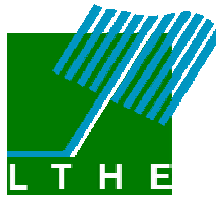




Pôle Grenoblois d'étude et de recherche
pour la prévention des Risques Naturels



Cemagref Aix-en Provence



Laboratoire d'étude des Transferts
en Hydrologie et Environnement



Service de Restauration des
Terrains en Montagne - Isère

PROJET DRAINAGEING – PHASE I

ÉTUDE DU VIEILLISSEMENT DES GÉOTEXTILES-
FILTRÉS UTILISÉS EN TRANCHÉES DRAINANTES,
SUR SITE EXPERIMENTAL DANS LE TRIÈVES

DOCUMENT PRINCIPAL



Février 2010

VERSTAevel MATTHIEU, MERIAUX PATRICE
Cemagref Aix-en-Provence, Unité Ouvrages Hydrauliques et Hydrologie (OHAX)
FAURE YVES-HENRI (LTHE – EQUIPE TRANSPORE)

RESUME

Ce rapport synthétise le travail effectué depuis avril 2009, au titre de la phase I du projet DrainAgeing. Il regroupe les données que nous avons rassemblées depuis le lancement en 1993 de l'expérimentation des tranchées drainantes du site de Roissard (Isère – 38), dans la région du Trièves. Le but de ce projet est d'étudier le comportement à long terme des géotextiles utilisés en tranchée drainante, et plus largement dans tous les dispositifs de drainage de sols ou d'ouvrages en terre (barrages et digues). Le site de Roissard a été choisi en 1993, car la région du Trièves est connue pour ses argiles litées, qui posent de nombreux problèmes dans le domaine de la géotechnique, notamment de glissements de terrain. Or l'eau est un facteur souvent prépondérant dans le déclenchement des glissements de terrain, ou dans tous les cas c'est un facteur aggravant. De plus, lors de la réalisation de tranchées drainantes ou plus généralement d'ouvrages drainants, la pose du géotextile est toujours délicate, et même potentiellement dangereuse pour des tranchées ou excavations profondes. En effet, de par la présence d'eau, le risque qu'elles se referment, est non négligeable, et peut provoquer de graves accidents de personnes, d'où la nécessité de blinder ou de taluter les parois de fouille, comme l'impose la réglementation du travail. C'est pour ces raisons que le LTHE, le Cemagref d'Aix-en-Provence, ainsi que le service de Restauration des Terrains en Montagne (RTM) de l'Isère, se sont associés dans le projet DrainAgeing qui consiste à étudier l'évolution du comportement, et notamment du colmatage, des géotextiles utilisés comme filtres en milieu fin (ou argileux). Il poursuit le projet d'expérimentation de Roissard débuté fin 1993, et suivi jusqu'en juillet 1999. Depuis juillet 2008, les mesures sur ce site ont repris dans le cadre du projet DrainAgeing, et depuis mai 2009, le site a été partiellement remis en état pour la poursuite des études. Ces nouvelles et récentes mesures sont analysées dans le présent rapport d'avancement et comparées avec les mesures de la période 1993-1999.

On rappelle que le dispositif expérimental de Roissard est constitué de six tranchées drainantes de 1,5 à 2 m de profondeur, réalisées avec des modalités et produits géosynthétiques différents et équipées de regards de mesures. Il est situé sur un terrain réputé homogène, en pente faible (environ 5%) et régulière, sur substratum d'argiles litées du Trièves, avec de l'eau présente entre 0 et environ 1,50 mètres de la surface.

Outre la reprise des mesures et pour observer plus précisément l'état des drains autoroutiers des tranchées drainantes une inspection télévisuelle a été réalisée en juin 2009, ce qui a permis d'évaluer l'état de ces collecteurs drainants et de repérer les principales venues d'eau actuelles dans les tranchées.

Tous ces éléments nous ont permis d'esquisser les travaux de génie civil et le protocole scientifique à mettre en œuvre pour la phase II de réouverture partielle des tranchées du projet DrainAgeing : modalités, localisation et coût de réalisation des réouvertures, choix des types de prélèvements et d'essais à réaliser, etc. - l'objectif du projet étant de comparer les performances au terme de quelque 17 années de service des différentes tranchées drainantes et de leurs géotextiles.

