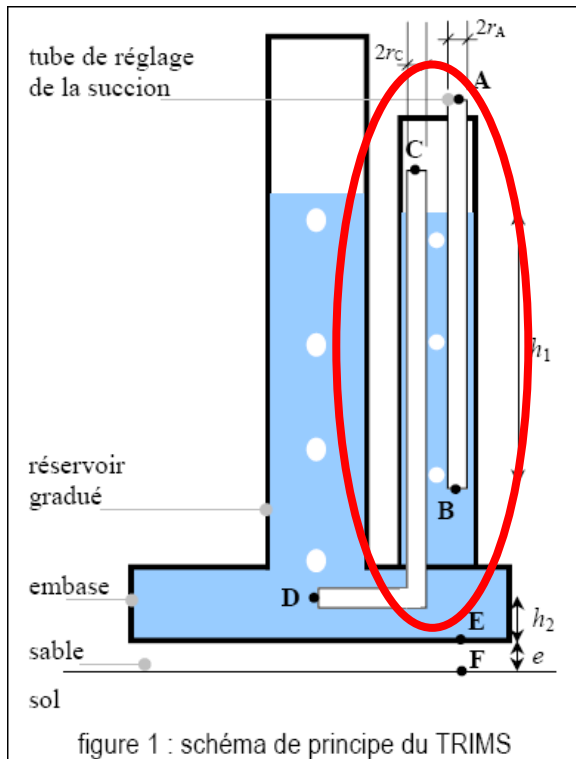
Normes françaises :

- *Circulaire n° 97-49 de 22 mai 1997 relative à l'assainissement non collectif*
- *NF X30-424 : Détermination du coefficient de perméabilité d'un terrain par essai d'infiltration à charge constante en forage.*



ANNEXES

Annexe 1 : Le vase de Mariotte



On utilise des vases de Mariotte dans les infiltromètres lorsque l'on veut obtenir une charge d'eau sur le sol inférieure à la charge nulle (dans les conditions normales de pression).

L'air à l'entrée A du tube AB est à la pression atmosphérique $P_A = 0$ (la pression atmosphérique est prise comme référence).

La pression en B est la même qu'en A : $P_B = P_A$.

Le tube CD, contenu dans le même réservoir secondaire que le tube AB, a son extrémité C à la pression de l'air situé au-dessus de la surface libre, l'autre extrémité D débouche dans le réservoir principal gradué. La pression en D est la même qu'en C : $P_D = P_C$.

Comme la surface libre dans le réservoir secondaire, qui est à la pression P_C , est à la hauteur H par rapport à B, on a aussi :

$$P_B - P_C = -\rho g h_1$$

$$P_C = -\rho g h_1$$

C'est h_1 qui impose la pression fournie par le vase de Mariotte, mais elle est ajustable en modifiant la position du tube AB.

La sortie D étant à une hauteur fixe h de la membrane E, la différence de pression entre ces points est :

$$P_E - P_D = \rho g h_2$$

Ainsi, on a :

$$P_E = \rho g h_2 + P_D$$

C'est à dire:

$$P_E = \rho g (h_2 - h_1)$$

Annexe 2 : Circulaire de 1997 sur les Assainissements non Collectifs (extrait)

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT

Direction de l'eau

Circulaire n°97-49 du 22 mai 1997 Relative à l'assainissement non collectif

NOR : ENVE9750265C

Annexe III

ELEMENTS DE CALCUL POUR LE CHOIX DES FILIERES D'ASSAINISSEMENT NON COLLECTIF, CAS DES FILIERES UTILISEES POUR LES PETITS ENSEMBLES COLLECTIFS

1. Evaluation de la perméabilité d'un sol (test de percolation)

1.1. Principe

(...)

Pour des terrains caractérisés par une faible perméabilité (inférieure à 6 millimètres par heure environ) , l'évacuation des eaux usées par épandage souterrain doit être exclue au profit d'un autre mode de traitement et d'évacuation lorsque le site le permet.

