

École des Ponts

ParisTech

**MASTER MSROE
MÉCANIQUE DES SOLS, DES ROCHES ET DES OUVRAGES DANS
LEUR ENVIRONNEMENT**

2010-2011

« École Nationale des Ponts et Chaussées »

RAPPORT DE STAGE DE MASTER RECHERCHE

**« INDICATEURS TEXTURAUX PERTINENTS POUR
L'INFILTRATION DES EAUX TRAITÉES EN
ASSAINISSEMENT NON COLLECTIF »**

« Présenté par : Anthonio REBOZA »

« Encadré par M. Olivier FOUCHÉ »

« LABORATOIRE EAU ENVIRONNEMENT ET SYSTEMES URBAINS »

Remerciements

Ce stage a nécessité tout au long de sa durée l'aide et le soutien de plusieurs personnes.

Je tiens à remercier en premier lieu, le Laboratoire Eaux Environnement et Systèmes Urbains (LEESU) qui m'a ouvert ses portes ainsi que toute l'équipe pour leur précieuse aide et leur sympathie qui ont favorisées mon intégration dans le laboratoire.

Je remercie également l'équipe du Projet ANCRES, projet sur lequel j'ai pu réaliser mes travaux de recherches et mes essais, pour la formation dont j'ai pu bénéficier ainsi que l'expérience enrichissante et pleine d'intérêt qu'elle m'a fait vivre durant ce stage.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à M. Olivier FOUCHÉ, maître de conférences et chercheur au LEESU (Ecole des Ponts), mon directeur de stage, pour sa disponibilité, son inestimable aide et ses conseils durant son encadrement.

Dernièrement et non des moindres à M. Behzad NASRI, doctorant au LEESU, pour son précieux soutien, sachant répondre à toutes mes interrogations, sans oublier sa participation à la réalisation de tous mes essais.

MERCI A TOUS

REBOZA Zafindrevalo Anthonio

SOMMAIRE

1. Introduction

2. Etude bibliographique

2.1. Structure du sol

2.2. Texture des sols

2.3. Conductivité hydraulique

2.3.1 Conductivité hydraulique dans un milieu saturé

2.3.1.1. L'agrégation du sol

2.3.1.2. La granulométrie

2.3.2. Conductivité hydraulique dans un milieu non saturé

2.3.2.1. Histoire hydrique

2.3.2.2. Composition ionique de la solution du sol

2.3.3. Ordre de grandeur de la conductivité hydraulique

3. Réalisation des essais

3.1. Prélèvement d'échantillons

3.2. Description des logs

3.3. Description des essais

3.3.1. Essais classiques

3.3.1.1. Analyse granulométrique par sédimentation

3.3.1.2. Humidité résiduelle

3.3.1.3. La teneur en carbonate

3.3.1.4. La densité réelle

3.3.1.5. La densité apparente

3.3.1.6. La porosité

3.3.1.7. Les limites d'Atterberg

3.3.2. La surface spécifique

3.3.2.1. Méthode Brunauer, Emmett and Teller (BET)

3.3.2.2. Méthode au bleu de méthylène

4. Description des essais d'infiltration

4.1. Méthode du perméamètre de Guelph

4.2. Méthode de Porchet

4.3. Méthode du double anneau

5. Interprétation des résultats

6. Conclusions

7. Références bibliographiques

ANNEXES

Liste des Figures

Figure 1. Relation entre diagramme des textures et conductivité hydraulique (Xanthoulis, FUSAGX).....	2
Figure 2 Courbe d'allure générale des relations $K(\theta)$ (Musy, 1991)	3
Figure 3 Influence de la taille des particules sur la surface spécifique (Tokunaga et al. 2003).....	11
Figure 4 Influence de la forme de la particule sur la surface spécifique (Santamarina et al., 2001).....	11
Figure 5 : Les différents états de surface de grain (Tokunaga et al., 2003)	12
Figure 6. Courbe de la vitesse de la descente du niveau de l'eau en fonction du temps.....	16
Figure 7. Courbe de la hauteur d'eau en fonction du temps.....	17

Liste des Tableaux

Tableau 1. Récapitulatif des prélèvements faits durant le stage	6
Tableau 2. Résultat des analyses granulométriques par sédimentation.....	7
Tableau 3. Qualification d'un sol selon sa teneur en carbonate	7
Tableau 4. Classification du degré de plasticité selon l'indice de plasticité d'un sol....	9
Tableau 5. Résultats des essais en laboratoire.....	10
Tableau 6. Résultats des essais au bleu de méthylène et au BET.....	13
Tableau 7. Fiche de calcul de la méthode du perméamètre de Guelph.....	15
Tableau 8. Fiche de calcul de la méthode Porchet.....	16
Tableau 9. Résultats de tous les essais par la méthode de Porchet.....	18
Tableau 10. Comparaison des résultats de plusieurs essais.....	19
Tableau 11 Surface spécifique des minéraux argileux les plus courants.....	19

1. INTRODUCTION

L'assainissement non collectif est un mode de gestion des eaux usées qui repose sur l'existence chez le particulier d'un dispositif assurant la collecte, le traitement et l'évacuation des eaux usées domestiques de manière autonome à proximité de l'habitation. L'ouvrage de traitement est implanté directement dans le sol et l'évacuation des eaux traitées est faite dans le sol sous-jacent.

Dans la phase de conception d'un tel ouvrage, il est important d'avoir une bonne connaissance de la nature du sol et de sa capacité d'infiltration. Ainsi, on commencera dans ce rapport par une étude bibliographique sur la structure des sols et leur texture, puis sur la conductivité hydraulique, afin de prendre connaissance des différentes relations entre ces paramètres.

Ensuite, on fera la description des essais effectués sur des échantillons prélevés dans l'Yonne, après quoi on tentera une interprétation sur les résultats obtenus pour chercher une relation entre la conductivité hydraulique et les différents paramètres de la texture.

2. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1. Structure du sol

Le terme structure du sol est une expression pour décrire « le mode d'organisation des particules de sable, de limon et d'argile entre elles » [FAO web site]. Les sols peuvent être définis de manière générale comme le produit remanié et organisé de l'altération de la couche géologique superficielle. Il apparaît comme un complexe dynamique à trois phases :

- Phase solide : qui se présente comme l'accumulation d'un ensemble de grains, minéraux ou organiques, de taille diverses qui laissent entre eux des vides qui contiennent les deux autres phases.
- Phase gazeuse : sa composition est souvent voisine de celle de l'air mais elle peut être très variable dans l'espace et dans le temps donc elle dépend de deux facteurs principaux, la profondeur dans le sol et l'activité biologique.
- Phase liquide : composée principalement d'eau incluant l'ensemble des substances qui y sont dissoutes ou qui sont en suspension.

Cette description du sol comporte des grandeurs qui représentent, d'une part des spécificités propres à chacune des trois phases, d'autre part leur distribution dans le sol. Ces grandeurs sont des caractéristiques globales intrinsèques ou relatives. Concernant les caractéristiques intrinsèques, les phases constituant le sol s'expriment par leurs masses volumiques respectives ; concernant les caractéristiques relatives, la distribution quantitative des trois phases s'exprime par le volume total relatif qu'elles occupent (Calvet R., 2003a).

Ces caractéristiques sont utilisées sur le terrain et en laboratoire par les pédologues ou par les mécaniciens des sols pour les classer. L'étude physique des sols a aussi trait à la connaissance des interfaces de la fraction solide avec les vides, et des interfaces de la fraction gazeuse et de l'eau à l'intérieur de ces vides.

2.2. Texture des sols

La texture des sols est d'abord liée à la notion de composition granulométrique et se réfère à la proportion des unités texturales : le sable, le limon et l'argile. Elle s'exprimera en utilisant un diagramme triangulaire (diagramme des textures). Ce diagramme est divisé en plusieurs classes de texture de sol et ces classes sont décrites dans la Figure 1. Les noms des classes de texture peuvent être modifiés par l'addition d'adjectifs appropriés dans le cas où les fragments grossiers se présentent en quantités suffisamment importantes. Il existe de nombreuses versions du triangle selon les habitudes nationales ou selon l'application, c'est-à-dire le champ professionnel.

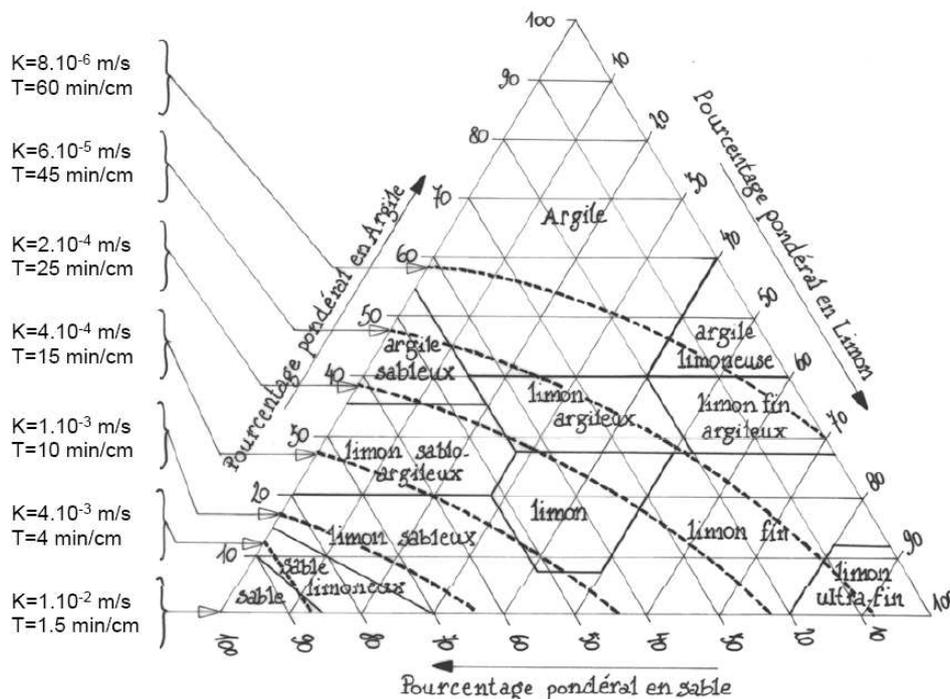


Figure 1. Relation entre diagramme des textures et conductivité hydraulique (Xanthoulis, FUSAGX).

2.3. Conductivité hydraulique

Par définition, la conductivité hydraulique est l'aptitude du sol à transmettre l'eau à travers le milieu poreux. Sa connaissance est indispensable pour l'étude des pollutions des sols. En milieu saturé, le déplacement de l'eau a lieu dans tous les pores interconnectés. Dans un milieu non saturé, elle ne s'effectue que dans la phase continue de l'eau qui n'occupe pas tous les pores. La conductivité en milieu non saturé croît avec la teneur en eau pour tendre vers la conductivité saturée (Figure 2).

2.3.1. Conductivité hydraulique dans un milieu saturé

La conductivité hydraulique dépend en premier lieu de la géométrie de l'espace poral, c'est-à-dire de la structure du sol. Les facteurs qui sont revus ci-dessous peuvent influencer la valeur de la conductivité hydraulique (Calvet R., 2003b).

2.3.1.1. L'agrégation du sol

Elle détermine la forme et les dimensions des pores. Tous les facteurs qui accroissent l'agrégation et stabilisent la structure ont un effet favorable sur la conductivité hydraulique à saturation. Au contraire, les facteurs qui provoquent une destruction des agrégats et qui diminuent la stabilité de la structure sont à l'origine d'une diminution de la conductivité hydraulique.

2.3.1.2. La composition granulométrique

La texture du sol est un des déterminants de la structure du sol. Tietje et Hennings (1996) ont pu vérifier certaines corrélations entre les teneurs de divers constituants et la valeur de la conductivité hydraulique. Ces corrélations fournissent des fonctions de pédotransfert et peuvent être utilisées pour estimer les valeurs de la conductivité hydraulique. Mais ces relations ne sont pas précises car elles sont basées sur la composition granulométrique et ne font pas intervenir les caractéristiques de la macroporosité.

2.3.2. Conductivité hydraulique dans un milieu non saturé

En milieu non saturé, la conductivité hydraulique a le même sens que pour les milieux saturés. Elle dépend aussi de la géométrie des pores, c'est-à-dire de leurs dimensions, de leur forme, de leur tortuosité et de leur connectivité. Or ces deux dernières caractéristiques dépendent du remplissage des pores donc de la teneur en eau. Plusieurs facteurs influent la valeur de la conductivité hydraulique en milieu non saturé et modifient sa dépendance à l'égard de la teneur en eau.