SOMMAIRE

RESUME	2
INTRODUCTION	5
I LE PROJET DE 1993 A 1999.....	6
I.1 PRESENTATION DU PROJET	6
I.1.a Historique	6
I.1.b Le but du projet	6
I.1.c Elaboration du projet.....	7
I.1.d Réalisation des tranchées.	10
I.2 LES DONNEES RECOLTEES.....	12
I.2.a La pluviométrie	12
I.2.b La topographie	13
I.2.c Les piézomètres.....	13
I.2.d Les tensiomètres.....	19
I.2.e Les débits	21
I.2.f Le sol collecté.....	22
I.2.g Bilan (1993-1999).....	24
II LE PROJET DE JUILLET 2008 A DECEMBRE 2009.....	25
II.1 REMISE EN ETAT DU SITE.....	25
II.1.a Les piézomètres	25
II.1.b Les système de récupération du sol transporté	27
II.2 LES DONNEES RECOLTEES.....	28
II.2.a Levé topographique	28
II.2.b La piézométrie	30
II.2.c Les débits	33
II.2.d Le sol transporté	34
II.2.e L'examen télévisuel.....	36
III COMPARAISON DES PERIODES DE SUIVI DU DISPOSITIF DE TRANCHEES DRAINANTES.....	39
III.1 LES PERIODES D'ETUDE.....	39
III.1.a La pluviométrie	39
III.1.b Observations générales sur site	40
III.2 LES TRANCHEES	41
III.2.a Les mesures de débits	41
III.2.b La piézométrie.....	44
III.3 CONCLUSION	50

IV PROJET DE REOUVERTURE ET D'ANALYSE DES TRANCHEES DRAINANTES (VERS LA PHASE II DE DRAINAGEING)	51
IV.1 UN PROJET DE REOUVERTURE INTERESSANT AUSSI POUR LE DOMAINE DES BARRAGES.....	51
IV.1.a Dispositif de drainage d'un barrage en remblai	51
IV.1.b Nature des matériaux utilisés dans les drains.....	52
IV.1.c Intérêt du projet « DrainAgeing » pour les barrages.....	54
IV.2 LES TRAVAUX DE GENIE CIVIL	54
IV.2.a Premier principe d'ouverture : la méthode CARRON	55
IV.2.b Technique par pose de caisson de type léger	55
IV.2.c Technique par pose de palplanches.....	56
IV.2.d La méthode choisie	57
IV.3 LES ESSAIS.....	57
IV.3.a Les essais sur les géosynthétiques.....	58
IV.3.b Les essais sur le terrain naturel et la grave.....	58
V LES AVANCEES EN COURS (DECEMBRE 2009).....	62
V.1 LA CREATION DE FOSSES EN AMONT DU SITE.....	62
V.2 MISE EN PLACE DE CAPTEURS ENREGISTREURS DE PRESSIION DANS LES PIEZOMETRES	64
V.3 MISE EN PLACE DE DEBITMETRES AUTOMATIQUES.....	66
CONCLUSION GENERALE.....	67
BIBLIOGRAPHIE	68
LISTE DES FIGURES	70

INTRODUCTION

Depuis Avril 2009, le travail a consisté tout d'abord à synthétiser les données que nous avons sur le réseau de 6 tranchées drainantes, mises en place selon différents modes de réalisation et avec différents géotextiles sur le site expérimental de Roissard (Isère). Ces tranchées ont été créées à l'automne 1993, à l'initiative à l'époque de l'IRIGM et du service de Restaurations des Terrains en Montagne de l'Isère. Elles ont été régulièrement suivies jusqu'en 1999 par d'abord Bassam FARKOUH à l'occasion de sa thèse soutenue le 18 novembre 1994, et puis par Philippe VAGNER pour son DEA Mécanique Conception et Géomécanique achevé en 1999. Depuis, le site n'était plus du tout suivi. Le projet a été relancé en mars 2008, suite à une visite du site expérimental, par le Cemagref Aix-en-Provence. La reprise des mesures décidées consécutivement à cette visite a été le point de départ du projet « *DrainAgeing* » qui associe aujourd'hui l'Unité de Recherche « Ouvrages hydrauliques et hydrologie » (OHAX) du Cemagref Aix-en-Provence, le LTHE et le Service RTM de l'Isère et qui est soutenu pour sa phase I par l'IREX (dans le cadre du PN ERINOH) et le Pôle Grenoblois d'Etude et de Recherche pour la Prévention des Risques Naturels. L'objectif de la phase I, qui fait l'objet du présent rapport, était de remettre à niveau le site, d'analyser les mesures actuelles et les comparer avec les mesures anciennes et de préparer un protocole de démantèlement partiel du réseau de tranchées drainantes et de prélèvements et essais sur les géotextiles, la grave et l'argile à proximité. Le but ultime étant notamment de comparer les différents modes de réalisation des tranchées et les géotextiles qui ont fonctionné pendant plus de 15 années.

