



Amélioration des Sols par Inclusions Rigides

Opération du Réseau Génie Civil et Urbain

OPERATION DU RESEAU GENIE CIVIL & URBAIN

**A.S.I.R.I.–TRANCHE4–THEME2
INSTRUMENTATION D’UN RESERVOIR
RENFORCE PAR INCLUSIONS RIGIDES**

L. BRIANÇON – MCF (CNAM)

le cnam



A.S.I.R.I / FICHE SIGNALÉTIQUE

TITRE : A.S.I.R.I. – TRANCHE 4 – THEME 2 – INSTRUMENTATION D’UN RESERVOIR RENFORCE PAR INCLUSIONS RIGIDES
RAPPORT N° : 4-11-2- 1
DATE D’ETABLISSEMENT : JUILLET 2010
AUTEURS : BRIANÇON
ORGANISMES CHARGES DE L’ ACTION : CNAM
THEME DE RATTACHEMENT : 2
LETTRE DE COMMANDE : LC/10/ASI/112

1. Introduction

Dans le cadre de la réalisation d'une station d'épuration dans la commune de Pont Audemer (27), la solution d'un traitement de sol par inclusions rigides a été retenue. Une instrumentation a été mise en œuvre consistant à mesurer le transfert de charge, le tassement différentiel au niveau des têtes d'inclusions sous le bassin tampon.

L'entreprise Pinto a mis en œuvre le renforcement par inclusions rigides et réalisera les bassins. L'instrumentation a été mise en place par le Cnam les 26 et 27 juillet 2010.

2. Données géotechniques

2.1. Essais antérieurs

A proximité du bassin tampon, on dispose d'un essai pressiométrique SP1 et d'un sondage à la pelle PM1 (annexe 1). La coupe lithologique déduite des ces deux sondages est la suivante :

- terre végétale
- remblais, composés d'un mélange de limon, de sable et d'argiles noires comprenant des graves et de nombreux déchets de démolition (béton, brique, ferraille),
- limons,
- argiles gris-bleu, cette argile est parfois graveleuse,
- argile tourbeuse,
- graves alluvionnaires.

La nappe se situe à une profondeur de 2 m. Le terrain présente une couche compressible de 5m d'épaisseur.

2.2. Nouveaux essais

Un essai carotté et un essai pressiométrique (Annexe 2) ont été réalisés à proximité de l'ouvrage instrumenté. La caractérisation des carottes en laboratoire (Annexe 3) a permis de caractériser les différentes couches de sol.

3. L'ouvrage renforcé

3.1. Le réservoir

Le diamètre extérieur de ce bassin est égal à 26,2 m et la surcharge d'exploitation est estimée à 56 kPa. Le fond du réservoir est incliné de telle sorte que le puisard se situe 60 cm sous le niveau de la base des parois du réservoir (Figure 1).

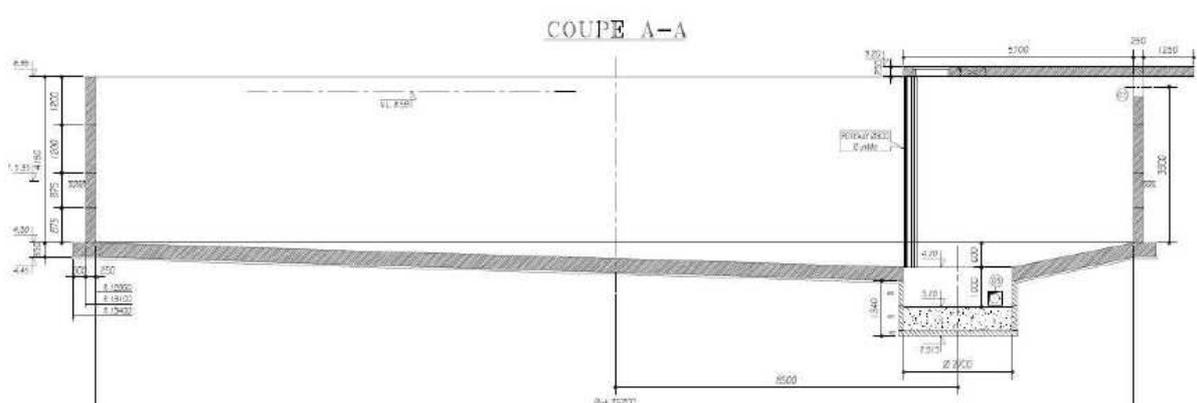


Figure 1. Schéma du bassin tampon

3.2. La solution de renforcement adoptée

La solution de renforcement proposée est une combinaison (Figure 2) :

- d'inclusions rigides en béton de 273mm de diamètre et descendues sur les argiles sableuses à une profondeur de 7m m par rapport au terrain naturel, ces inclusions sont inscrites dans un maillage carré de 3 m x 3 m.
- une plate-forme de transfert de charge constituée de 40 cm de plate-forme de trafic en grave concassée 40/70 (annexe 4) complétée après réalisation des inclusions par 20 cm de grave concassée 0/31,5 donc la courbe granulométrique est donnée en annexe 4.

Les inclusions ont été recépées à la base de la plate-forme de trafic.

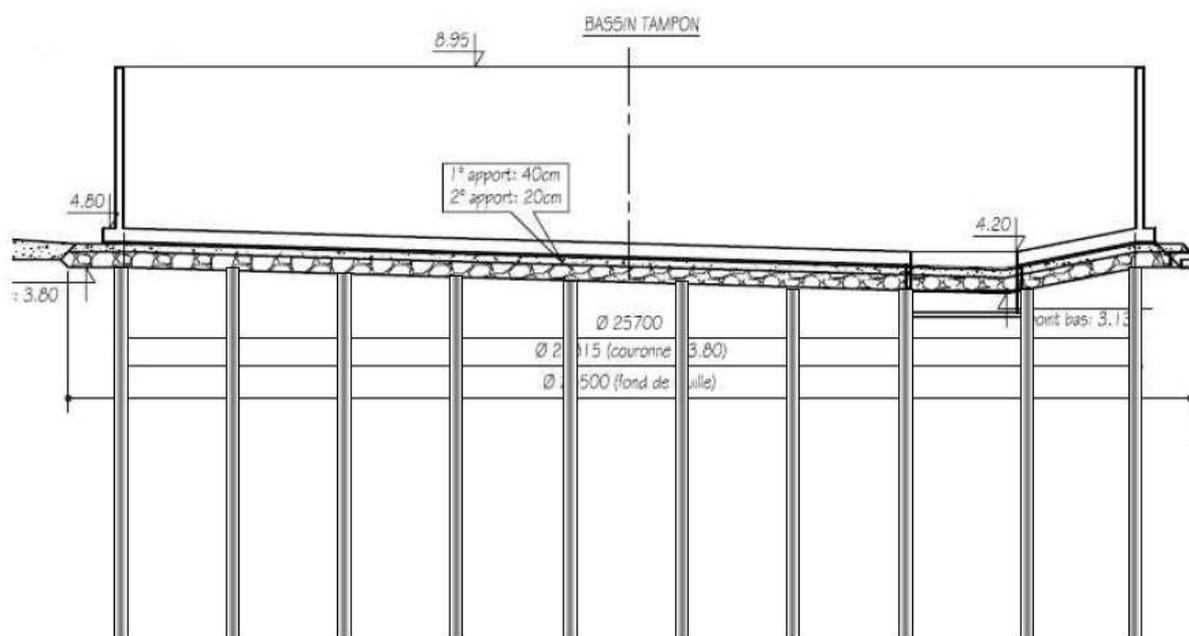


Figure 2. Renforcement du bassin tampon

4. Instrumentation

4.1. Mailles instrumentées

Deux zones ont été instrumentées pour mesurer le report de charge vers les inclusions rigides et le tassement au niveau des têtes des inclusions rigides :

- une sous la périphérie du réservoir,
- une sous la zone centrale du réservoir. (Annexe 5)

4.2. Mesure du tassement

Le tassement du sol et des têtes d'inclusions sont mesurés par l'intermédiaire de transmetteurs de pression pour mesure de niveau (4-20 mA) appelés transmetteurs dans la suite de ce document et notés T (Figure 3). Les transmetteurs sont connectés en série par une ligne hydraulique à un réservoir rempli d'anti-gel fixé sur un support disposé en dehors de l'emprise de l'ouvrage d'une part et par une ligne électrique à la centrale d'acquisition d'autre part. Le réservoir maintient le système toujours saturé et à charge constante. Le transmetteur mesure la variation de pression entre sa position et le niveau du réservoir. Un transmetteur de référence est fixé sous le réservoir et permet de calculer le tassement des autres transmetteurs positionnés sous l'ouvrage. Chaque transmetteur est compensé en pression atmosphérique par un capillaire couplé au câble électrique.