2.3.2.1. Histoire hydrique

Les fonctions obtenues au cours d'un dessèchement diffèrent de celles qui sont obtenues par hydratation. Les relations $K(\theta)$ (la fonction décrivant la relation entre la conductivité hydraulique et la teneur en eau) et $K(\psi_m)$ (la fonction décrivant la relation entre la conductivité hydraulique et le potentiel matriciel) présentent des phénomènes d'hystérésis. Elles dépendent donc de l'histoire hydrique des matériaux et des sols.

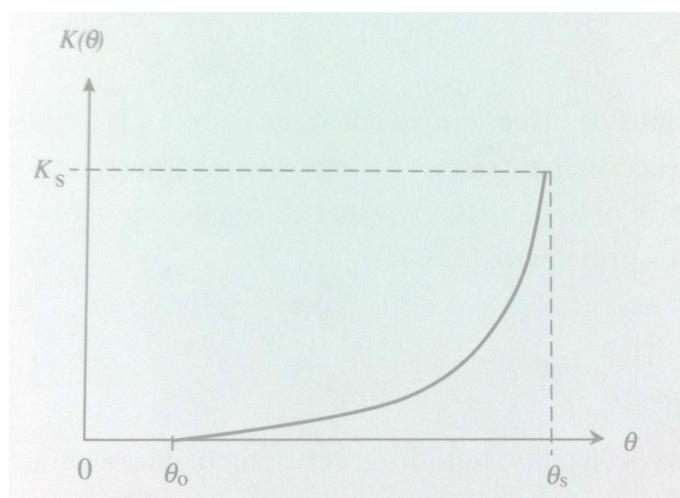


Figure 2 Courbe d'allure générale des relations $K(\theta)$ (Musy, 1991)

L'allure de la relation $K(\theta)$ indique que la conductivité est nulle au dessous d'un seuil θ_0 et qu'elle croît de façon exponentielle pour atteindre sa valeur maximale à saturation :

$$K(\theta_s) = K_s$$

Avec K_s la *conductivité hydraulique à saturation*

2.3.2.2. Composition ionique de l'eau dans le sol

Son influence s'exerce sur la stabilité de la structure quand la concentration en sodium devient plus importante. D'une manière générale, la conductivité hydraulique diminue quand la teneur en sodium augmente et quand la teneur du sol en phyllosilicates gonflants augmente.

2.3.3. Ordres de grandeur de la conductivité hydraulique

D'un point de vue pratique, il est utile d'avoir des repères pour situer la valeur de la conductivité hydraulique d'un sol. Les limites citées par Calvet (2003) sont généralement utilisées :

- Très petite perméabilité, $K_s < 10^{-7} \text{ ms}^{-1}$
- Petite perméabilité, $10^{-7} \text{ ms}^{-1} < K_s < 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$
- Perméabilité moyenne, $10^{-6} \text{ ms}^{-1} < K_s < 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$
- Grande perméabilité, $10^{-5} \text{ ms}^{-1} < K_s < 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$
- Très grande perméabilité, $10^{-4} \text{ ms}^{-1} < K_s$

Cette classification n'est pas suffisante pour décrire complètement la perméabilité d'un sol. La Figure 1 comporte une relation entre le diagramme des textures et la conductivité hydraulique.

3. REALISATION DES ESSAIS

3.1. Prélèvement d'échantillons

L'horizon de sol est l'unité de base du prélèvement. En pédologie comme en géotechnique, un des grands problèmes réside dans la représentativité des échantillons.

Les précautions à prendre lors du prélèvement d'échantillons sur le terrain dépendent d'abord de la problématique de l'analyse. Dans notre cas, vu les essais que l'on comptait faire, on n'était pas obligé de conserver la teneur en eau du sol ni de bloquer l'activité bactérienne. Cependant, on a conservé les échantillons dans une glacière pour pouvoir fournir à un collègue des échantillons aptes à la mesure des activités enzymatiques.

Six échantillons ont été prélevés lors du stage, auxquels se sont ajoutés des échantillons d'un talus représentatif de la géologie de la région, comportant 3 couches : le sol végétal, du calcaire fortement désagrégé et plus bas de l'argile.



Photo 1: Talus

La méthodologie de prélèvement se déroule comme suit :

- On discute d'abord sur le point exact où l'on va faire le prélèvement, à coté ou à l'aval du système ;
- On commence par un log afin d'identifier les horizons qui constituent le sol et de déterminer leurs épaisseurs, le log est effectué avec une tarière à main et le sol extrait est reconstitué dans un demi-tube en PVC puis protégé par un film ;
- D'après le log, on peut décider à quelle profondeur doit être fait le prélèvement de l'échantillon. Pour chaque échantillon, on prélève 5 kg au moyen d'une tarière thermique. On enfonce à la masse un cylindre de 10 cm de hauteur et 6 cm de diamètre à la profondeur souhaitée dans le sol puis on l'extrait par dégagement du terrain tout autour à la pioche, et pour finir on l'emballe dans du film.
- A la fin de l'échantillonnage, on remplit la fiche de prélèvement contenant :
 - o Les renseignements sur le propriétaire et le type de système ;
 - o Un croquis pour pouvoir situer approximativement le log et les points d'échantillonnage ;
 - o L'identification du log : sa position sur un GPS et le nombre d'horizons ;
 - o L'identification de l'échantillon ;
 - o Et enfin les remarques qu'on a faites lors du prélèvement.



Photo 2: utilisation d'une tarière à main



Photo 3: Log



Photo 4 : Trou avec la tarière thermique



Photo 5 : Un cylindre enfoncé

Le Tableau 1 est un récapitulatif des prélèvements effectués.

Tableau 1. Récapitulatif des prélèvements faits durant le stage

Nom de l'échantillon	Localité	Type d'assainissement	Profondeur de prélèvement
1-2	Sementron	filtre à sable non drainé	40-90
2-1	Coulangeron	filtre à sable non drainé	40-90
3	Coulangeron	filtre à sable non drainé	50
4-1	Merry Sec	filtre à sable non drainé	50
8-1	Chassy	filtre à sable non drainé	100-110
9-1	Egleny	Lit d'épandage	70-120
Couche 2 (talus)	Coulangeron	-	160
Couche 3 (talus)	Coulangeron	-	210

3.2. Description des logs

Sur les logs qu'on a prélevés (les photos des logs sont mises en annexes), on a observé principalement deux horizons minéraux qui constituent le sol :

- Horizon A : Il s'agit d'un horizon brun foncé, donc riche en matière organique. Il est de texture sableuse avec présence d'argile. La quantité d'argile, ainsi que la compacité, augmentent avec la profondeur. Les racines sont localisées dans les 20 premiers cm du sol et sont beaucoup plus denses dans les 10 premiers cm.
- Horizon B : dans la plupart de nos échantillons, cet horizon est du sol calcaire avec des graves et blocs calcaires et de l'argile, soit naturel soit en remblai.

3.3. Description des essais

3.3.1. Essais classiques

Plusieurs essais ont été effectués sur les échantillons prélevés, qui sont des essais classiques d'identification des sols.

3.3.1.1. Analyse de la granulométrie par sédimentation

L'analyse de la granulométrie par sédimentation est basée sur la loi de Stokes : la vitesse de chute d'une particule sphérique, tombant librement dans un fluide, est proportionnelle au carré de son rayon et à sa densité. Les résultats des analyses

granulométriques par sédimentation sur les échantillons prélevés sont résumés dans le Tableau 2.

Tableau 2. Résultat des analyses granulométriques par sédimentation

Echantillon	Diamètre des particules < 80 µm		
	%D < 2 µm	2 µm < D% < 50 µm	%D >50 µm
1-2	16,20	10,10	73,70
2-1	12,40	16,90	70,70
3	16,50	9,40	74,10
4-1	12,70	15,30	72,00
8-1	18,40	8,20	73,40
9-1	-	-	-
couche-2	20,20	9,50	70,30
couche-3	22,70	7,40	69,90

3.3.1.2. Humidité résiduelle

C'est la perte de poids de l'échantillon de sol après séchage à l'étuve à 105°C exprimée par rapport à l'échantillon séché à l'air.

$$HR = \frac{P_{air} - P_{105^{\circ}C}}{P_{air}} \cdot 100$$

Elle permet de vérifier la qualité du séchage à l'air, d'interpréter la perte au feu, de compléter la granulométrie, et d'exprimer toutes les concentrations des éléments majeurs comme des éléments traces par rapport à la matière sèche.

En général, l'humidité résiduelle est directement proportionnelle au taux d'argile et au taux de matières organiques. Valeurs courantes de 4 à 8% pour les textures argileuses, inférieures à 1% pour des horizons sableux peu humifères.

3.3.1.3. La teneur en carbone

La teneur en carbone : c'est le rapport de la masse de carbone contenue dans le sol à sa masse sèche totale. Du point de vue mécanique, elle est un bon indice de résistance du sol et de la sensibilité à l'eau. On qualifie les sols selon ce critère dans le Tableau 3.

Tableau 3. Qualification d'un sol selon sa teneur en carbonate

Teneur en carbonates (%)	Qualificatif
0 < C _{Ca} < 10	Non marneux
10 < C _{Ca} < 30	Faiblement marneux
30 < C _{Ca} < 70	Marneux
70 < C _{Ca} < 90	Calco-marneux
90 < C _{Ca} < 100	Calcareux, crayeux

La détermination se fait par décomposition du carbonate de calcium (CaCO_3) contenu dans le sol par l'acide chlorhydrique. L'acide étant en excès dans la réaction, le volume de gaz carbonique (CO_2) dégagé est proportionnel à la quantité de CaCO_3 contenu dans l'échantillon

3.3.1.4. Densité réelle

C'est une valeur qui moyenne les densités des constituants solides. On effectue la mesure du poids et du volume de la phase solide d'un petit échantillon sec. La mesure du volume poreux est réalisée par diminution du niveau d'eau dans un réservoir au cours de l'humidification de l'échantillon sec jusqu'à saturation. C'est un test délicat et imprécis car il reste souvent une phase air sous forme de bulles et on ne parvient donc pas à saturer totalement l'échantillon.

3.3.1.5. La densité apparente

C'est une donnée indispensable pour transformer telle ou telle valeur pondérale en une valeur volumique. Le prélèvement volumique est effectué avec un cylindre de volume connu, directement enfoncé dans le sol et dont les extrémités sont soigneusement biseautées. L'échantillon est recueilli, séché et pesé.

3.3.1.6. La porosité

La porosité est l'espace des vides résultant de l'assemblage des constituants du sol, et c'est une de ses caractéristiques essentielles. Elle est constituée par tous les vides entre les grains élémentaires, ainsi que par les vides qui se créent entre les agrégats et ceux qui proviennent de l'activité biologique.

3.3.1.7. Les limites d'Atterberg

L'état d'un sol peut-être liquide, plastique ou rigide. Les limites d'Atterberg sont les valeurs de teneur en eau qui séparent ces différents états : la limite de liquidité W_L et la limite de plasticité W_P . Ces limites sont utilisées dans les classifications des sols et permettent d'estimer les propriétés mécaniques. Leur connaissance permet (par corrélations) de présumer le comportement d'un sol donné (en fonction de la nature et de la quantité d'argiles qu'il contient) lorsqu'il est soumis à des sollicitations.

- Limite de liquidité déterminée à la coupelle



Photo 6 : Appareil de Casagrande

- Limite de liquidité déterminée au cône de pénétration : l'essai consiste à mesurer, après un temps fixe, l'enfoncement d'un cône sous son poids propre dans un échantillon de sol remanié.
- Indice de plasticité (I_p) est la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité :

$$I_p = W_L - W_P$$

L'indice de plasticité s'exprime en pourcentage du poids sec de l'échantillon de sol. Il indique l'étendue de la gamme des teneurs en eau entre lesquelles le sol reste plastique. Avec l'indice de plasticité on peut classer un sol (Tableau 4) suivant son degré de plasticité.

Tableau 4. Classification du degré de plasticité selon l'indice de plasticité d'un sol

Ordres de grandeur	I_p	Degré de plasticité du sol
- Argile $I_p > 30$	0 à 5	Sol non plastique
- Argile limoneuse $20 < I_p < 30$	5 à 15	Sol peu plastique
- Limon $10 < I_p < 20$	15 à 40	Sol plastique
- Sable argileux $5 < I_p < 20$	> 40	Sol très plastique
- Sable limoneux $5 < I_p < 15$		

Plus l'indice de plasticité est élevé, plus le sol est sensible aux effets de gonflement par humidification (ou de retrait par dessiccation).