Ce rapport s'articule donc en cinq parties :

- la première concerne un rappel de l'historique des tranchées, de leur réalisation et suivi, pour la période de 1993 à 1999 ;
- la seconde décrit le travail de remise en état du site d'expérimentation et son suivi de juillet 2008 à décembre 2009 ;
- la troisième compare les deux périodes d'études 1993-1999 et 2008-2009 et les différentes tranchées drainantes entre elles ;
- la quatrième esquisse le projet de réouverture des tranchées du site (phase II), non sans souligner en introduction l'intérêt du projet DrainAgeing pour le domaine d'application du drainage des barrages en remblai ;
- la dernière partie présente les avancées les plus récentes du projet (Décembre 2009)..

I LE PROJET DE 1993 A 1999

Dans cette partie, est présenté le projet initial d'expérimentation des tranchées drainantes de Roissard, les raisons de sa réalisation, ainsi que les données que nous avons rassemblées à la reprise du projet en avril 2009. La collecte, la mise en forme et l'analyse des données sur la période allant du démarrage du projet (1993) jusqu'à l'arrêt provisoire du suivi du dispositif (1999), ont demandé un travail minutieux qui a occupé une part importante du stage de fin d'études « ingénieur géotechnicien » de Matthieu Verstaevel (Polytech'Grenoble) d'avril à septembre 2009 et dont les résultats sont exposés ci-après..

I.1 PRESENTATION DU PROJET

I.1.a Historique

Le projet a été lancé en avril 1993, par le service RTM de l'Isère (Restauration des Terrains en Montagne) et par l'IRIGM de Grenoble (Institut de Recherches Interdisciplinaires de Géologie et de Mécanique). Le but de ce projet était de créer un réseau de tranchées drainantes expérimentales, à échelle réelle. La conception de ce réseau a été confiée à Jocelyne LEROY, qui réalisait à l'époque son stage de fin d'étude de l'ISTG (Institut des Sciences et Techniques de Grenoble, devenu aujourd'hui Polytech'Grenoble), dans le département géotechnique. Le projet a ensuite été suivi par Bassam FARKOUH au cours de sa thèse (1991-1994), puis par Philippe VAGNER pour son DEA Mécanique Conception et Géomécanique (1999). Ainsi, le site a été suivi régulièrement jusqu'en juin 1999.

I.1.b Le but du projet

Ce projet s'inscrivait dans le cadre de la lutte contre les mouvements de terrain, dans la région du Trièves en Isère. En effet, pour stabiliser de nombreuses parcelles de cette région qui est connue pour ses glissements de terrains, plusieurs kilomètres de tranchées drainantes ont été et sont mis en place par le service RTM et les services des routes.

Ces tranchées drainantes sont généralement réalisées de la façon suivante: on commence par creuser la tranchée, on pose le géotextile, ensuite on met en place ou non un collecteur drainant, enfin on remblaye avec une grave calibrée (sur le dispositif de Roissard, la grave utilisée est roulée, calibrée 30/60), très perméable, enfin on referme le géotextile qui entoure alors tout le système drainant.

L'utilisation de géotextiles filtres pour protéger la grave de la tranchée drainante du risque de colmatage par les fines particules de l'argile encaissante (argile litée du Trièves), est au cœur de discussions : en effet, certains experts se posent la question du colmatage des géotextiles eux-mêmes, et donc de leur efficacité à long terme. De plus, leur mise en place nécessite la descente dans la tranchée de personnels (la manœuvre n'est pas réalisable avec une machine), et donc un talutage approprié des parois de fouille ou leur blindage. Ce qui rend la réalisation complexe et onéreuse.

C'est pourquoi par cette expérimentation, on souhaitait vérifier le réel rôle anticontaminant des géotextiles, évaluer leurs performances à long terme et affiner les critères de choix de leurs caractéristiques propres dans une telle utilisation.