La figure 4 présente l'implantation et la notation des capteurs de tassement. Les capteurs ont été disposés dans des tranchées sablées préalablement réalisées dans la plateforme de trafic (Figure 3).



Figure 3. Capteur de tassement

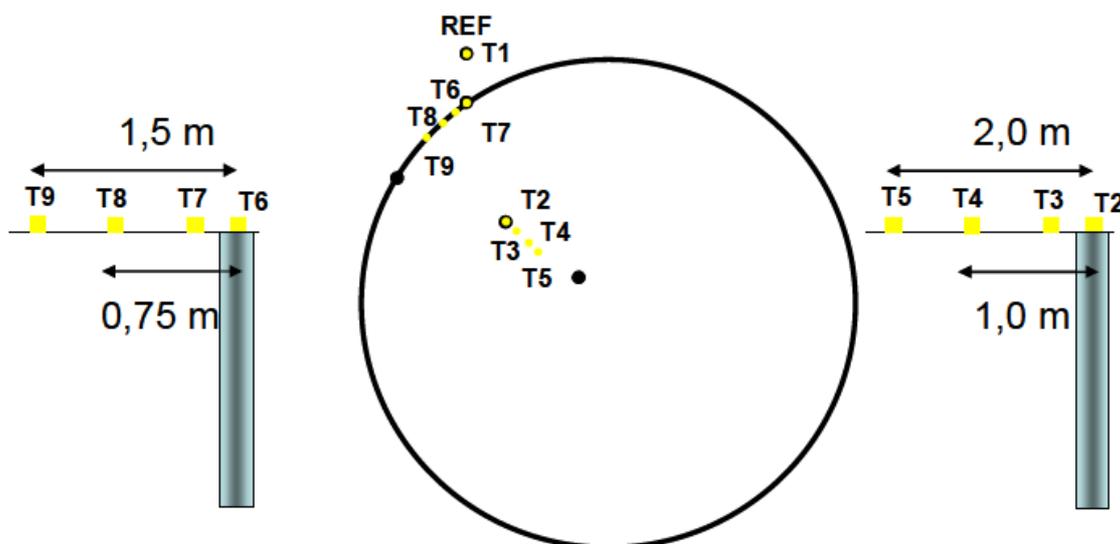


Figure 4. Implantation des capteurs de tassement

4.3. Mesure du transfert de charge

Deux capteurs de pression totale ont été disposés dans chaque zone instrumentée pour mesurer le transfert de charge (Figure 5) :

- un capteur sur une tête d'inclusion,
- un capteur sur le sol.

La figure 6 présente l'implantation et la notation des capteurs de pression totale. Les capteurs ont été disposés dans des tranchées sablées préalablement réalisées dans la plateforme de trafic (Figure 5).



Figure 5. Capteur de pression totale

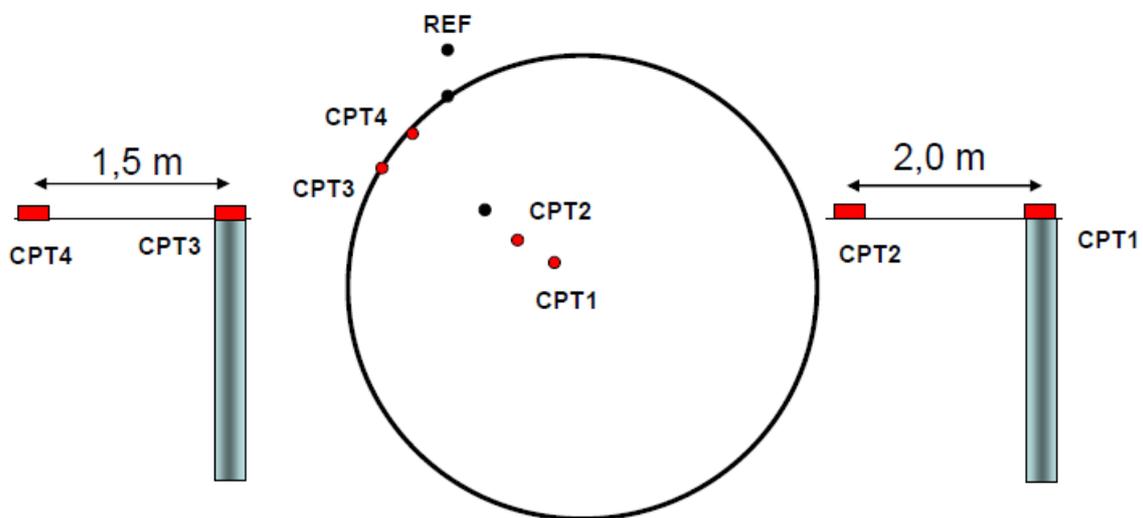


Figure 6. Implantation des capteurs de pression totale

4.4. Centrale d'acquisition

Les câbles électriques des capteurs de tassement et des CPT ont été connectés à une centrale d'acquisition (Campbell scientifique CR800) disposée dans un boîtier fixé à un tube sur une inclusion rigide en dehors de l'emprise de l'ouvrage (Figure 7).



Figure 7. Plot de référence et centrale d'acquisition

Le réservoir des capteurs de tassement et le T de référence sont fixés à l'intérieur du tube. Les mesures des capteurs seront effectuées par la centrale pendant la construction de l'ouvrage avec un pas d'acquisition de 4h.

5. Mesures

Les contraintes ont été mesurées depuis la construction du réservoir et pendant un an suivant cette construction (Figure 8). Au cours de cette période, trois phases de remplissage-vidanges ont été appliquées. On observe un fort transfert de charge vers les inclusions rigides, report de charge plus important sous les inclusions rigides centrales lors des essais de remplissage du réservoir. On note qu'après une vidange, le niveau de contrainte revient à son niveau initial mesuré avant le remplissage.

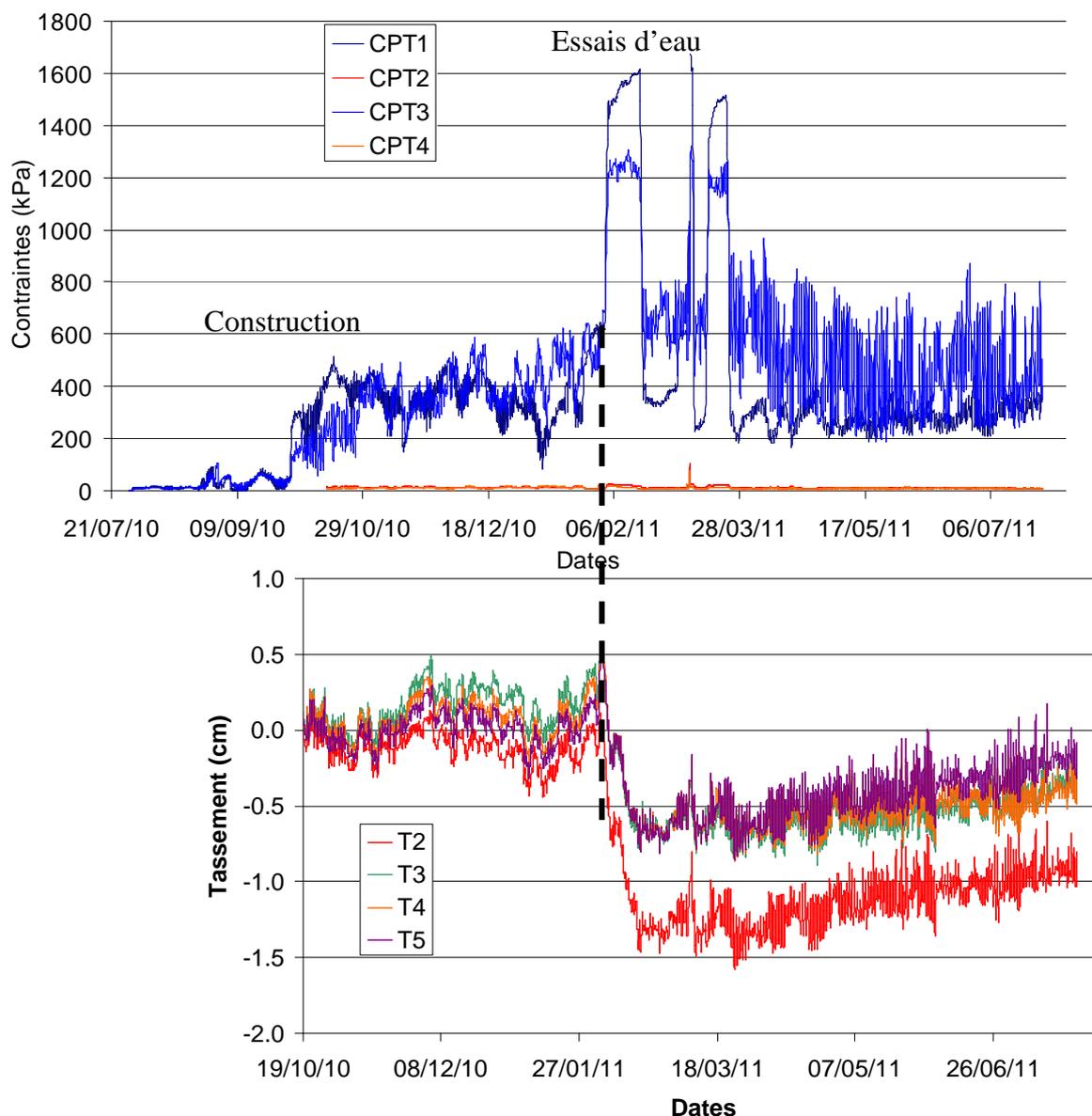


Figure 8. Evolution de la contrainte et du tassement

Les mesures du tassement sont initialisées après la construction du réservoir pour éviter les erreurs de mesures due à l'enfoncement possible de chaque capteur de tassement dans le lit de