3.3.1.8. Activité des argiles

Les argiles se présentent sous forme de plaquettes très fines et leur surface spécifique peut atteindre des valeurs très élevées. Cette structure confère aux argiles un ensemble de propriétés et un comportement appelé activité. Du fait de leur activité, en particulier, elles adsorbent les molécules de méthylène sur leur surface dans une solution de bleu de méthylène.

$$\text{Activité} = \frac{I_p}{\% \text{ Argile}} \quad [\text{Skempton (1953)}]$$

D'où la qualification de la fraction argileuse :	$0 < A < 3$	inactive
	$3 < A < 5$	peu active
	$5 < A < 13$	moyenne
	$13 < A < 18$	active
	$18 < A$	très active

Les résultats des différents essais sont donnés par le Tableau 5.

Tableau 5. Résultats des essais en laboratoire

Echantillon	humidité résiduelle (105°C) W_0	Densité apparente	Densité réelle	porosité	Teneur en Carbonates
	W_0 (%)	P_b (gr/cm ³)	P_s (gr/cm ³)	(n) %	(%Ca)
1-2	15,30	1,48	2,53	41,50	29,75
2-1	10,95	1,56	2,60	40,00	32,00
3	9,40	-	2,51	-	26,50
4-1	14,30	-	2,60	-	23,25
8-1	25,00	1,55	2,46	36,99	28,17
9-1	0,80	-	2,62	-	10,67
couche-2	0,30	-	2,60	-	45,33
couche-3	6,40	1,74	2,66	34,59	33,67

Echantillon	Indice de plasticité I_p	Qualification	Classification du degré de plasticité
1-2	9,60	moyenne	Peu plastique
2-1	16,15	active	plastique
3	7,74	moyenne	Peu plastique
4-1	11,23	moyenne	Peu plastique
8-1	23,33	Très active	plastique
9-1	-	-	-
couche-2	12,79	active	plastique
couche-3	22,68	Très active	plastique

3.3.2. La surface spécifique

Par définition, la surface spécifique (S_s) appelée aussi « Aire massique » représente la surface totale (A_s) par unité de masse (M) et on l'exprime généralement en m²/g.

La surface spécifique est une des caractéristiques les plus importantes des sols et des sédiments. Elle a été reliée (Tiller et Smith, 1990), au type et à la quantité d'argile, à la teneur en eau, à la minéralogie des argiles et à la capacité d'échange cationique, à la limite de liquidité et à l'angle de friction interne des sols.

La surface spécifique a été utilisée pour interpréter des caractéristiques physiques telles que le potentiel de retrait – gonflement et la susceptibilité au gel.

La surface spécifique déterminée à partir des techniques d'adsorption peut aussi être utilisée pour évaluer les propriétés chimiques de surface telles que l'adsorption des éléments chimiques, des métaux et phosphates dans les sols et la capacité de rétention d'eau.

3.3.2.1. Texture et surface spécifique

Plusieurs facteurs peuvent avoir une influence sur les valeurs mesurées de S_s . La taille, la forme, la composition minéralogique et l'état de surface des grains sont identifiés dans la littérature comme les facteurs les plus importants.

- La taille

Si l'on suppose que les grains sont sphériques et possèdent tous le même rayon (r), il est aisé de calculer S_s en fonction de r et de prouver que S_s augmente quand r diminue (Figure 3).

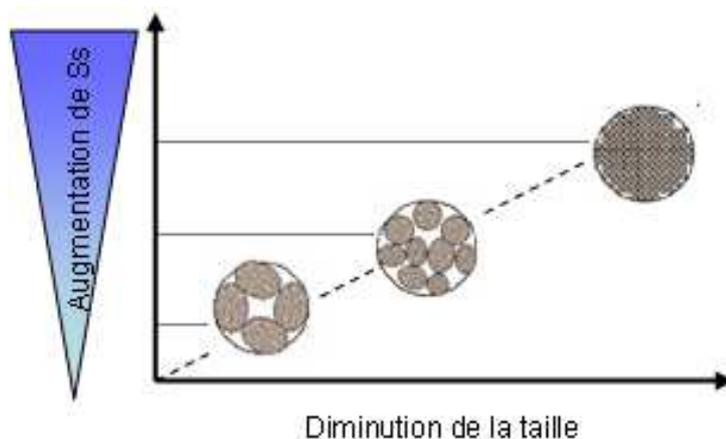


Figure 3 Influence de la taille des particules sur la surface spécifique (Tokunaga et al. 2003).

- La forme

La surface spécifique (S_s) dépend de la forme de la particule : quand elle s'aplatit la surface spécifique (S_s) augmente (Figure 4).

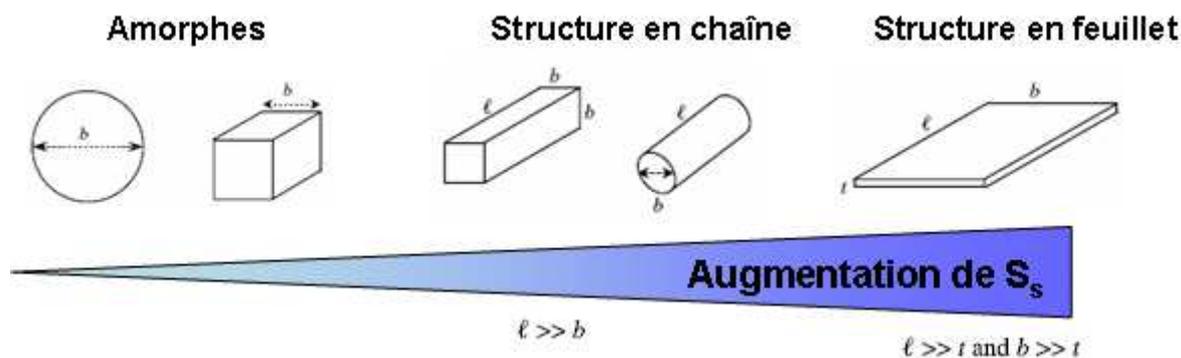


Figure 4 Influence de la forme de la particule sur la surface spécifique (Santamarina et al., 2001)

- L'état de surface

L'inspection microscopique met en évidence des irrégularités de surface qui donnent une surface réelle toujours supérieure à la surface idéale sans imperfections, selon Tokunaga et al. (2003). Des analyses de ces auteurs sur les fractions de graviers comprises entre 2 mm et 6 mm, ont montré que la rétention d'eau est fonction de l'état de surface et de la porosité intra granulaire. La Figure 5 montre les différents états de surface d'un grain arrondi. Les mêmes variétés de morphologie existent aussi pour les grains angulaires. La représentation la plus simple correspond au grain de surface lisse pour lequel la porosité intragranulaire est négligeable. D'autres possibilités incluent des grains à surface rugueuse avec une grande porosité interne, ainsi que l'altération superficielle causée par les agents atmosphériques.

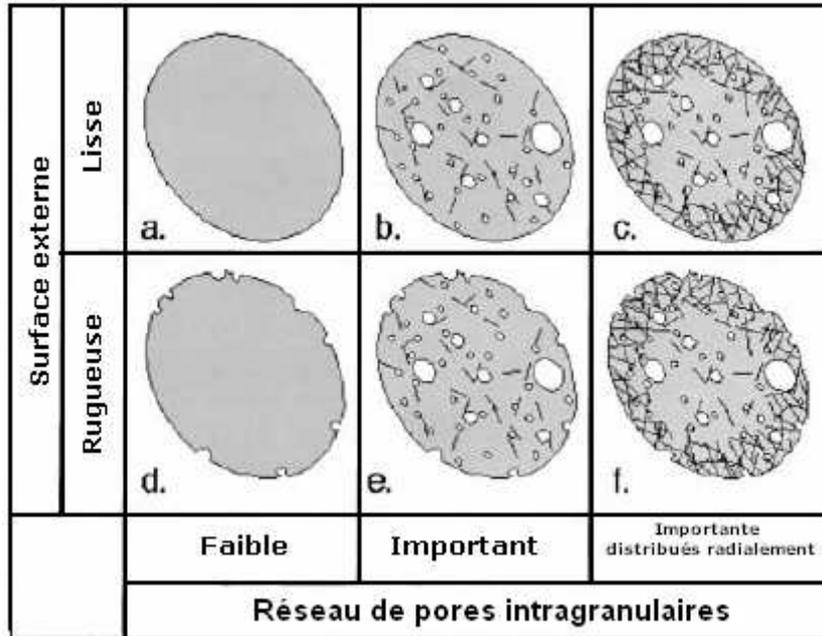


Figure 5 : Les différents états de surface de grain (Tokunaga et al., 2003)

La surface spécifique comprend des effets combinés des facteurs mentionnés ci-dessus. De plus, comme il existe diverses méthodes pour déterminer la surface spécifique, la procédure de mesure peut aussi avoir une influence sur les valeurs mesurées.

Les méthodes de mesure de la surface spécifique peuvent être groupées dans deux catégories principales qui sont :

- L'adsorption de gaz, qui mesure la surface spécifique externe des particules par l'adsorption de molécules simples, telles que la vapeur d'eau ou l'azote (N₂) à basse température : méthode BET
- L'adsorption des molécules, qui mesure la surface spécifique totale des particules par l'adsorption des liquides polaires : méthode au bleu de méthylène.

3.3.2.2. Méthode Brunauer, Emmett and Teller (BET)

Dans les méthodes d'adsorption de gaz, la surface spécifique est déterminée à partir de relations entre la pression appliquée et le volume d'un gaz forcé à pénétrer à travers l'échantillon, selon la théorie d'adsorption de gaz de Brunauer, Emmett, and Teller (BET). Cette technique est développée sur un échantillon sec. Cependant, l'azote (N₂) qui est un gaz neutre, ne peut pas pénétrer entre les couches des argiles gonflantes. C'est la raison pour laquelle la valeur de la surface spécifique obtenue par cette méthode se réfère seulement à la surface externe de la particule.

3.3.2.3. Méthode au bleu de méthylène

L'essai consiste à déterminer la surface spécifique d'échange d'un sol argileux en mesurant la quantité de colorant nécessaire pour recouvrir par une monocouche de bleu de méthylène la surface totale, externe et interne, de toutes les particules argileuses présentes dans la solution à étudier.

Le principe de cet essai repose sur les échanges ioniques entre les cations des argiles, facilement échangeables, et les cations de bleu de méthylène libérés lors de sa dissolution dans l'eau. Les particules argileuses ayant une grande surface spécifique ainsi qu'une capacité d'échange ionique importante, la présence de minéraux argileux pourra être mise en évidence par l'emploi de bleu de méthylène et par comparaison avec la surface spécifique interparticulaire mesurée au BET. On peut calculer cette « valeur au bleu » par la formule :

$$VB = \frac{V_b}{M_s}$$

Où V_b : le volume total de bleu utilisé en ml
 M_s : la masse sèche de fines de sol utilisé pour l'essai

Sachant que la molécule de bleu de méthylène recouvre une surface de 130 \AA , que la masse molaire de bleu est de $319,86 \text{ g/mole}$ et que le nombre d'Avogadro est de $6,022 \cdot 10^{23}$ molécules/mole, la surface spécifique se calcule par la formule :

$$S_s = \frac{VB}{100 \cdot 319,86} \cdot 130 \cdot 10^{-20} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} = 24,5 \cdot VB$$

Pour les interprétations des valeurs au bleu, quand :

- VBS < 0,1 Sol insensible à l'eau
- VBS = 0,2 Apparition de la sensibilité à l'eau
- VBS = 1,5 Seuil distinguant les sols sablo limoneux des sols sablo argileux
- VBS = 2,5 Seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques des sols limoneux de plasticité moyenne
- VBS = 6 Seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux
- VBS = 8 Seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux

Les résultats obtenus lors de nos essais sont résumés dans le Tableau 6.

Par la suite, on a beaucoup amélioré la précision de nos mesures de la valeur au bleu au moyen d'un spectrophotomètre. La méthode est expliquée en annexe.