I.1.c Elaboration du projet

Le travail de Jocelyne LEROY a débuté par la recherche d'un terrain répondant aux critères suivants :

- le terrain se devait préférentiellement d'être en série domaniale ou forêt soumise au régime forestier, pour éviter la location ;
- sa superficie devait être comprise entre 2000 et 5000 m², pour pouvoir réaliser un nombre représentatif d'ouvrages ;
- une morphologie plane ou légèrement ondulée, sans glissement connu pour éviter tous problèmes supplémentaires et pour que le réseau ne risque pas d'être endommagé par des mouvements de terrains trop importants ;
- une pente douce et régulière, environ 10 à 20% maximum ;
- un boisement assez faible ou sans intérêt économique ;
- une géologie homogène, à dominante fine et cohérente (type argiles grises litées du Trièves ou limon argileux) ;
- des conditions hydrauliques régulières, une nappe stable dans le temps et peu profonde (<1m) ;
- un accès facile pour tous types de véhicules.

La recherche de ce terrain a été difficile. Finalement, Mademoiselle LEROY a opté pour le terrain de Roissard. C'est un terrain en location, il est encadré par deux ruisseaux, la pente est régulière d'environ 5%, avec un accès facile puisqu'un chemin arrive au bout de la parcelle. La localisation du site est détaillée sur les cartes suivantes, (parcelle 491 de la commune de Roissard).