sable sur lequel il repose. La figure 8 présente uniquement le tassement sous le centre du réservoir. On observe un tassement de l'inclusion et du sol lors du premier remplissage du réservoir ; le tassement de l'inclusion étant supérieur au tassement mesuré sur le sol. Ensuite, lors des deux autres phases de remplissage-vidange, le tassement est stabilisé. Le profil de tassement horizontal sur le sol est plat.

La figure 9 présente l'évolution des tassements sous le centre et sous la périphérie du réservoir. Le capteur T₆ positionné sur l'inclusion périphérique a été endommagé à la mise en œuvre et ne fonctionne pas. En comparant le tassement du sol sous le centre et sous la périphérie, on observe un léger gonflement du sol sous la périphérie.

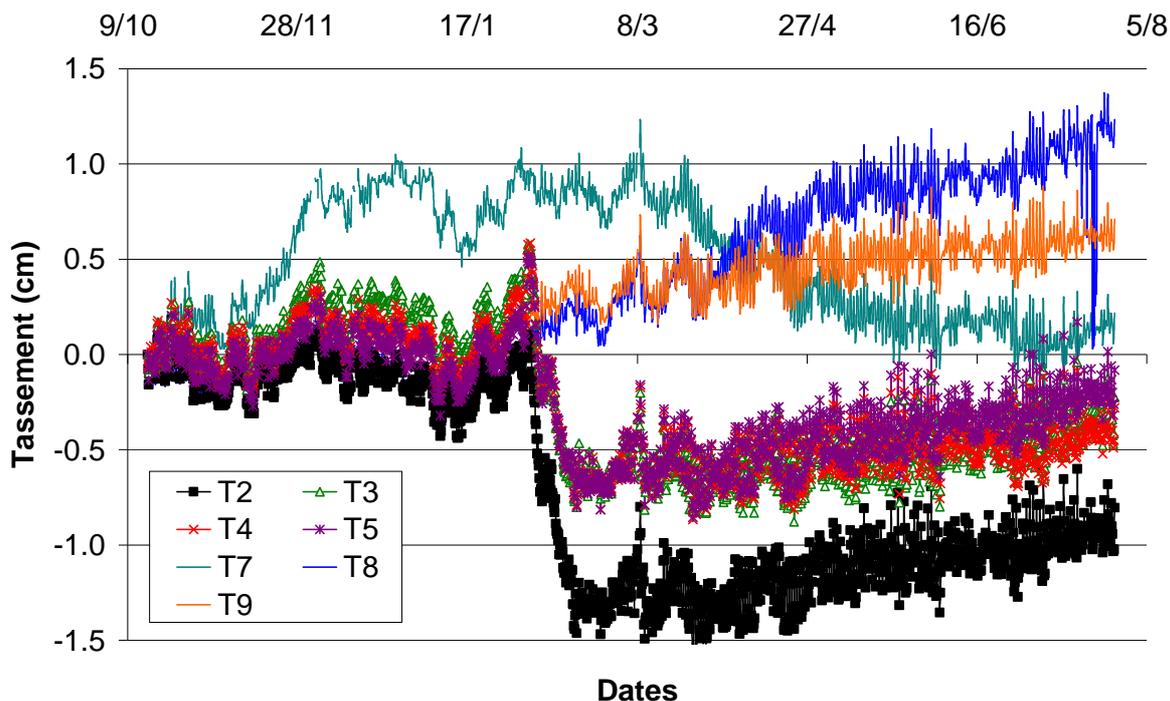
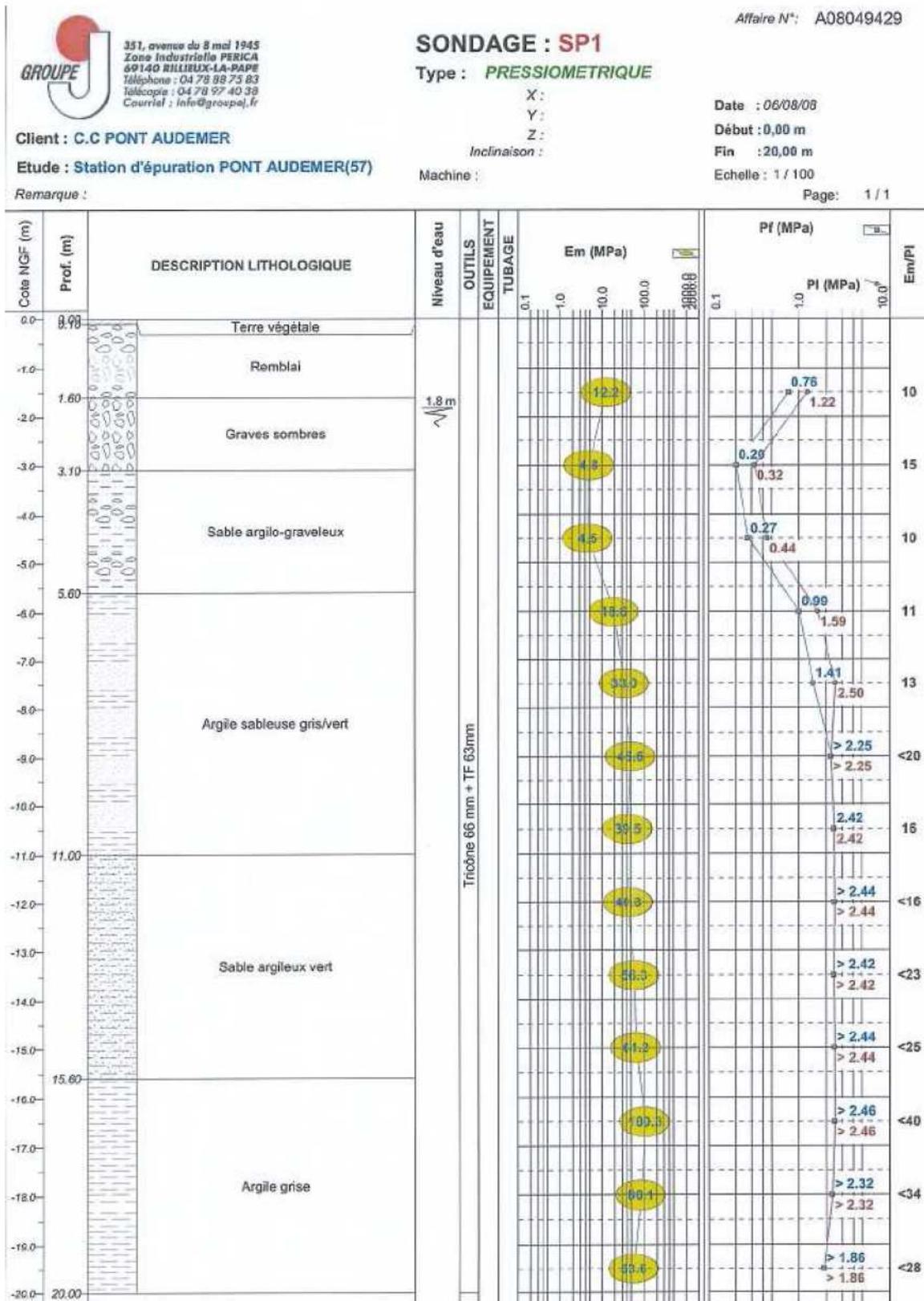