Tableau 6. Résultats des essais au bleu de méthylène et au BET

Echantillon	Surface Spécifique totale (BM)	Surface Spécifique externe (BET)
	Ss (m2/gr)	Ss (m2/gr)
1-2	66,40	7,16
2-1	61,30	26,01
3	58,80	16,50
4-1	84,90	23,23
8-1	144,60	14,04
9-1	6,13	5,01
couche-2	73,50	28,84
couche-3	93,10	43,34

4. Description des essais d'infiltration

4.1. Méthode du Perméamètre de Guelph

Cette méthode a été mise au point à l'université de Guelph (Canada) par Reynolds et al. en 1985 pour mesurer la conductivité hydraulique, et les relations entre conductivité hydraulique et tension de l'eau dans le sol. C'est un perméamètre dont la charge est régulée, pour rester constante, par un vase de Mariotte, et qui permet la mesure d'un flux d'eau passant au travers d'une crépine cylindrique et par le fond d'un trou, creusé à la tarière dans le sol.

Le principe de la mesure consiste à créer dans un sol non saturé, un bulbe saturé en appliquant une charge hydraulique constante dans le fond d'un trou de tarière. Le régime permanent est atteint lorsque le débit qui s'écoule devient constant.

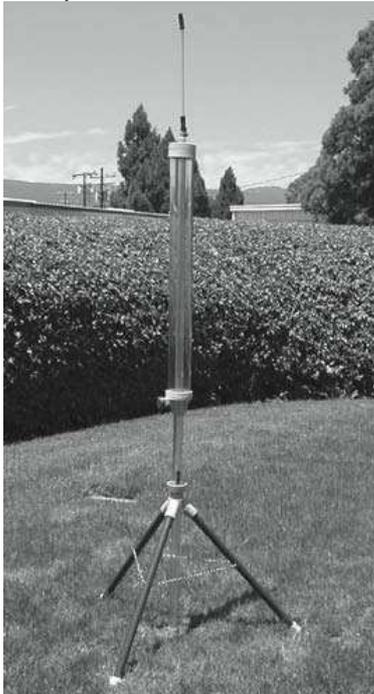


Photo 7: Perméamètre de Guelph

Le calcul de la conductivité hydraulique K_{fs} et du potentiel matriciel Φ_m se fait comme suit. On a les valeurs X et Y données par le fabricant, pour notre cas : $X=35,37$ et $Y=2,16$. La constante X intervient dans les calculs lorsque les réservoirs combinés sont utilisés et la constante Y quand seul le réservoir intérieur est utilisé.

Les mesures sont réalisées avec *deux charges hydrauliques différentes* de 5 cm et 10 cm, *normalement faites dans deux trous distincts*. On interprète les vitesses de descente du niveau de l'eau dans les réservoirs : on prend la moyenne des trois dernières mesures, R_1 et R_2 en [cm/sec].

On a : R_1 la moyenne des trois dernières mesures pour le premier test à 5 cm

R_2 la moyenne des trois dernières mesures pour le second test à 10 cm.

La résolution se fait de la manière suivante :

- Lorsque les deux réservoirs sont utilisés :

$$K_{fs} = (0,0041 \times X \times R_2) - (0,0054 \times X \times R_1)$$

$$\phi_m = (0,0572 \times X \times R_1) - (0,0237 \times X \times R_2)$$

- Lorsqu'un seul réservoir est utilisé :

$$K_{fs} = (0,0041 \times Y \times R_2) - (0,0054 \times Y \times R_1)$$

$$\phi_m = (0,0572 \times Y \times R_1) - (0,0237 \times Y \times R_2)$$

Les résultats d'un de nos essais sont résumés dans le Tableau 7. Ces essais ont été réalisés lors d'une mission de terrain commune avec le CEMAGREF.

Tableau 7. Fiche de calcul de la méthode du perméamètre de Guelph

5 cm			10 cm		
Temps (min)	H (cm)	R (cm/sec)	Temps (min)	H (cm)	R (cm/sec)
0	13		0	18,7	
3	14,2	0,007	3	26,3	0,042
6	16,4	0,012	6	32,2	0,031
9	18,2	0,010	9	36,5	0,025
12	20	0,010	12	41,5	0,028
15	22,2	0,012	15	46,8	0,029
18	25,2	0,017	18	51	0,023
21	28,8	0,020	21	56,8	0,032
24	32,2	0,019	24	61,8	0,028
27	35,2	0,017	27	66,6	0,027
30	38,8	0,020	30	71,4	0,027
33	42,1	0,018	33	76	0,026
36	45,4	0,018			

On a : $R_1 = 0,019$ et $X = 35,37$
 $R_2 = 0,026$ $Y = 2,16$

Dans notre cas on a utilisé les deux réservoirs, alors :

$$K_{fs} = (0,0041 \times X \times R_2) - (0,0054 \times X \times R_1) = 1,42 \times 10^{-4} \text{ cm / s}$$

$$\phi_m = (0,0572 \times X \times R_1) - (0,0237 \times X \times R_2) = 1,67 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 / \text{s}$$

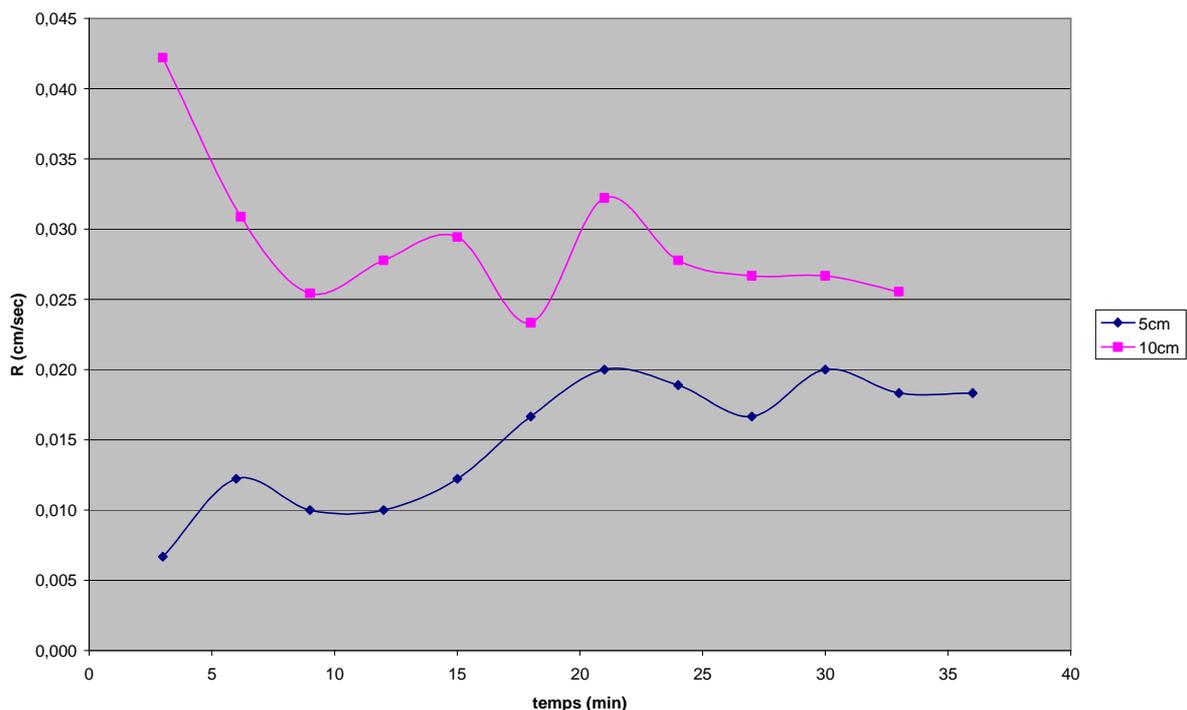


Figure 6. Courbe de la vitesse de la descente du niveau de l'eau en fonction du temps.

4.2. Méthode de Porchet

La méthode Porchet permet de mesurer la conductivité hydraulique horizontale déterminée au champ. Cette méthode peut être à niveau variable ou à niveau constant.

La mesure à niveau variable ne permet pas d'accéder à une conductivité hydraulique mais plutôt à un coefficient d'infiltration (m/s) En effet, pour que cet essai puisse représenter une valeur de la conductivité hydraulique, il faudrait être sûr de la saturation du milieu dans lequel la mesure est réalisée.

Dans notre cas, on a effectué l'essai à niveau constant. Les mesures de type Porchet à niveau constant sont préconisées pour l'évaluation de l'infiltration dans le sol pour les installations d'assainissement. La mesure porte sur l'abaissement en fonction du temps d'un niveau d'eau dans un trou de tarière (Tableau 8). La valeur de la perméabilité K est :

$$K = \frac{\text{débit}_{\text{moyen}}}{\text{surface}_{\text{totale}} \text{trou}} = \frac{1,40 \cdot 10^{-6}}{1240,93 \cdot 10^{-4}} = 1,13 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

Tableau 8. Fiche de calcul de la méthode Porchet

Profondeur du trou	53cm	Surface totale du trou (cm ²)	1240,93	Colonne	
Diamètre du trou	10cm			Surface (cm ²)	78,54
Hauteur entre le sol et l'eau	16cm	Elancement de la cavité	3,7		
		Facteur de forme	11,62		
Pas	2mn			Charge appliquée (cm)	37

n° mesure	Temps de mesure (min)	Hauteur d'eau (cm)	Variations de hauteur d'eau	Débit d'eau dans la cavité (m ³ /s)	Vérification du régime d'écoulement
1	0	43,5			
2	2	41,9	1,6	1,05E-06	Permanent
3	4	40,3	1,6	1,05E-06	Permanent
4	6	38,8	1,5	9,82E-07	Permanent
5	8	37,3	1,5	9,82E-07	Permanent
6	10	35,5	1,8	1,18E-06	Permanent
7	12	34	1,5	9,82E-07	Permanent
8	14	32,4	1,6	1,05E-06	Permanent
9	16	30,9	1,5	9,82E-07	Transitoire
10	18	28,6	2,3	1,51E-06	Permanent
11	20	25,7	2,9	1,90E-06	Permanent
12	22	22,8	2,9	1,90E-06	Transitoire
13	24	20	2,8	1,83E-06	Permanent
14	26	17,4	2,6	1,70E-06	Permanent
15	28	14,7	2,7	1,77E-06	Transitoire
16	30	12,3	2,4	1,57E-06	Permanent
17	32	9,8	2,5	1,64E-06	Permanent
18	34	7,5	2,3	1,51E-06	
19	36	5	2,5	1,64E-06	
20	38	2,8	2,2	1,44E-06	
31	60				
			Moyenne	1,40E-06	

Hauteur d'eau en fonction du temps

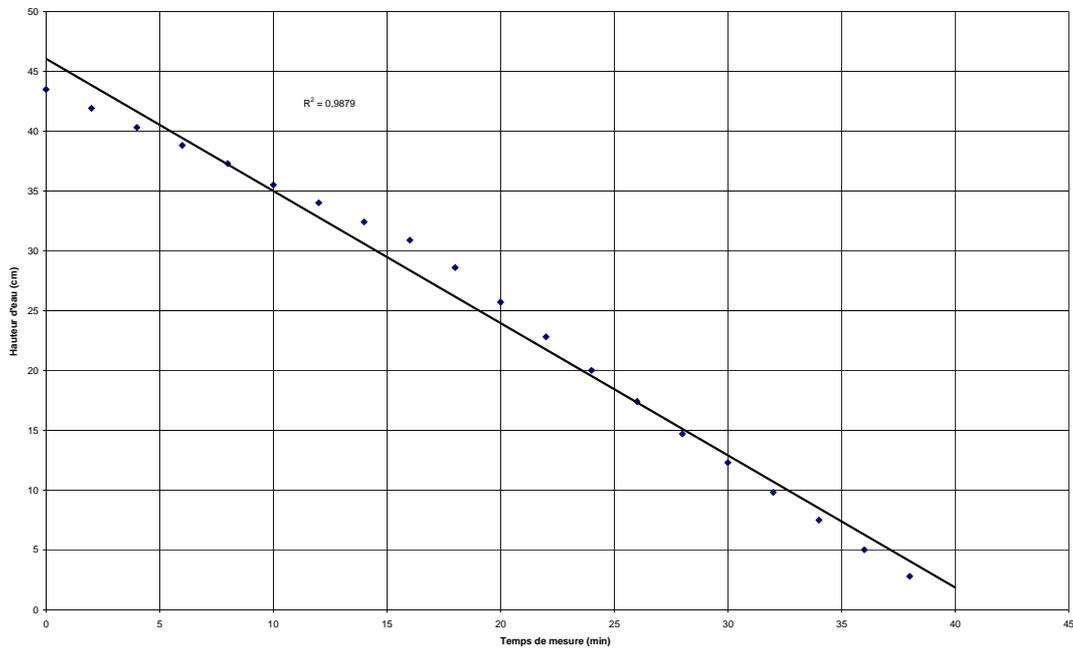


Figure 7. Courbe de la hauteur d'eau en fonction du temps.