1.2. Appareillage pour la méthode à niveau constant

Pour la réalisation du test de percolation, l'appareillage suivant peut être préconisé :

- une réserve d'eau (environ 25L) ;
 - une cellule de mesure (burette par exemple) ;
 - un robinet « 3 voies » pour un système manuel ou une électrovanne commandée par un système électronique 12volts ;
 - des tuyaux souples munis de raccords rapides ;
 - une tige permettant de descendre le régulateur de niveau dans des trous forés pouvant atteindre 2 mètres de profondeur ;
- Les trous peuvent être réalisés avec une tarière à main.

1.1. Réalisation pour la méthode à niveau constant

1.3.1. Réalisation de trous

La profondeur du trou doit atteindre le niveau auquel serait placé l'épandage (50 à 70cm en général).

Le nombre de trous de mesure dépend de l'homogénéité présumée du terrain ; il n'est pas souhaitable de descendre en dessous de trois points pour l'assainissement d'une maison d'habitation.

Dans le cas d'un sol argileux ou limoneux humide , les parois du trou sont scarifiées pour faire disparaître le lissage occasionné par la tarière, le fond du trou pouvant être garni d'une fine couche de graviers.

1.3.2. Phase d'imbibition

Une phase préalable d'imbibition est nécessaire pendant une durée d'au moins quatre heures, la régulation du niveau étant directement liée à la réserve d'eau.

En effet la perméabilité mesurée se stabilise en général au bout de cette période.

1.3.3. Phase de mesure

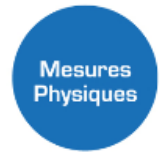
En fin de période d'imbibition, le régulateur de niveau est relié à la cellule de mesure. Avec le système automatique, le système électronique effectue les deux phases en l'absence d'opérateur. Les conditions expérimentales suivantes peuvent être proposées :

- diamètre du trou : 150 mm ;
- hauteur d'eau régulée : 150 mm ;
- durée du test : 10 minutes

Dans cette hypothèse, la valeur de K peut être calculée de la manière suivante :

$$K \text{ (millimètres / heures)} = 6.79.10^{-5} .V$$

V ;; volume d'eau introduit en millimètres cubes.





Annexe 3 : Fiche de terrain pour le Porchet à charge constante du CETE Ile de France

Annexe 4 : Fiche de terrain pour le l'infiltromètre pour chaussée

FEUILLE DE MESURE ET DE CALCUL POUR L'INFILTROMETRE POUR CHAUSSEE

Date de la mesure

Expérimentateur

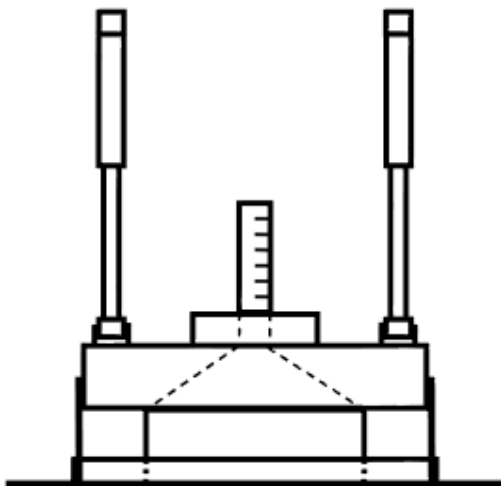
Lieu.....

Emplacement

Météo du jour et précédents.....

.....

Schéma d'emplacement des mesures



$$k = \frac{V}{S * \Delta t}$$

k coefficient de perméabilité du sol mesuré

S surface totale du trou immergée

V variation de volume dans le tube

Δt pas

Numéro de la mesure					
Heure de mise en charge et pression (bar)					
Heure de début de saturation					
Heure de début et de fin de l'essai					
Volume d'eau (mL)					
Diamètre au sol (cm)					