Figure 9. Evolution des tassements

Annexe 1- Essais antérieurs







351, avenue du 8 mai 1945
 Zone Industrielle PERICA
 60140 RILLIEX-LA-PAPE
 Téléphone : 04 78 88 75 83
 Télécopie : 04 78 97 40 38
 Courriel : info@groupej.fr

SONDAGE : PM 1
 Type : *Pelle Mécanique*

Affaire N°: A08049429

Client : **C.C PONT AUDEMER**

Etude : **Station d'épuration PONT AUDEMER(57)**

X :
 Y :
 Z :
 Inclinaison :

Date : 08/08/08

Début : 0,00 m

Fin : 2,50 m

Echelle : 1 / 25

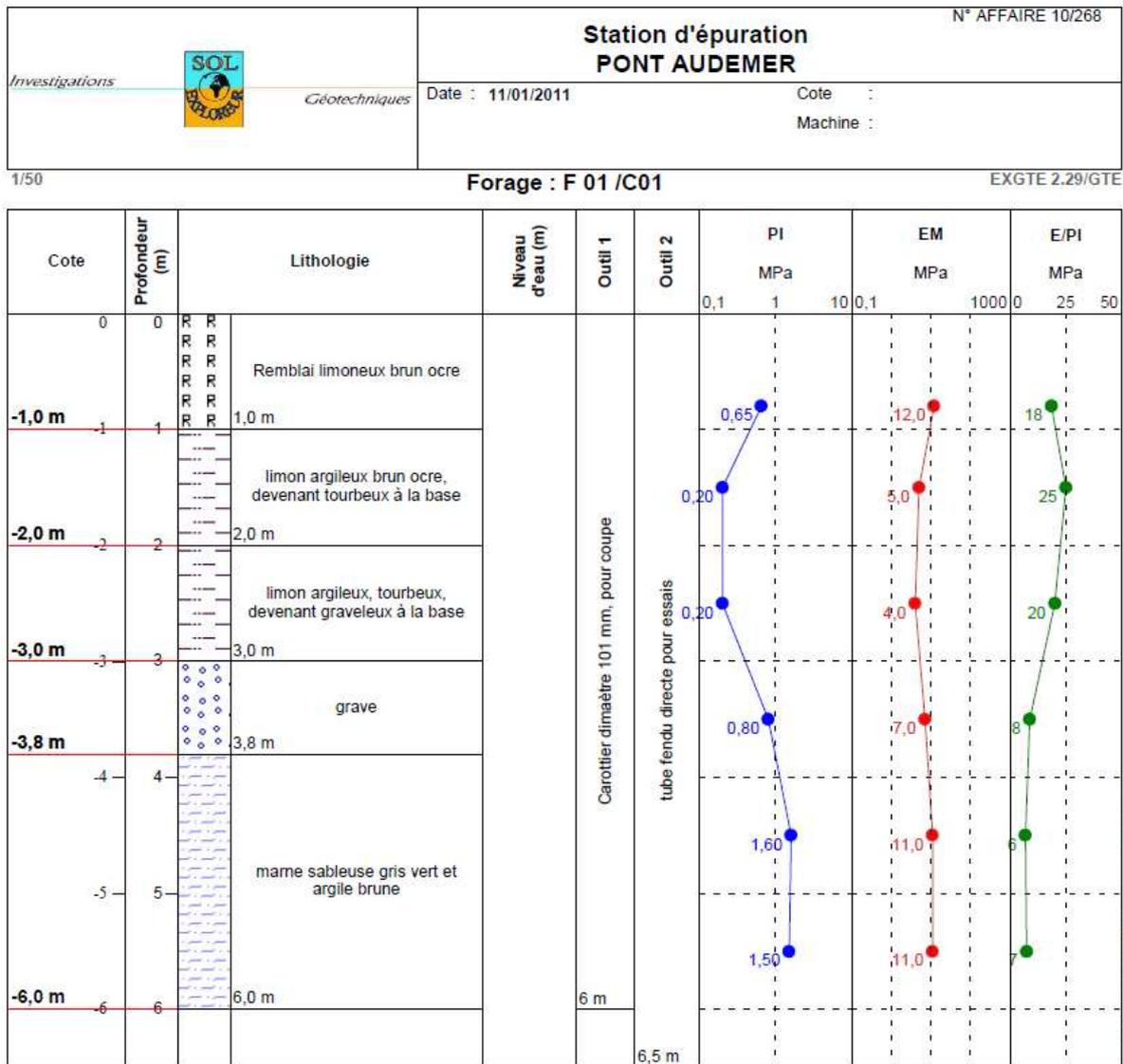
Machine :

Remarque :

Page: 1 / 1

Cote NGF (m)	Profondeur (m)	DESCRIPTION LITHOLOGIQUE	Niveau d'eau	Tenue des parois	Ech. Labo.	W (%)	0,08 mm (%)	passant 2 mm (%)	D max	VBS	Ip	densité P (kN/m ³)	W _{opt}	IP	Densité IP	Classe GTR	Remarque labo	
0	0.00	Végétal																
	0.10	Limon argilo-sableux noir + grave + déchets démolition (béton, brique...)																
	1.00	Argile tourbeuse noir		Mauvaise														
	1.90	Grave	2.30 m															
	2.50																	
	3																	
	4																	
	5																	

Annexe 2 – Essai pressiométrique



Annexe 3 – Essais de caractérisation en laboratoire (Stage Licence Paris 6)

Description des carottes de sol



Sur cette photo, on peut observer que toutes les carottes ne sont pas pleines. Le sol n'est plus parfaitement en place, lors du prélèvement il s'est déformé car certaines couches de sol sont trop meubles. Les carottes font 1m chacune. On peut d'abord regarder l'évolution générale des couleurs des carottes : en surface, le sol est plus clair qu'en profondeur.

Photo 1 : Carottes de sol provenant de Pont Audemer

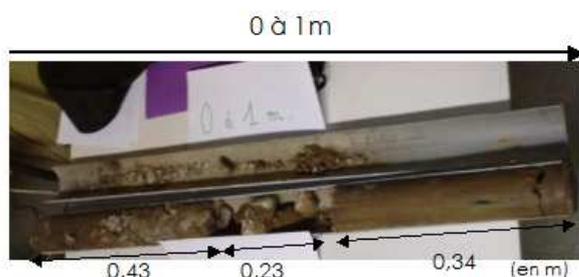


Photo 2 : Carotte de sol de 0 à 1 m de profondeur

0-19cm : Grains dont les particules sont inférieures à 1cm. La couleur dominante est marron mais il y a des zones noirâtres et rouges.

19-43cm : Sol grenu, présence de cailloux mesurant environ 3cm. La couleur du sol est noisette.

43-65cm : Vide avec gros cailloux gris clairs mesurant plus de 5cm.

65-1m : Sol couleur noisette composé de particules fines. Le sol paraît homogène. Des traces rouges sont observables vers le haut et des traces noires vers le bas.



Photo 3 : Carotte de sol de 1 à 2 m de profondeur

1-1,05m : Sol couleur noisette identique à celui du dessus.

1,05-1,63m : Vide avec quelques cailloux de l'ordre du centimètre.

1,63-2m : Sol fin avec quelques petits grains. Il est de couleur brun moka et lorsqu'on le gratte il est légèrement plus foncé. La surface est effritée. Sur les derniers

centimètres, le sol est vraiment noir, fin, et ressemble à de la tourbe. A l'intérieur on observe des traces d'oxydation ayant la couleur et l'odeur de la rouille.

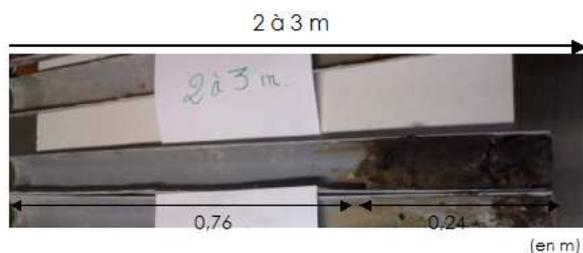


Photo 4 : Carotte de sol de 2 à 3 m de profondeur

2-2,76m : Vide total.

2,76-3m : Sol fin couleur ébène avec quelques grains. Vers le haut, on retrouve une zone de couleur brune. En descendant, il y a de plus en plus de grains.

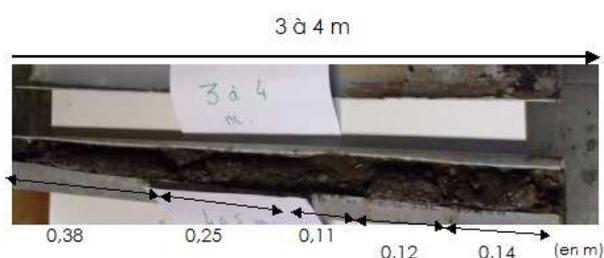


Photo 5 : Carotte de sol de 3 à 4 m de profondeur

3-3,38m : Sol gris/vert composé de grains de tailles très différentes (cailloux de 3-4cm et grains de taille inférieure). Les cailloux maintiennent l'ensemble.