Les résultats de tous les essais Porchet sont résumés dans le Tableau 9. Ces essais ont été réalisés lors d'une mission de terrain commune avec le CETE IDF.

Tableau 9. Résultats de tous les essais par la méthode de Porchet

Site	Emplacement	Valeur de perméabilité (m/s)	Valeur de perméabilité (mm/h)
Egleny	1	3,16E-05	114
		2,83E-05	102
	2	3,70E-05	133
		2,57E-05	92,6
Les Ormes	1	1,66E-06	5,98
	2	1,89E-06	6,82
Merry Sec	1	8,11E-06	29,2
	2	9,89E-06	35,6
Les Doyes	1	5,58E-07	2,01
	2	4,11E-06	14,8
Château Cherry	1	6,13E-06	22,1
		7,90E-06	28,4
	2	1,47E-05	52,9
		1,29E-05	46,3
Sementron	1	1,13E-05	40,7
		2,97E-05	107
		2,71E-05	97,6
		2,60E-05	94

4.3. Méthode du double anneau

Les méthodes de mesure de l'infiltration in situ visent à connaître le flux vertical de l'eau en régime constant. Le principe repose sur la mesure du débit s'infiltrant au travers d'une surface bien délimitée d'un sol sous une charge hydraulique constant.

Les principales sources d'erreurs sont la manière d'apporter l'eau et l'implantation de l'anneau, le respect du niveau de la lame d'eau dans l'anneau et l'arrêt des mesures avant que le sol ait atteint son gonflement maximal.



Photo 8: Double anneau

Une formation sur le terrain, assurée par le CEMAGREF, nous a permis de réaliser deux essais lors d'une mission de terrain commune. Les résultats n'en sont pas rapportés ici car ils n'ont pas été faits sur les mêmes sites que les autres essais.

5. Interprétation des résultats

On présente une interprétation sur les résultats qui sont donnés dans le Tableau 10.

Tableau 10. Comparaison des résultats de plusieurs essais

Echantillon	surface spécifique totale (BM)	surface spécifique externe (BET)	Pourcentage Argile	Activité	Indice de plasticité (I_p)
	Ss (m ² /gr)	Ss (m ² /gr)	%		
1-2	66,40	7,16	16,20	0,59	9,60
2-1	61,30	26,01	12,40	1,30	16,15
3	58,80	16,50	16,50	0,47	7,74
4-1	84,90	23,23	12,70	0,88	11,23
8-1	144,60	14,04	18,40	1,27	23,33
9-1	6,13	5,01	-	-	-
couche-2	73,50	28,84	20,20	0,63	12,79
couche-3	93,10	43,34	22,70	1,00	22,68

Plusieurs critères sont convergents et on peut classer le sol. D'après le diagramme des textures, tous nos prélèvements sont dans la gamme des limons sableux. Ceci est aussi vérifié par les valeurs de l'indice de plasticité qui sont grossièrement compris entre 10 et 20. On a en général un sol moyennement actif et peu plastique. On voit bien sur les résultats de la surface spécifique déterminée par le bleu de méthylène nous donne la quantité totale de surface spécifique mais pour connaître mieux l'impacte du texture du sol, il faut mesurer la surface spécifique interne comme paramètre complémentaire sur la teneur en argile et le type de l'argile. Plus la différence entre ces deux valeurs est grande, plus on a de l'argile dans l'échantillon. Notre procédure est validée par l'échantillon 9-1 qui est connu comme un sable vrai : on voit bien qu'il y a très peu de différence entre les mesures des deux essais. Cette petite différence peut signifier qu'il existe quand même une infime partie d'argile dans ce sable.

Avec ces paramètres, on n'a pas vraiment d'idée précise sur le type d'argile. Donc pour confirmer ce type, on a effectué un essai MEB mais on n'a pas encore les résultats. Pour notre cas, on peut penser que le type d'argile est de l'illite et de kaolinite.

Tableau 11 Surface spécifique des minéraux argileux les plus courants

	Kaolinite	Illite	Montmorillonite
surface spécifique (m ² /g)	10-20	80-100	400-800

D'après la Figure 1, avec des pourcentages d'argiles compris entre 12 et 22 % et les conductivités hydrauliques supérieures à 10^{-6} m/s, nos sols sont qualifiés de perméables et satisfont aux critères pour la mise en œuvre d'un assainissement non collectif (Brigand et Lesieur, 2008). La norme XP DTU 64.1 conseille en effet que la conductivité hydraulique doit être supérieure à 10^{-6} m/s pour que l'infiltration des

eaux traitées soit admise. Dans le cas contraire, un drainage avec rejet au fossé est recommandé le plus souvent.

Plusieurs essais d'infiltration ont été faits sur site, dont les résultats sont exposés dans le Tableau 9. Nos essais ont été faits sur un sol qui n'a pas été bien saturé. L'essai avec la méthode Guelph a été fait *dans le même trou* avec les deux charges de 5 cm d'abord, puis de 10 cm. La courbe (Figure 6) pour la charge de 5 cm monte et arrive à se stabiliser autour de la K_s de saturation. L'essai à charge de 10 cm à partir d'un état du sol déjà proche de la saturation, ce qui explique la descente de la courbe avant sa relative stabilisation.

6. CONCLUSIONS

Des essais classiques ont servi pour déterminer la texture du sol. Les diagrammes de textures sont utilisés pour classer les sols selon leurs propriétés. D'après les essais effectués, on peut classer le sol suivant son indice de plasticité et estimer s'il est actif. On remarque que nos sols, issus de faciès lithologiques différents, sont dans la même classe du point de vue de la mécanique des sols. On a donc employé la méthode BET, confrontée à la valeur au bleu, pour affiner la description de la surface spécifique afin de distinguer et hiérarchiser ces sols par leur teneur en argiles. Ces informations sur les sols nous aideront à mieux comprendre le traitement des eaux usées par le sol et leur transfert vers la nappe par infiltration.

D'autres approches existent (colonnes de sol au laboratoire, approche numérique) mais dans ce stage, on a choisi de suivre une approche expérimentale in situ de l'infiltration dans le sol. Nos essais d'infiltration montrent qu'on est dans la gamme où l'on peut choisir un assainissement non collectif avec évacuation dans le sol sous-jacent car les sols sont assez perméables pour transférer les eaux traitées.

Lors de la conception, les propriétés des sols sont rarement testées de façon suffisante par un bureau d'étude et le choix d'évacuer les eaux par le sol est le plus souvent fait de façon intuitive ou empirique. Nos résultats n'invalident pas cette pratique. Un échange avec le SPANC est désormais nécessaire pour comprendre sur quels critères (observation, connaissances agronomiques, expérience du terrain) il a fondé ses choix.

Notre caractérisation de la texture permettra de proposer au gestionnaire (SPANC) des indicateurs pertinents pour l'évaluation des fonctions physiques des sols telles que la capacité d'infiltration et la rétention d'eau.

Résumé

Le présent rapport montre les études faites pour avoir une bonne connaissance de la nature du sol et de sa capacité d'infiltration qui sont très important pour la réalisation d'un ouvrage de traitement d'un assainissement non collectif. Dans la première partie du rapport, on donnera plusieurs définitions afin de prendre connaissance de différentes relations entre la structure des sols et leur texture, et la conductivité hydraulique. Puis dans la seconde partie, une description des essais effectués sur des échantillons prélevés dans l'Yonne et des essais d'infiltration in situ sera établie. Enfin, on tentera une interprétation sur les résultats obtenus pour chercher une relation entre la conductivité hydraulique et les différents paramètres de la texture.

Abstract

This report shows the studies to have a good knowledge of the nature of the soil and infiltration capacity. they are very important for the building of a structure for processing a sewerage. In the first part, will be given several definitions to be aware of different relationships between soil structure and texture, and hydraulic conductivity. In the second part, a description of the tests performed on samples taken in the Yonne and infiltration tests will be established. Finally, we attempt an interpretation of the results to find a relationship between hydraulic conductivity and the parameters of the texture.

Références bibliographiques

- BAIZE D., JABIOL B. (1995) Guide pour la description des sols, INRA Editions, 388 p.
- BAIZE D. (2000) Guide des analyses en pédologie, 2^{ème} édition revue et augmentée, INRA Editions, 266 p.
- BILLAULT C. (1995) Guide pour la description des sols, INRA Editions, 388 p.
- BRIGAND S., LESIEUR V. (2008) Assainissement Non Collectif, Le Moniteur. 257p.
- CALVET R. (2003a) Le Sol : Propriétés et fonction Tome 1, Constitution et structure, phénomènes aux interfaces, France Agricole, 455 p.
- CALVET R. (2003b) Le Sol : Propriétés et fonction Tome 2, Phénomènes physiques et chimiques, Editions France Agricole, 511 p.
- CHOSSAT J.C. (2005) La mesure de la conductivité hydraulique dans les sols : Choix des méthodes, Lavoisier, 455 p.
- FAO Web site
ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706f/x6706f07.htm
- GIASSON P., JAOUICH A. (2008) Les propriétés physiques du sol
http://hydrohane.com/Documents/Chap_3_Proprietes_chimiques_des_sols.pdf
- HANG T., BRINDLEY, (1995) Applied Clay Science February 1995, Pages 327-336
- HENIN S. (1976) Cours physique du sol I, ORSTOM et EDITEST
- HENIN S. (1977) Cours physique du sol II, ORSTOM et EDITEST
- KONRAD J. M., GABEZAS F. A. V. (2008) Caractérisation des particules fines d'un matériau granulaire de fondation par l'essai au bleu de méthylène, Rapport GCT-2008-01, 99 p.
- LASSABATERE L. et al. (2006) Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments—BEST, Soil Sci. Soc. Am. J. 70:521–532
- LOZET J. (2002) Dictionnaire de Sciences du Sol, Lavoisier, 575p.
- MALLANTS D., TSENG P. H., JACQUES D., FEYNEN J. (1996) Comparison of three hydraulic property measurement methods, p. 295-318
- MATHIEU C., PIELTAIN F. (1998) Analyse physique des sol : Méthodes choisies, Lavoisier Technique & Documentation, 275 p.
- MUSY A., SOUTTER M. (1991) Physique du sol, Presses polytechniques et universitaires romandes, 275 p.
- REED S. J. B. (2005) Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology – Second edition

- ROOSE E., SMOLIKOWSKI B. (1997) Comparaison des trois techniques de mesure de l'infiltration sur fortes pentes, 15 p.
- SKEMPTON, A. W. (1953) Activité, Activité Relative et Surface spécifique des sols granuleux fins
- TIETJE O., HENNINGS V. (1996) Accuracy of the saturated hydraulic conductivity prediction by pedotransfer functions compared to the variability within FAO textural classes. *Geoderma* 69(1-2):71-84.
- TILLER K. G., SMITH L. H. (1990) Limitations of EGME retention to estimate the surface area of soils, CSIRO, *Australian Journal of Soil Research* 28 (1) 1 – 26
- VAUCLIN M. et al. (1994) Hydraulic conductivity measurements of the spatial variability of a loamy soil, Elsevier Science B.V., *Soil Technology* volume, 7 issue 3, p.181-195
- WINIARSKI T. et al. (2007) Etude hydrogéophysique de la zone non saturée hétérogène d'un bassin d'infiltration d'eaux pluviales, BLPC n°268-269 juil/août/sept 2007
- XANTHOULIS D., Physique du sol. Cours en ligne FUSAGX
http://www.argenco.ulg.ac.be/etudiants/Multiphysics/Xanthoulis_Physique%20du%20sol.pdf

Table des matières

1. INTRODUCTION	1
2. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	1
2.1. Structure du sol.....	1
2.2. Texture des sols.....	2
2.3. Conductivité hydraulique	2
2.3.1. Conductivité hydraulique dans un milieu saturé.....	2
2.3.1.1. L'agrégation du sol.....	3
2.3.1.2. La composition granulométrique.....	3
2.3.2. Conductivité hydraulique dans un milieu non saturé.....	3
2.3.2.1. Histoire hydrique.....	3
2.3.2.2. Composition ionique de l'eau dans le sol.....	4
2.3.3. Ordres de grandeur de la conductivité hydraulique	4
3. REALISATION DES ESSAIS.....	4
3.1. Prélèvement d'échantillons	4
3.2. Description des logs.....	6
3.3. Description des essais.....	6
3.3.1. Essais classiques	6
3.3.1.1. Analyse de la granulométrie par sédimentation	6
3.3.1.2. Humidité résiduelle.....	7
3.3.1.3. La teneur en carbone.....	7
3.3.1.4. Densité réelle	8
3.3.1.5. La densité apparente	8
3.3.1.6. La porosité	8
3.3.1.7. Les limites d'Atterberg	8
3.3.1.8. Activité des argiles.....	9
3.3.2. La surface spécifique	10
3.3.2.1. Texture et surface spécifique.....	11
3.3.2.2. Méthode Brunauer, Emmett and Teller (BET)	12
3.3.2.3. Méthode au bleu de méthylène.....	12
4. Description des essais d'infiltration.....	14
4.1. Méthode du Perméamètre de Guelph.....	14
4.2. Méthode de Porchet.....	16
4.3. Méthode du double anneau	18
5. Interprétation des résultats	19
6. CONCLUSIONS.....	20
Références bibliographiques	
Annexes	

ANNEXES

ANNEXE 1. *Protocoles d'analyse de la surface spécifique : comptes-rendus de formations reçues au Cnam en mars 2011, 4 jours.*

ANNEXE 2. *Rapport de la mission de terrain n°1.*

ANNEXE 3. *Résultats de l'essai d'infiltration par la méthode Guelph sur le site 3*

ANNEXES 4 : *Courbes Granulométriques*

ANNEXE 1 : *Protocoles d'analyse de la surface spécifique : comptes-rendus de formations reçues au Cnam en mars 2011, 4 jours.*

Méthode Brunauer, Emmett and Teller (BET)

1. *Appareillage*

- Micromeritics ASAP 2000
- Cellule ;
- Tige de verre pour les petite surface ($<1\text{mm}^2$);
- Manchon isothermique pour que la cellule pompe l'azote liquide à hauteur constant.

Le premier réflexe à avoir lors de l'essai est d'avoir une idée sur les caractéristiques de l'échantillon. La pesé de l'échantillon dépend de la surface spécifique du produit et du gaz.

Les substances volatiles d'un échantillon comme l'eau adsorbée, sont vaporisées quand les échantillons sont placés sous évacuation de l'appareil (ASAP 2000). La préparation nécessite du temps avant de procéder à l'analyse. Il est judicieux de sécher les échantillons avant de les traiter dans les stations de dégazage. Une étuve sous vide doit être utilisée pour conditionner les échantillons avant de les placer sur les supports pour dégazage

2. *Dégazage*

Des tubes échantillons doivent être utilisés sur les stations de dégazage et d'analyse de l'ASAP 2000. Un écrou adaptateur peut être fourni pour adapter les deux montages de petit diamètre sur les postes de dégazage et d'analyse.

Les différents constituants du tube (tube, bouchon, entonnoir, etc.....), doivent être pesés et conservés. Cela évite une nouvelle pesée avant chaque analyse. Le poids du tube échantillon doit être déterminé après avoir été dégazé et rempli de gaz. Le tube échantillon doit être à température ambiante avant remplissage de gaz. Après refroidissement du tube échantillon, le retirer du port de dégazage et le peser immédiatement.

Lors du dégazage, il faut travailler en manuel. La démarche se suit comme suit :

- Attendre que « Ready » soit allumé, c'est-à-dire qu'on a accès aux vannes ;
- Arrêter de faire le vide en appuyant sur « Fast » ;
- Appuyer sur « Back fil Gaz » pendant 15secondes ;
- Ouvrir la vanne de l'échantillon puis dégazer en « slow » ;
- Mis en place du manchon sur la cellule pour chauffer jusqu'à 90°C ;
- Activer le chauffage en appuyant sur « Enable ».

Dans la zone du micromètre, à l'indication micrométrique $800\mu\text{m}$ on applique « Fast » mais attention ce n'est pas applicable pour les matériaux très fins. Quand on passe au dessous de $50\mu\text{m}$ le dégazage est terminé.

Une fois le dégazage est fini, on arrête le chauffage puis on enlève le manchon et on laisse refroidir la cellule, la valeur limite du Vacuum est de 24.

Certains échantillons peuvent perdre plus de la moitié de leur volume pendant le dégazage : il est donc important de les peser après dégazage.

3. Logiciel

En premier lieu, on donne un nom à l'échantillon et savoir ce qu'on veut faire.

On introduit les différents paramètres dans le logiciel :

- Unit configuration : on effectue le choix entre N₂, Argon, CO₂ et Krypton.
- Analysis conditions pour enregistrer les nouvelles caractéristiques ;
- Créer une méthode d'analyse (choisir une méthode existante et on la modifie) ;
- Revenir à analysis conditions file :
 - o Ne pas faire Fast évacuation ;
 - o Leak test pour vérifier la qualité du dégazage mais à éviter si on ne connaît pas l'échantillon ;
 - o Equilibration intervalle : 10s
 - o Ne pas cocher « maximum volume incrément quand échantillon non microporeux » ;
 - o Sur free space (volume mort) cocher sur mesuré parce qu'on n'as pas fait l'essai avec une cellule vide ;
 - o Décrocher Lower Dewar.
- Configurer la pression :
 - o Cocher la zone BET (0.05-0.3), adsorption de 0.15 -0.989, désorption de 0.988-0.30 ;
 - o On coche la case total pore volume avant le dernier point en adsorption si on a une courbe isotherme type I ;
 - o Low pressure options : pour ne pas prendre beaucoup de temps, ne pas cocher sur « fixes Dose Mode » et aussi sur « incremental Dose Mode » car ça ne prend pas en considération la table de pression ;
 - o P₀ doit être mesurer et entrer T = 77.35°K ;
 - o Back fill: cocher sur backfill sample at start of analysis, backfill sample at end of analysis et sur analysis gas.

Enfin enregistrer tous les données en appuyant sur « Save et close ».

Pour générer le rapport, on va dans « report option » et choisir le type de rapport. Et après sur « collected data » mais tant que l'essai n'est pas fait, on n'a pas de données.

4. Analyse

Avant de commencer une analyse, une calibration doit être effectuée.

- Fermer l'action du vide en appuyant sur « Fast » ;
- Appuyer sur Backfill Gas durant 15s ;
- Fermer vanne cellule ;
- Enlever la cellule + seal frit ;
- Placer le manchon isothermique : tube blanc jusqu'à mi-partielle blanche.
- Mettre l'azote liquide une fois la cellule avec l'échantillon est fixée ;
- Lancer la manipulation

Il faut suspendre l'essai pour ajouter de l'azote liquide

Méthode de la valeur au bleu mesurée au spectrophotomètre

La détermination de la valeur au bleu par la méthode au spectrophotomètre nécessite l'utilisation d'environ 7 béchers par fraction de chaque échantillon avec différentes concentrations de bleu de méthylène.

Appareillage :

- Agitateur, 400 rpm ;
- Béchers, 1000 ml ;
- Tige de verre, D= 8 mm ;
- Burette, 50 ml ou 10 ml ;
- Papier filtre ;
- Centrifugeuse ;
- Spectrophotomètre.

Préparation de l'échantillon :

1. Séchés au four à une température de 110°C pendant 24 heures, ensuite les échantillons ont été passés dans des tamis ayant des ouvertures de 400 µm, 160 µm, et 80 µm. La masse de la prise d'essai est fonction de la quantité d'argile ou des particules de moins de 80 µm présentes dans l'échantillon.

Remarque : pour un échantillon ayant un pourcentage de fines élevé (i.e. fraction <80 µm), il est préférable d'utiliser des petites masses (entre 5 g et 15 g), afin de ne pas avoir à injecter une très grande quantité de solution de bleu de méthylène. Pour les autres types de matériaux, à mesure que le pourcentage des fines diminue, la masse de la prise d'essai augmente (entre 25 g et 200 g). Cette situation nous permet de réaliser le dosage au bleu de méthylène avec une précision de 0,25 ml.

2. La solution de bleu de méthylène a la même concentration :
 - peser 10 g de cristaux de bleu de méthylène, lesquels ont été séchés à 110°C pendant 24 heures et laisser refroidir pendant une heure ;
 - chauffer un litre d'eau déminéralisé pour la préparation de la solution à 40°C afin de faciliter la dissolution des cristaux de bleu de méthylène.

3. Introduire les cristaux de bleu de méthylène et brasser pendant 30 minutes avec l'agitateur à ailettes (en prenant soin d'obtenir une vitesse d'agitation d'au moins égale à 400 tours/minute), afin que les cristaux se dissolvent bien.

Remarque : la solution de bleu de méthylène doit être conservée dans un contenant étanche, afin d'éviter l'évaporation de l'eau. Elle peut être utilisée à plusieurs reprises, mais sur une période maximale d'un mois, après quoi la solution doit être changée.

Procédure :

- ajoutée La solution de bleu de méthylène dans le sol ;
- mélangée continuellement pendant 15 minutes avec un agitateur à ailettes à 400 tours/minute (prélever une goutte de cette suspension aux intervalles de temps de 5, 10 et 15 minutes et déposer sur le papier filtre, afin de comparer les taches ainsi formées) ;
- à la fin de l'agitation, laisser reposer la solution de 1 à 2 minutes ;
- prélève le liquide de la surface avec une pipette pour remplir des petits tubes insérés dans la centrifugeuse. On centrifuge pendant 5 minutes à haute vitesse (13g) ;
- prendre le liquide surnageant dans les tubes de centrifugeuse (qui conserve la concentration rémanente de bleu de méthylène) et on détermine son absorbance au spectrophotomètre pour une longueur d'onde de 664 nm ;
- répéter la même procédure pour les autres béchers.

Il faut signaler que pendant les 15 minutes d'agitation de l'ensemble de la prise d'essai et la solution de bleu de méthylène, on a prélevé une goutte de cette suspension aux intervalles de temps de 5, 10 et 15 minutes, ces gouttes ont été déposées sur le papier filtre, afin de comparer les taches ainsi formées, avec la procédure de la méthode conventionnelle.

Détermination de la courbe d'adsorption

La procédure de détermination de la courbe d'adsorption est divisée en deux étapes:

1. la détermination du point de saturation : c'est le point de référence. Pour avoir une première approximation de l'adsorption de l'échantillon, on s'est servi du papier filtre. On ajoute à la prise d'essai placée dans un premier bécher, du titrant jusqu'à l'obtention sur le papier filtre d'une auréole visible.

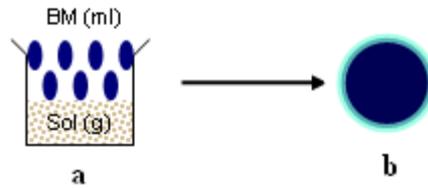


Figure a : Détermination du point de saturation (Konrad et Gabezas, 2008)

2. La deuxième étape porte sur les mesures au spectrophotomètre.

- place un deuxième bécher sur l'agitateur avec la quantité de titrant trouvée à la première étape.
- Après quelques minutes d'agitation, le titrage peut alors commencer comme il a été décrit précédemment.
- D'après des études préliminaires effectuées dans le laboratoire de géotechnique de l'Université Laval, l'absorbance obtenue doit être inférieure à 1,0 (figure b.a). Le cas échéant (absorbance >1), il est recommandé de répéter le procédé tout en diminuant la quantité de titrant dans le bécher.
- Dans un troisième bécher, on ajoute 0,5 à 1 ml de titrant et on détermine l'absorbance. Le point trouvé sera considéré comme étant un niveau de base (figure b.b).