3,38-3,63 : Sol gris avec des grains plus fins que la partie supérieure. Le sol se maintient moins bien, certainement dû à une présence d'eau.

3,63-3,74 : Sol gris et fin, sans maintien. Présence d'eau. Il n'y a pas de gros grains. Cette couche ressemble à de la boue.

3,74-3,86m : Sol gris/brun avec des cailloux de l'ordre du centimètre. Cette couche présente un meilleur maintien malgré la présence d'eau.

3,86-4m : Sol marron/vert avec de gros grains (environ 4cm) dans une sorte de 'boue liante'.

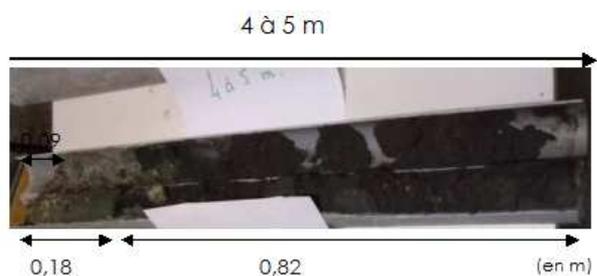


Photo 6 : Carotte de sol de 4 à 5 m de profondeur

4-4,09m : Vide avec granulométrie étalée. Majorité de grains avec peu de matrice.

4,09-4,18m : Sol couleur vert d'eau comprenant des cailloux de 4-5cm et

des cailloux plus petits. Les cailloux ne sont pas triés.

4,18-5m : On observe une évolution de la couleur, on passe de vert d'eau à ébène en passant par vert bouteille. Le sol est fin et dur avec des grains de plus en plus fins. On observe sur toute la section des grains sphériques faisant environ 1cm qui sont de moins en moins présents.

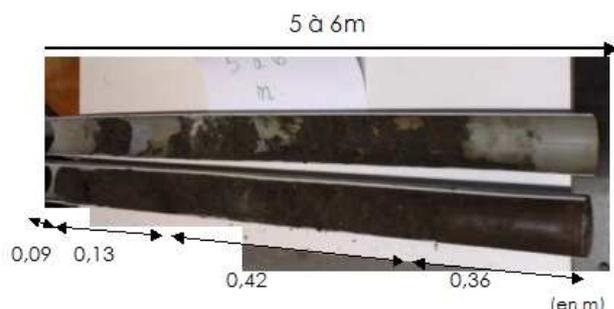


Photo 7 : Carotte de sol de 5 à 6 m de profondeur

5-5,09m : Vide complet.

5,09-5,15m : Sol très dur de couleur vert/noir composé de particules fines.

5,15-5,22m : Sol semblant être composé de la même matrice que la couche du dessus mais c'est beaucoup plus mou. Les grains sont fins.

5,22-5,64m : Sol vert/noir, assez dur comprenant des grains de l'ordre du centimètre de plus en plus présents vers le bas de la couche.

5,64-6m : On observe un changement de couleur : le sol est de couleur brun expresso. Le sol est dur et il semble y avoir plein de petits grains vers le haut.

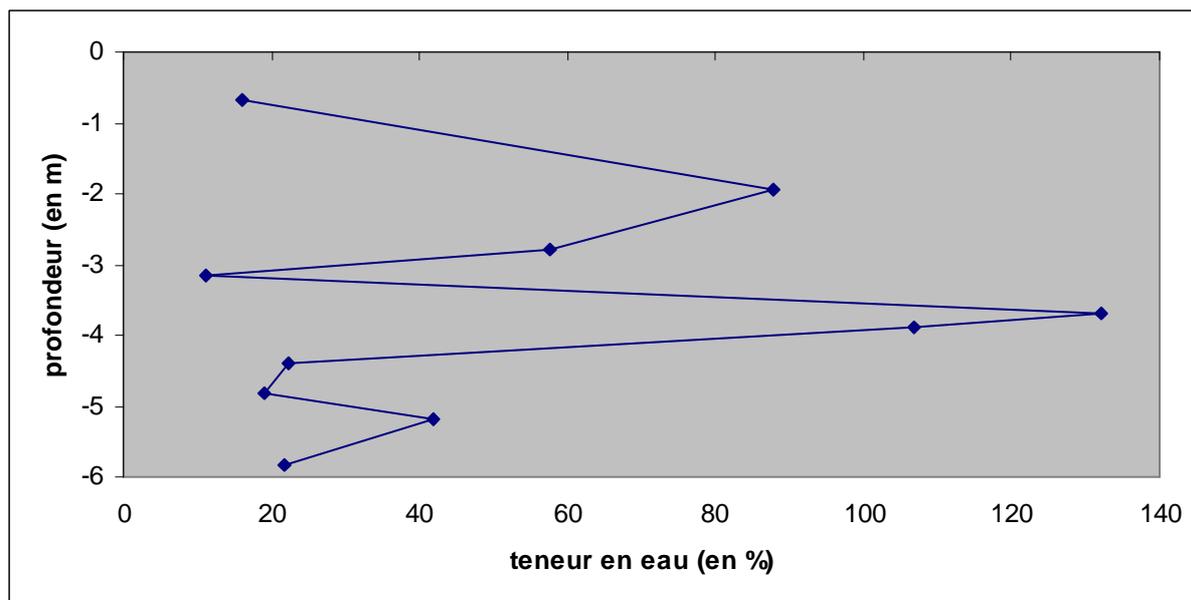
Détermination de la teneur en eau :

Des échantillons d'une dizaine de grammes ont été prélevés sur les carottes de sol tout en mesurant la profondeur à laquelle ils sont. La teneur en eau d'un échantillon va être déterminée grâce au passage dans une étuve à une température de 105°C pendant 24 heures. Dans un premier temps, il va falloir peser la coupelle puis les échantillons dans celle-ci. Lors du passage des échantillons dans l'étuve, l'eau va s'évaporer. Les échantillons vont être pesés à leur sortie. La teneur en eau correspond au rapport de la masse d'eau évaporée sur la masse des grains solides.

Echantillon	Profondeur	P _{THumide}	P _{TSec}	Tare	Teneur en eau
1	0,67	32,54	31,53	25,22	16,0
16	1,93	26,98	25,98	24,84	87,7
24	2,8	24,89	23,55	21,22	57,5
25	3,15	31,95	31,04	22,92	11,2
31	3,7	33,7	30,54	28,15	132,2
40	3,89	35,76	32,59	29,62	106,7
48	4,4	36,73	35,44	29,66	22,3
50	4,83	32,06	31,36	27,66	18,9
60	5,18	33,28	30,33	23,28	41,8
78	5,82	27,09	26,36	22,99	21,6

$$\text{Teneur en eau} = \frac{P_{THumide} - P_{TSec}}{P_{TSec} - \text{Tare}}$$

Ainsi un graphique de la teneur en eau en fonction de la profondeur peut être tracé.



La teneur en eau n'est pas constante. Celle-ci dépend de la porosité et de la perméabilité du sol qui ne sont pas les mêmes dans les différentes couches de sol. A 3,70 et 3,89 mètres de profondeur, la teneur en eau est supérieure à 100%. Cela signifie que la masse de l'eau est supérieure à la masse des particules solides.

Prélèvement d'échantillons :

Après avoir regardé mon rendu des différentes couches, nous avons jugé intéressant de prélever des échantillons d'environ 1kg à ces profondeurs :

- Entre 65cm et 1m ; entre 1,63m et 2m ; à 4,6m : déterminer les limites d'Atterberg et la masse volumique des particules solides
- Entre 3m et 3,38m : effectuer une analyse granulométrique humide.
- A 5,2m : déterminer la masse volumique des particules solides.

Les échantillons sont ensuite placés à l'étuve à 105°C pendant au moins 24h.

Détermination de la masse volumique des particules solides :

Dans un premier temps, il faut broyer l'échantillon de sol (ayant une profondeur de 5,2m) dans un mortier à l'aide d'un pilon et récupérer tout ce qui passe à travers un tamis de 2 mm. On prélève 20g de sol que l'on met dans un pycnomètre (on en utilisera 4 pour préciser au mieux les résultats) que l'on complète avec de l'eau déminéralisée (à 2-3mm au dessus du sol). On dispose ensuite les pycnomètres dans la cloche à vide et on applique le vide (cf. photo 8). Lorsque le vide se fait, on peut observer des bulles d'air sortant des échantillons de sol. A leur sortie, les pycnomètres sont complétés d'eau déminéralisée jusqu'au repère du bouchon. A l'aide de différentes pesées effectuées tout au long de l'expérience, on peut déterminer, grâce à des calculs, la masse volumique des particules solides.