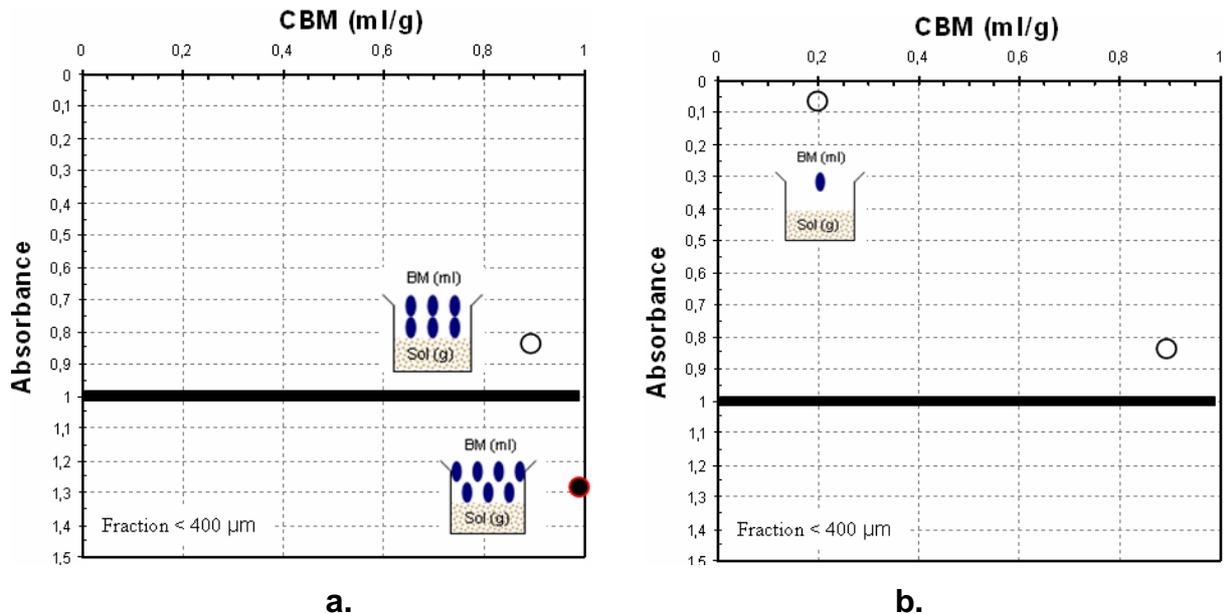


Figure b : Obtention de la courbe d'adsorption (Konrad et Gabezas, 2008)

À partir des deux points trouvés :

- diviser l'intervalle formé par ces deux points en quatre petits intervalles égaux.
- utiliser trois autres béchers dans lesquels les niveaux de titrant correspondent aux bornes des quatre intervalles trouvés (figure b.c).
- répète la même procédure pour ces trois béchers.

Remarque : pour mieux définir la courbe entre les deux points où se produit la cassure ou le changement de pente, on peut utiliser le septième bécher (figure b.d).

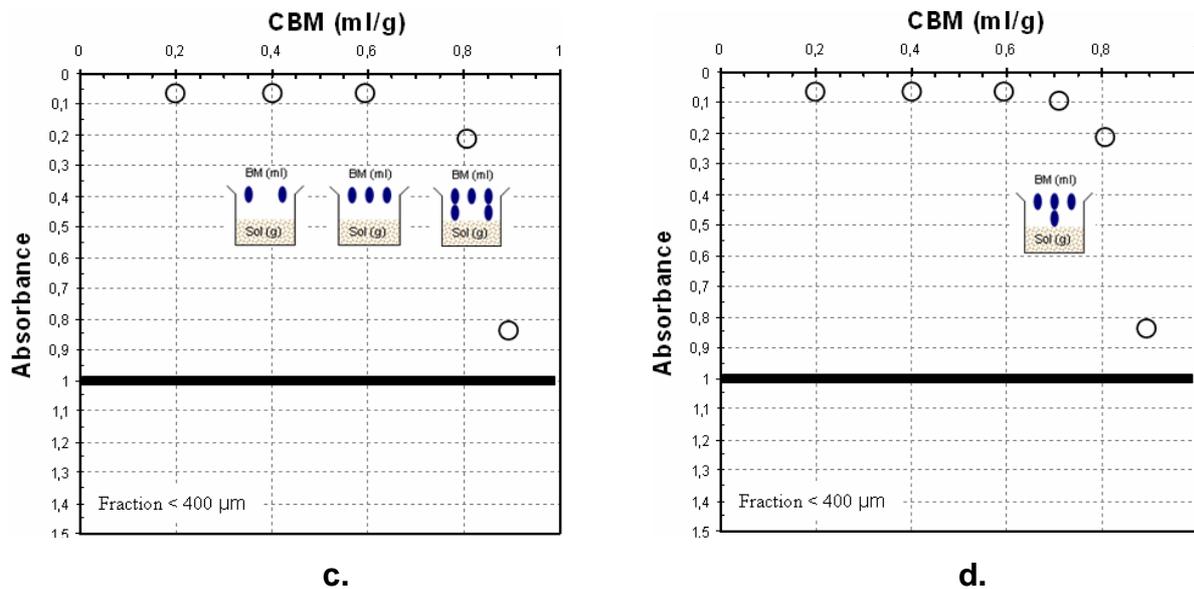


Figure b : Obtention de la courbe d'adsorption (Konrad et Gabezas, 2008)

Détermination de la valeur au bleu (VBS)

La valeur au bleu à l'aide du spectrophotomètre VBS, correspond à la concentration de bleu de méthylène (CBM) où se présente le premier changement de la pente dans la courbe de titration, tel que montré à la figure c. Cette CBM correspond au point où tout le sol a épuisé sa capacité d'adsorption du fait que le remplacement entre les cations d'argile facilement échangeables et les cations libérés par le bleu de méthylène pendant sa décomposition dans l'eau a été complété. De plus, ce point devrait correspondre à l'état final de l'essai du papier filtre (Hang et Brindley, 1995). Applied Clay Science February 1995, Pages 327-336 On a remarqué la présence d'un petit film bleu sur la surface de l'eau même après la centrifugation, pendant les nombreux essais effectués.

Remarque : Il faut faire bien attention de ne pas prélever ce film. Ce film influence les valeurs et la qualité des résultats.

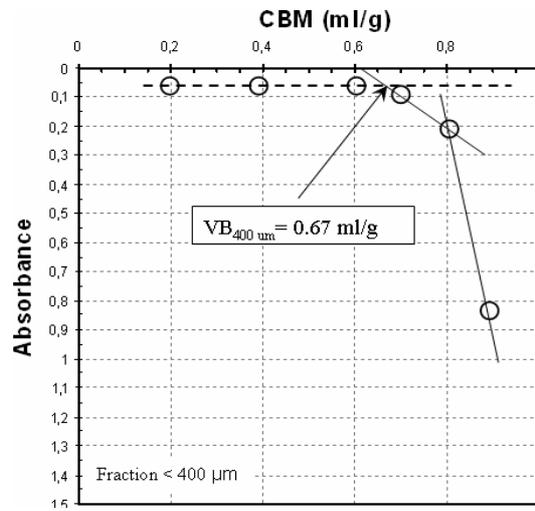


Figure c : Détermination de la valeur au bleu (Konrad et Gabezas, 2008)

ANNEXE 2. Rapport de la mission de terrain n°1.

La mission s'est déroulée du 21 Mars au 25 Mars 2011 dans la région de Toucy et ses environs.

Participants :

Olivier Fouché
Behzad Nasri
Anthonio Reboza
Fanny Drouet

Historique de la région :

La région est marquée au niveau géologique par différents types de sol : le sable, les argiles dans le Sud-est et à l'Est, du calcaire, du sous sol crayeux et du grès ferrugineux qui sont utilisés comme matériaux de construction des églises et châteaux.

Objectif :

La mission a pour principal objectif le prélèvement d'échantillon de sol près du massif filtrant d'un système d'assainissement non collectif.

On a visité 9 sites mais on n'a réussi à prélever que 6 échantillons car sur 3 sites, on s'est heurté sur des problèmes de forage, la première sur du remblai à environ 1.50m au dessus de système, le deuxième sur des plaquettes de calcaire qu'on a pu voir dans le sous-sol du propriétaire et pour la troisième c'est la présence de gros morceaux de calcaire qui nous a empêché à utiliser la tarière thermique.

Avant de faire notre prélèvement, on a effectué des logs qui ont été nommés comme suit :

Log 1-1 :



Le profil a été réalisé dans la région de Sementron à 3m du système ANC. C'est une ancienne carrière qui a été remblayée pour construire une maison.

Ce profil comporte deux horizons :

- Horizon A : de 0-40cm : sol végétal
- Horizon B : de 40 à 90cm : on voit un ensemble d'argile, des morceaux de calcaire et des morceaux de briques, on est sur un remblai.

On n'a pas mis sur le log la partie horizon A, donc ce log commence à partir de 40cm.

Log 2-1 :

Le log a été effectué dans la région de Coulangeron à l'aval du système. On a fait notre prélèvement sur un remblai de 200 ans (age de la maison) et on a observé deux horizons :



- Horizon A : 0-40cm, c'est de la terre végétale avec des morceaux de bois, on a constaté aussi la présence de vers de terre ;
- Horizon B : 40-90cm, c'est de l'argile avec des fragments de calcaire et la présence de brique.

La végétation repose directement sur le premier horizon A. On a un sol plus foncé en haut et plus on descend, on a du calcaire ; il faut noter la présence importante de vers de terre.

Dans cette partie, on a une probabilité de contamination du sol car on a senti une forte odeur lors du forage.

Log 3 :



Le profil a été fait toujours à Coulangeron. On a fait un log dans la limite du champ du massif filtrant et on est tombé sur un remblai de sol de marne ; ensuite, on a effectué un autre log et on est arrivé sur du calcaire avec un mélange d'ancien remblai alors on a effectué un 3^{ème} log plus près du massif filtrant sur l'axe de la pente, on a prélevé un mélange de calcaire très dur avec un remblai contenant des briques, des charbons,....

Ce log contient deux horizons :

- Horizon A : de 0 à 30cm on a le sol végétal ;
- Horizon B : de 30 – 50cm on a un mélange de calcaire, d'argile et de remblai.

Log 4-1 :



Le log a été fait à Merry Sec. Le sol comporte deux horizons dont :

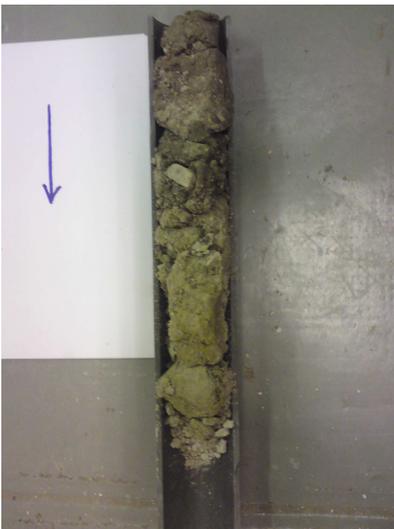
- Horizon A : de 0-30cm, sol végétal
- Horizon B : de 30-50cm, on a du sol calcaire avec la présence de graves.

Log 8-1 :



Le log a été effectué à Chassy, on est en présence de craie et de l'argile. Il y a une altération de la craie qui produit le mélange d'argile plus près de la surface. On voit très bien le gradient de l'altération qui se différencie par la couleur. Le log s'est fait entre 40-110cm.

Log 8-2 :



On est au même endroit que celui du log 8-1, mais pour vérifier on a effectué un autre log mais directement à une profondeur de 100-110cm et on a observé les mêmes caractéristiques de sol.

Log 9-1 :



Le log a été fait à Eglény. On est en présence d'un sol sableux avec une variation de couleur de la surface à la profondeur (de sombre à claire). Ce changement de couleur est peut-être dû à la teneur en eau. Le log a été pris à partir de 60cm.

ANNEXE 3. Résultats de l'essai d'infiltration par la méthode Guelph sur le site 3

Résultats du Guelph sur le site 3

5 cm				10 cm			
Temps (min)	H (cm)	R (cm/sec)	deltaR (-)	Temps (min)	H (cm)	R (cm/sec)	deltaR (-)
0	4			0	9		
5	8,2	0,014		3	10,8	0,010	
11,5	11	0,007	0,487	6	11,2	0,002	0,778
15	12,2	0,006	0,204	9	11,2	0,000	1,000
20	13,7	0,005	0,125	12	15	0,021	
25	15,3	0,005	0,067	15	16,8	0,010	0,526
30	17	0,006	0,062	18	18,1	0,007	0,278
35	18,5	0,005	0,118	21	19,5	0,008	0,077
40	19,9	0,005	0,067	24	21	0,008	0,071
45	21,4	0,005	0,071	27	22,3	0,007	0,133
50	22,8	0,005	0,067	30	23,7	0,008	0,077
55	24,3	0,005	0,071	33	25	0,007	0,071
60	25,8	0,005	0,000	36	26,5	0,008	0,154

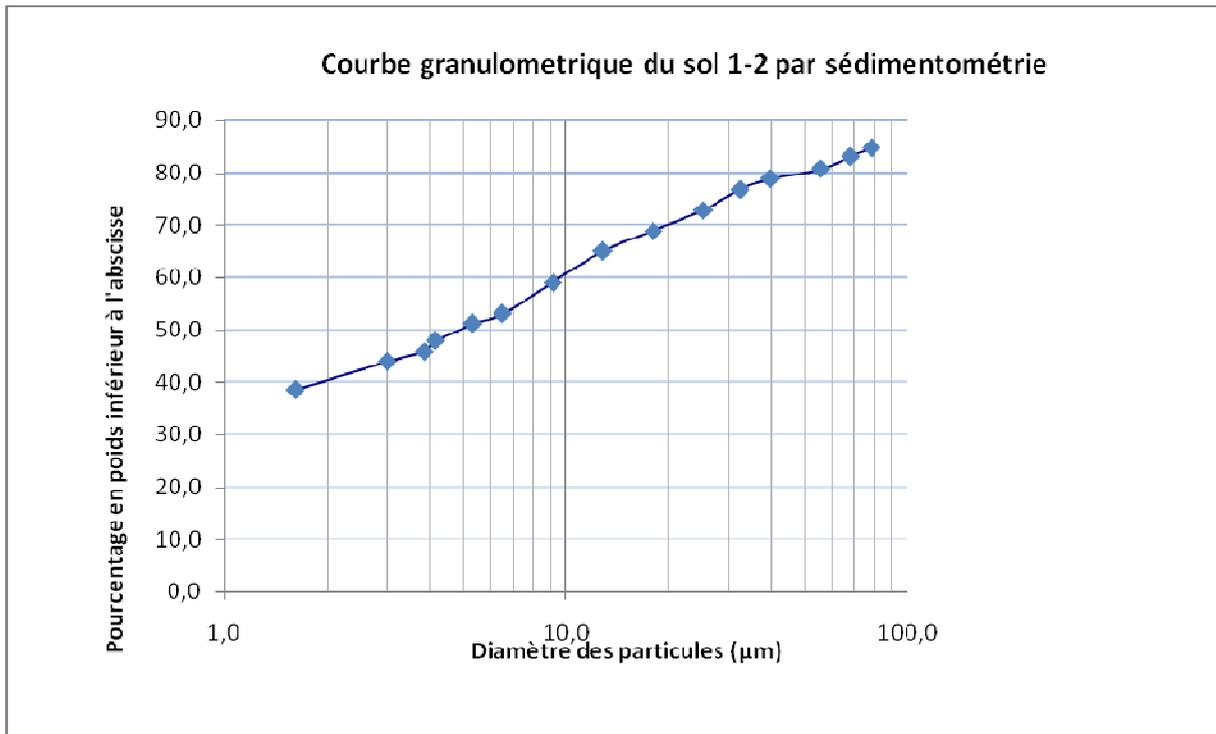
Réservoir	1
R1	0,005
R2	0,008
K _{fs}	0,000011856 cm/s
Φ _m	0,000205872 cm ² /s

5 cm				10 cm			
Temps (min)	H (cm)	R (cm/sec)	deltaR (-)	Temps (min)	H (cm)	R (cm/sec)	deltaR (-)
0	13			0	18,7		
3	14,2	0,007		3	26,3	0,042	
6	16,4	0,012	0,833	6	32,2	0,031	0,268
9	18,2	0,010	0,182	9	36,5	0,025	0,176
12	20	0,010	0,000	12	41,5	0,028	0,092
15	22,2	0,012	0,222	15	46,8	0,029	0,060
18	25,2	0,017	0,364	18	51	0,023	0,208
21	28,8	0,020	0,200	21	56,8	0,032	0,381
24	32,2	0,019	0,056	24	61,8	0,028	0,138
27	35,2	0,017	0,118	27	66,6	0,027	0,040
30	38,8	0,020	0,200	30	71,4	0,027	0,000
33	42,1	0,018	0,083	33	76	0,026	0,042
36	45,4	0,018	0,000				

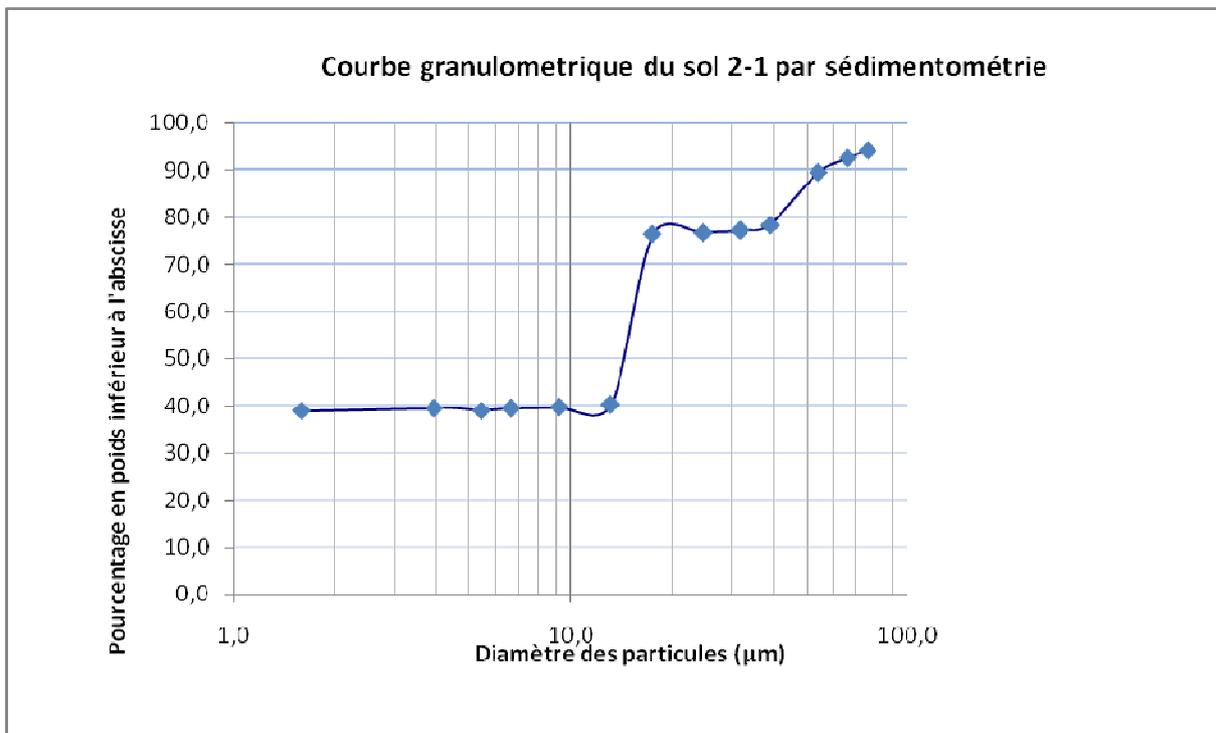
Réservoir	1
R1	0,019 X
R2	0,026 Y
K _{fs}	1,256E-05 cm/s
Φ _m	0,0009876 cm ² /s

ANNEXE 4. Courbes granulométriques

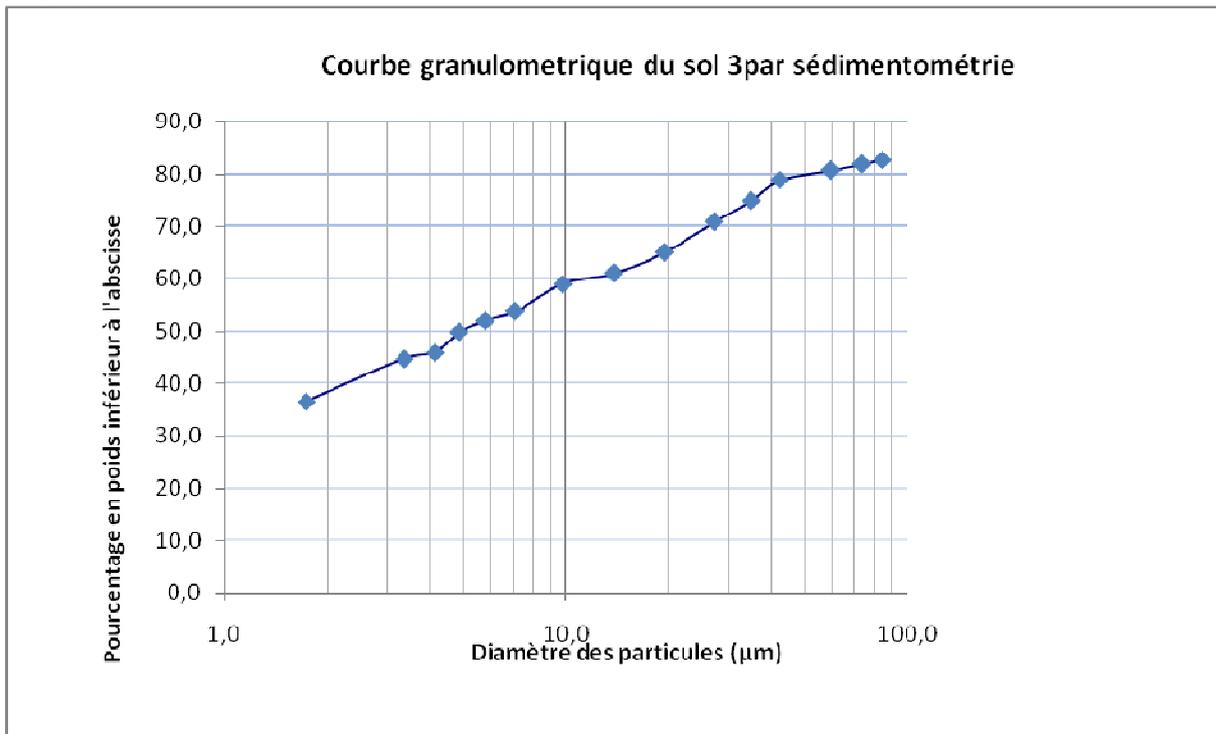
Sol 1-2 :



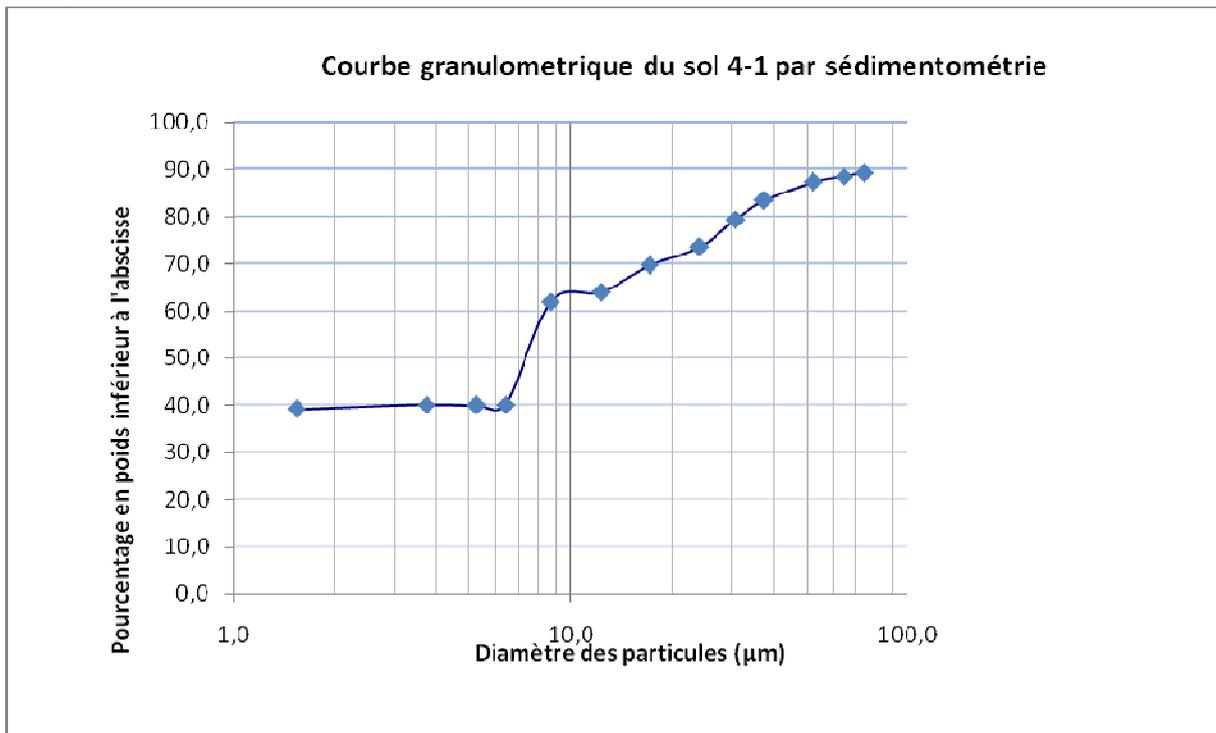
Sol 2-1 :



Sol 3 :



Sol 4-1 :



Sol 8-1 :