Photo 8 : Cloche à vide contenant des pycnomètres.

profondeur		5,2m echA	5,2m echB	5,2m echC	5,2m echD
masse volumique de l'eau	ρ_{eau}	0,9984347	0,9984347	0,9984347	0,9984347
masse pycnomètre vide	m1	74,81	47,14	58,43	58,97
masse pycnomètre + prise d'essai	m2	94,86	67,24	78,44	78,98
masse pycnomètre + prise d'essai + eau	m3	202,93	160,08	170,99	185,21
masse pycnomètre plein d'eau	m4	190,17	147,81	158,33	172,53
masse du sol	m2-m1	20,05	20,10	20,01	20,01
volume du pycnomètre	V1	115,54	100,83	100,06	113,74
volume d'eau	V2	108,24	92,99	92,70	106,40
volume des solides	V1-V2	7,30	7,84	7,36	7,34
masse volumique des solides	ρ_S	2,75	2,56	2,72	2,73
masse volumique moyenne des solides	$\rho_S \text{ moy}$	2,73			

On peut voir que la masse volumique des solides de l'échantillon B est assez différente des autres valeurs. L'erreur provient certainement de la masse du pycnomètre plein d'eau. Pour le calcul de la masse volumique moyenne des particules solides on n'utilisera pas la valeur de l'échantillon B.

On obtient donc une masse volumique des particules solides égales à 2,73. Cela correspond aux masses volumiques des argiles (entre 2,72 et 2,75).

Analyse granulométrique par tamisage

Cet essai est effectué sur l'échantillon ayant une profondeur comprise entre 3m et 3,38m. L'analyse granulométrique permet de déterminer et classer les différentes tailles de grains présents dans le sol. Il faut tout d'abord placer l'échantillon à l'étuve pour enlever l'eau présente puis peser la masse totale de sol.

Nous allons effectuer une granulométrie humide. Pour cela, nous disposons d'une colonne avec des tamis ayant des tailles de mailles différentes. Cet essai consiste à faire passer le sol à travers les différents tamis grâce à un apport en eau. Les refus des tamis sont mis à l'étuve pour sécher les échantillons.



A la sortie de l'étuve, la colonne de tamis contenant le sol est placée sur la tamiseuse électrique pendant 20 min. Les refus des tamis sont ensuite pesés.

Il s'agit d'un sol grenu car 50% en poids des éléments est supérieur à 80 μm .

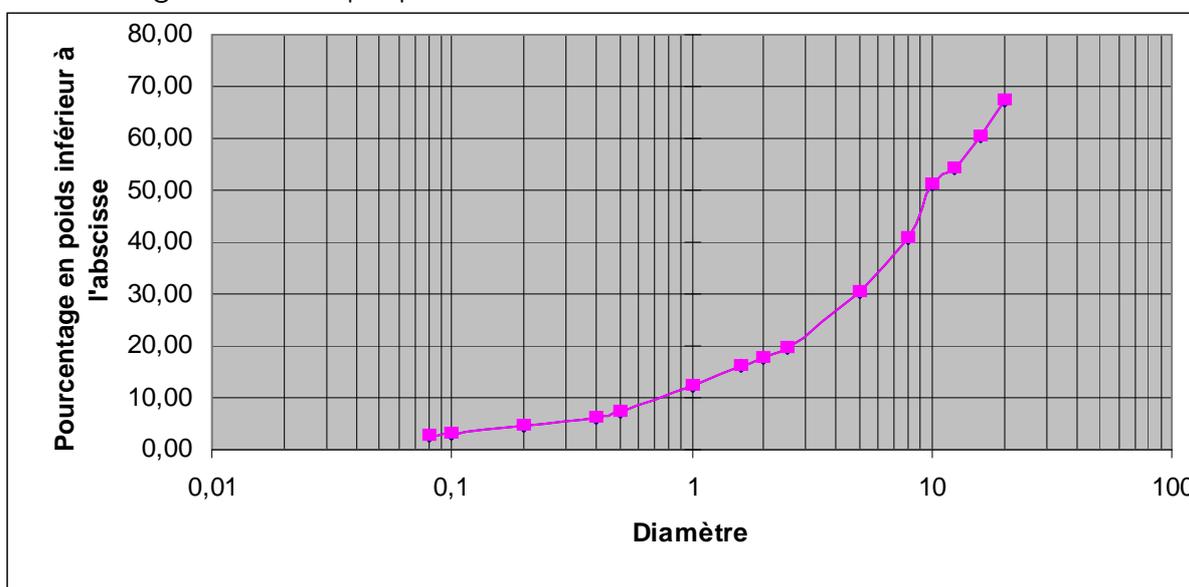
Photo 9 : Colonne de tamis sur la tamiseuse électrique.

Masse sèche après lavage Ms1 1780,2

Ouverture des tamis (mm)	Masse des refus cumulés (g)	% des refusats cumulés	% des tamisats cumulés
20	584,34	32,82	67,18
16	705,80	39,65	60,35
12,5	812,00	45,61	54,39
10	869,30	48,83	51,17
8	1057,80	59,42	40,58
5	1238,00	69,54	30,46
2,5	1428,60	80,25	19,75
2	1465,30	82,31	17,69
1,6	1492,06	83,81	16,19
1	1561,88	87,74	12,26
0,5	1649,89	92,68	7,32
0,4	1672,70	93,96	6,04
0,2	1700,24	95,51	4,49
0,1	1722,43	96,75	3,25
0,08	1728,89	97,12	2,88
Rn	1728,89		
Passant au dernier tamis Tn	49,62		
Rn + Tn	1778,51		

L'essai est valable car $100 * ((1780,2 - 1778,51) / 1780,2) = 0,09\%$, ce résultat étant bien inférieur à 2%.

La courbe granulométrique peut ainsi être tracée :



D_N correspond au diamètre à N pour cent.

Grâce à la courbe, on obtient $D_{60} = 16\text{mm}$ $D_{30} = 5\text{mm}$ $D_{10} = 0,8\text{mm}$

Le facteur d'uniformité granulométrique est : $C_u = D_{60} / D_{10} = 20$

Le facteur de courbure granulométrique est : $C_c = D_{30}^2 / (D_{10} * D_{60}) = 1,95$

Il s'agit donc d'une grave bien graduée car C_u est supérieur à 4 et C_c est compris entre 1 et 3.

Détermination des limites d'Atterberg

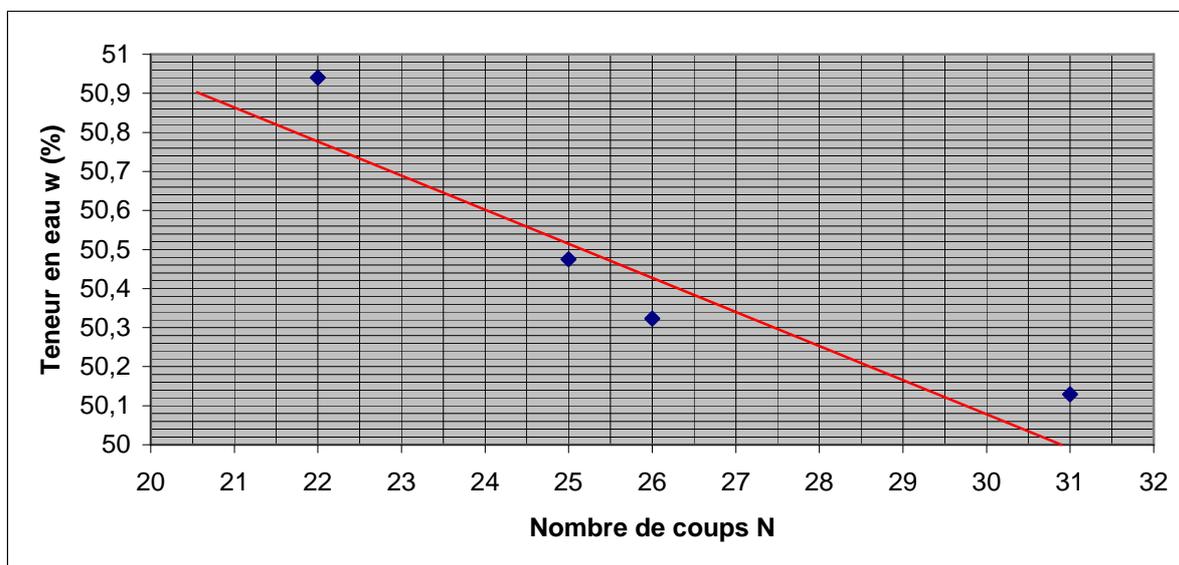
Les limites d'Atterberg correspondent à des valeurs de teneur en eau séparant les différents états d'un sol. La limite de liquidité w_L est la teneur en eau séparant l'état liquide de l'état plastique. La limite de plasticité w_P est la teneur en eau séparant l'état plastique de l'état solide. Les limites d'Atterberg permettent de classer un sol.

Le sol (ayant une profondeur de 1,63 à 2 m) a préalablement été passé à l'étuve puis à l'aide d'un pilon et d'un mortier il faut broyer le sol puis le tamiser à 40 μ m et ajouter de l'eau déminéralisée afin d'obtenir une pâte homogène et liquide.

• Limite de liquidité à la coupelle

Dans une coupelle, il faut répartir de la pâte puis réaliser une fente en partageant la pâte en deux. La manivelle doit être actionnée à une vitesse constante pour soumettre l'ensemble à une série de chocs jusqu'à ce que la rainure soit jointe sur 1cm de longueur. Le nombre de coups est noté et une dizaine de grammes de sol est prélevé au voisinage de la fermeture pour déterminer la teneur en eau. L'essai est valable quand le nombre de coups est compris entre 15 et 35.

Les résultats sont présentés ci-dessous :



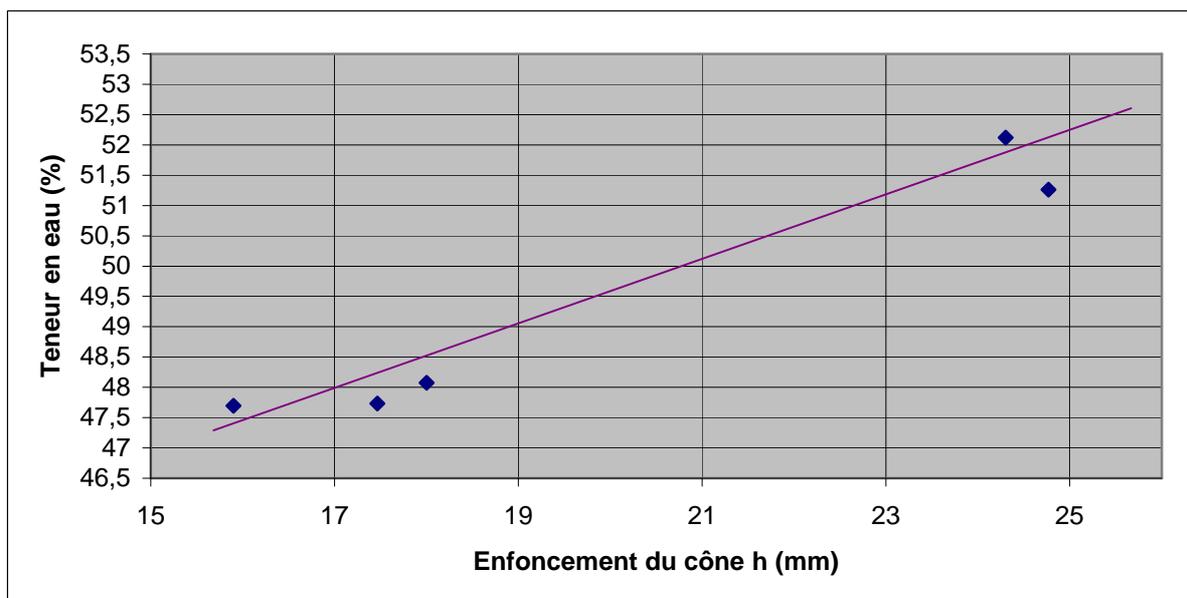
La limite de liquidité correspond à la teneur en eau à 25 coups.

On en déduit $w_L=50,51\%$.

• Limite de liquidité au cône de pénétration

Un cristalliseur est rempli de pâte puis placé à l'affleurement sous la pointe du cône. Le cône sous son poids va s'enfoncer dans l'échantillon. L'enfoncement dans l'échantillon est mesuré. Il faut répéter au moins quatre fois l'opération sur le même échantillon et prendre la valeur moyenne des différents enfoncements. La différence entre deux mesures consécutives doit être inférieure à 0,5 mm. L'essai est valable car l'enfoncement est compris entre 12 et 25 mm. Une dizaine de grammes de sol est prélevé pour déterminer la teneur en eau de l'échantillon.

Les résultats sont présentés ci-dessous :



La limite de liquidité correspond à la teneur en eau dont l'enfoncement est de 17mm. On en déduit $w_L=48\%$.

• Limite de plasticité au rouleau

L'essai permet de déterminer la limite de plasticité. Il faut réaliser à la main des petits boudins de sol d'une longueur de 10 cm et de diamètre 3 mm. La limite de plasticité correspond à la teneur en eau à laquelle le boudin se fissure lorsqu'il atteint le diamètre de 3 mm.

	Ech1	Ech2	Ech3	Ech4
Masse totale humide	23,37	25,06	27,83	23,68
Masse totale sec	23,02	24,69	27,53	23,35
Masse de la tare	21,97	23,57	26,63	22,35
Teneur en eau	33,3	33,0	33,3	33
Limite de plasticité	33,17			

L'essai est valable car l'écart entre les valeurs est inférieur à 2%.

La limite de plasticité correspond à la moyenne des teneurs en eau, on en déduit $w_P=33,18\%$.

• Qualification du sol

Pour les calculs, on prendra la moyenne des limites de liquidité pour la valeur de w_L .
On obtient $w_L=(48+50,51)/2=49,255\%$

Indice de plasticité $I_P=w_L-w_P$

$$I_P=49,255-33,18=16,075$$

L'indice de plasticité étant compris entre 12 et 25, on en déduit que le sol est peu plastique.

Indice de consistance $I_C=(w_L-w)/I_P$

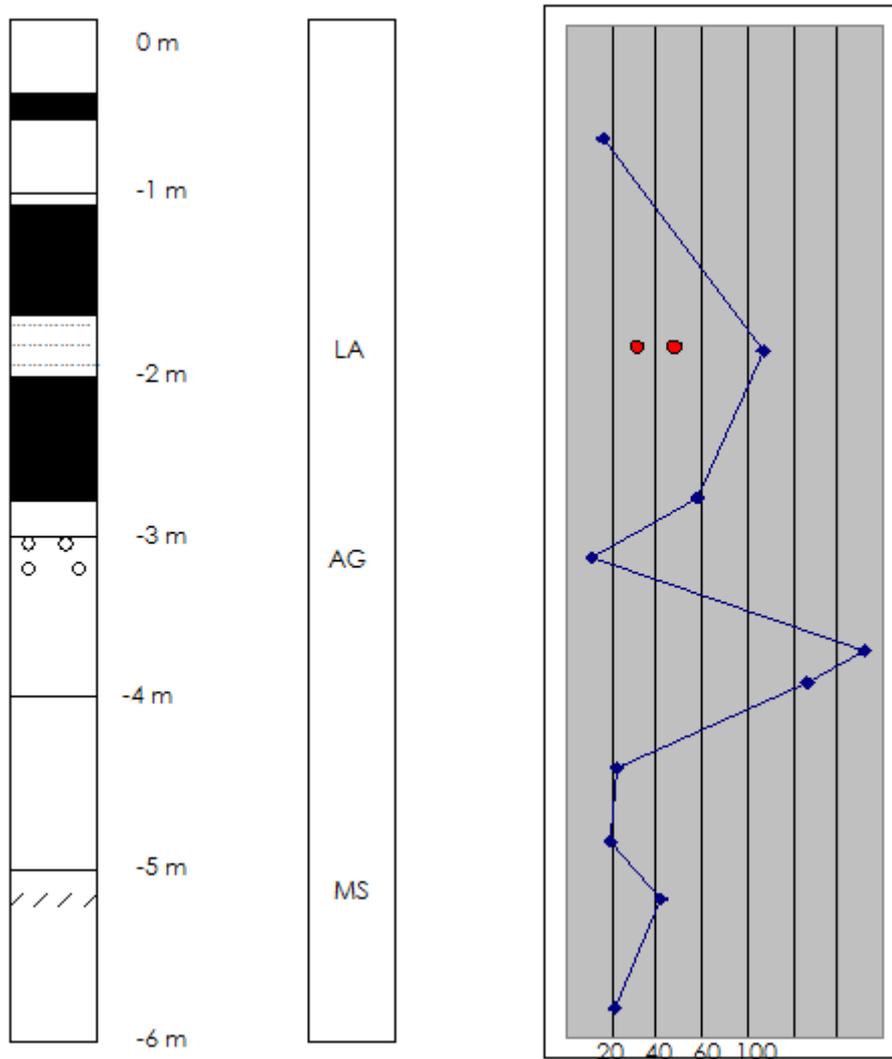
$$I_C=(49,255-59,127)/16,075=-0,61$$

L'indice de consistance est inférieur à 0, il s'agit donc d'un sol liquide.

D'après le diagramme de Casagrande (indice de plasticité en fonction de la limite de liquidité), on peut classer ce sol en tant que limons L_p et sols organiques peu plastiques Op .

Récapitulatif du forage

Stratigraphie	Profondeur	Essais de laboratoire	Teneur en eau et limites (%) Wp WI
			↓ ↓



Légende

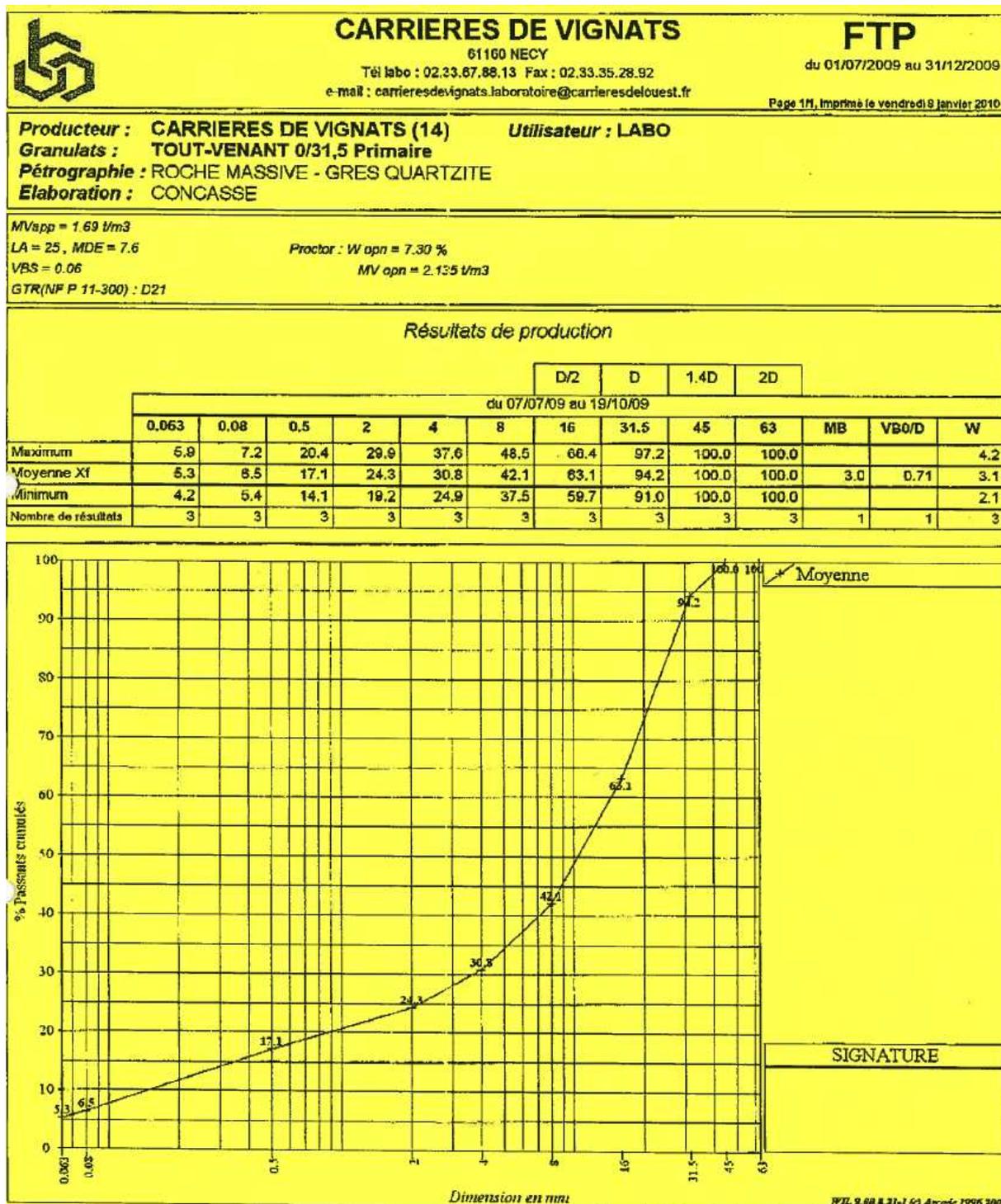
-  Argile
-  Grave
-  Limon
-  Vide dans la carotte

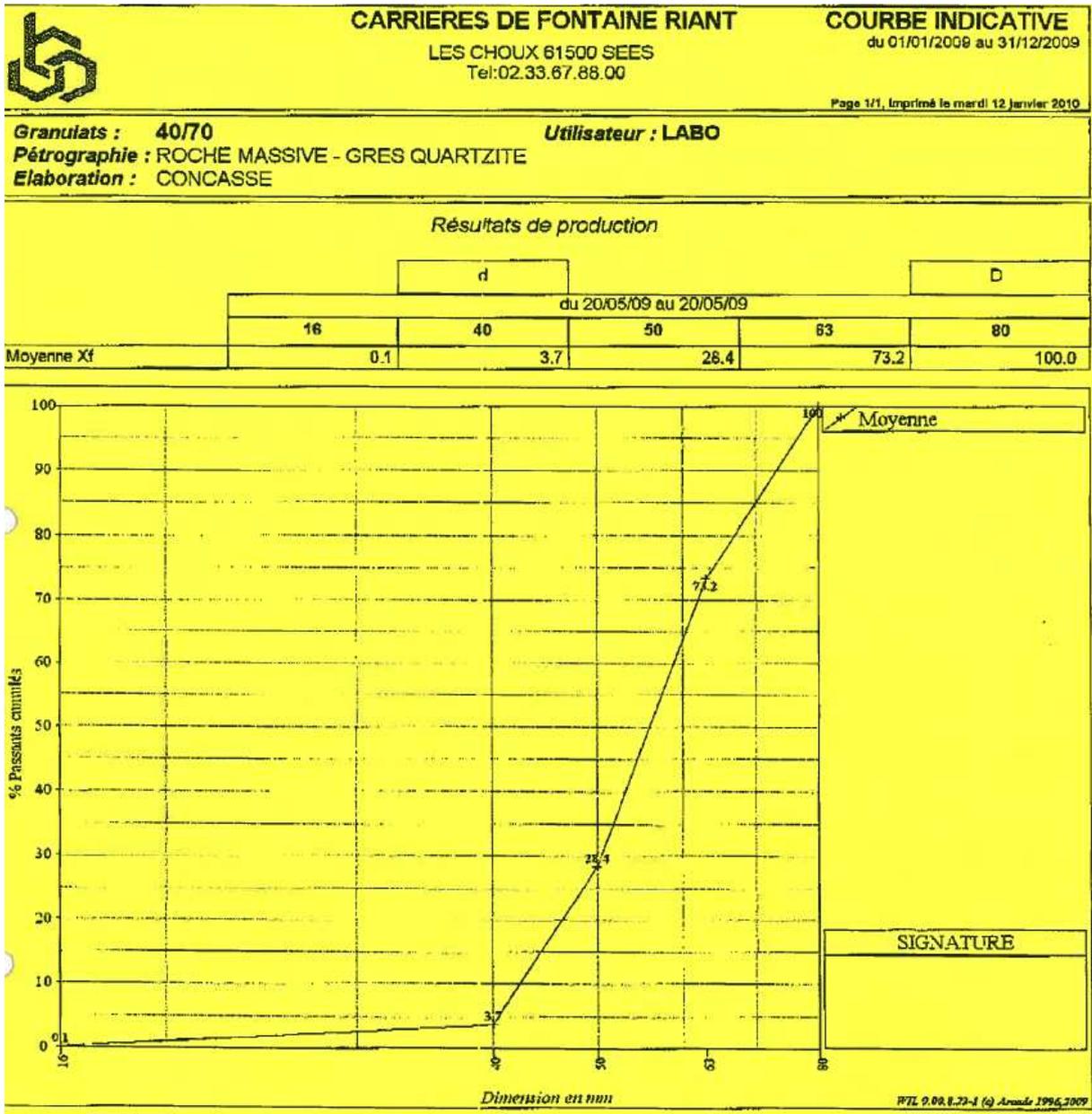
AG : Analyse granulométrique

LA : Limites d'Atterberg

MS : Masse volumique des particules solides

Annexe 4 – Courbe granulométrique du matériau composant la PTC





Annexe 5 – Position de l'instrumentation