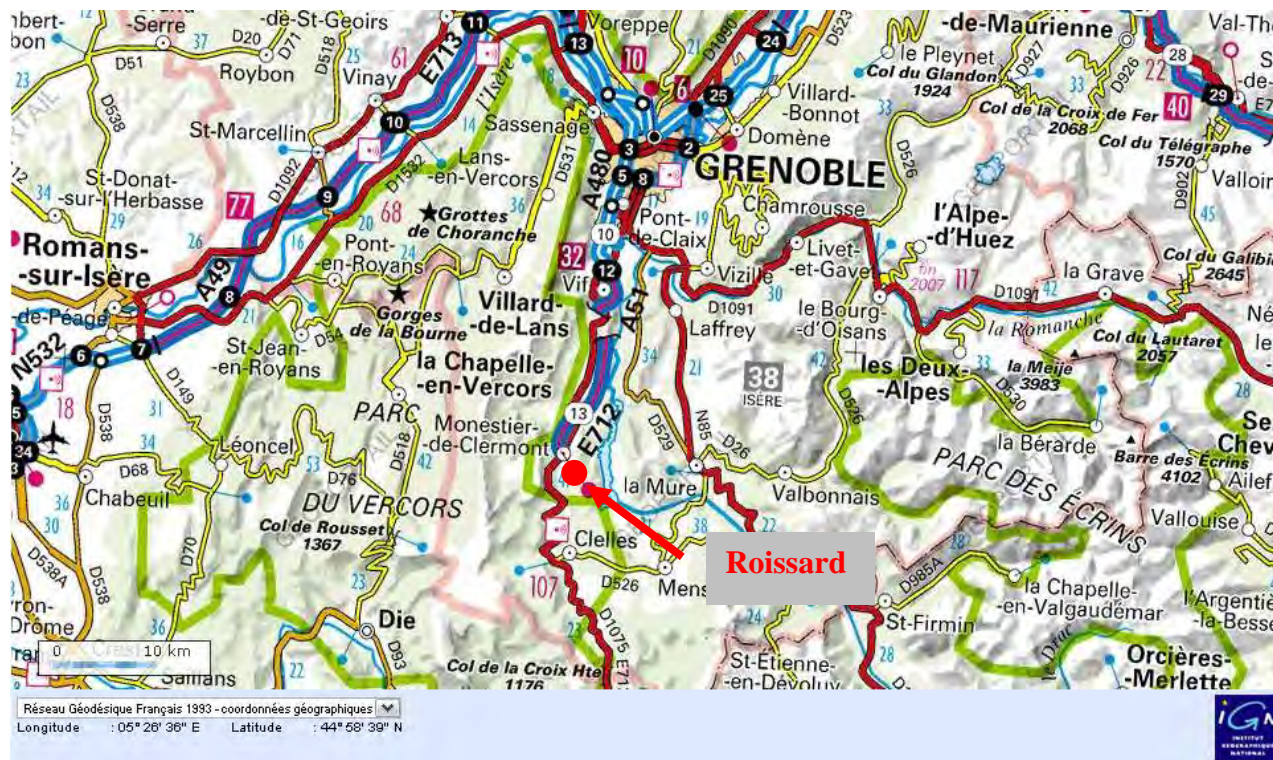


Figure I.1 : Carte de localisation du site, d'après Géoportail

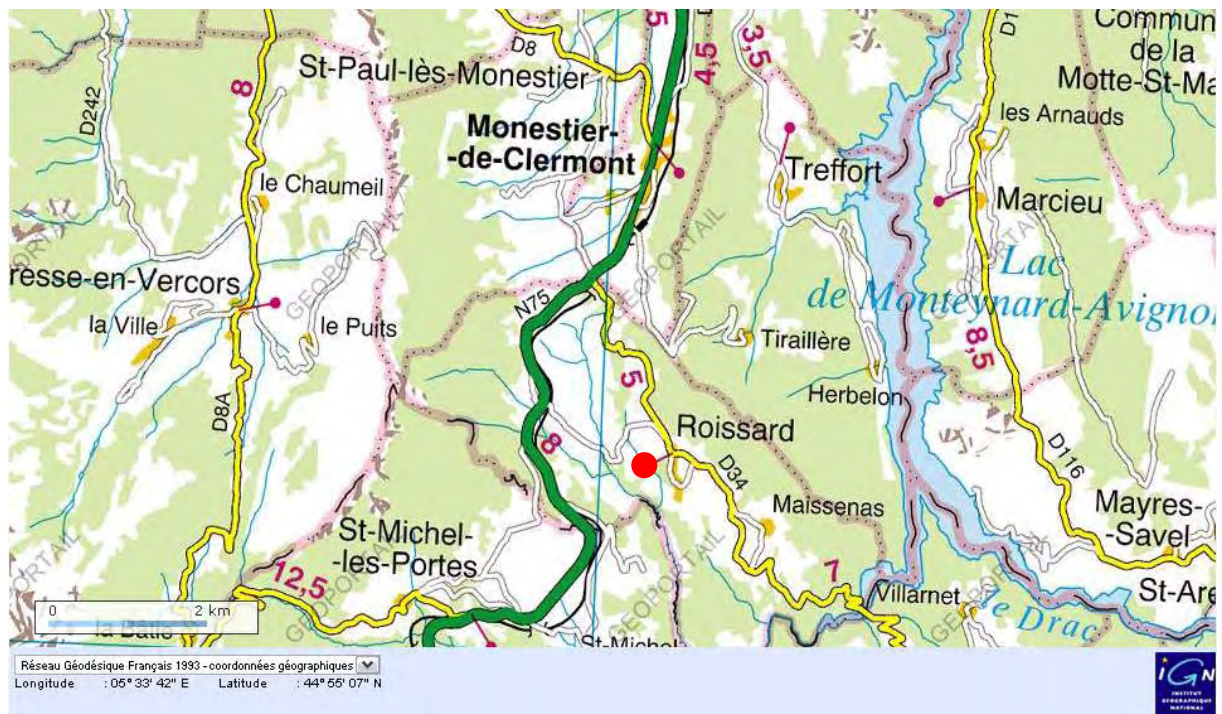


Figure I.2 : Carte de localisation rapprochée du site, d'après Géoportail



Figure I.3 : Carte de localisation cadastrale du site, d'après Géoportail

Une fois le terrain choisi, il a fallu réaliser le réseau expérimental, avec le choix préalable des géotextiles. A ce titre, il a été décidé de mettre en place 6 tranchées réalisées comme suit :

- Tranchée 1 (T1) :

A l'origine, elle devait être la tranchée témoin ; en effet, elle est réalisée sans géotextile.

* sa pente en surface est de 4%, amont vers aval

* sa profondeur moyenne est de 2,00 m

Lors de sa réalisation, il a été constaté ni source ni d'eau dans la tranchée. Un géotextile Bidim b2 à tout de même été posé en protection en bout de drain et au raccord drain / tube PVC (le tube PVC est le tube qui fait la jonction entre le drain et le regard de chaque tranchée).

Dès sa mise en place, la tranchée ne débite que goutte à goutte.

- Tranchée 2 (T2) :

Cette tranchée comporte un géotextile Bidim b2 posé horizontalement pour filtrer l'eau entre la grave et la terre végétale. Lors de son creusement, elle s'est éboulée sur un à deux mètres au niveau d'une venue d'eau.

* sa pente en surface est de 2% environ, amont vers aval

* sa profondeur moyenne est de 2,05 m

On observe un débit en bout de drain dès sa mise en place

- Tranchée 3 (T3) :

Cette tranchée est réalisée avec un géotextile Bidim b2 positionné en chaussette (tout autour de la grave).

* sa pente en surface est de 1% d'amont vers aval

* sa profondeur moyenne est de 1,60 m

On constate l'existence de deux venues d'eau, une en fond de tranchée et une en rive gauche, et dès sa mise en place, un débit est observé en bout de drain.

- Tranchée 4 (T4) :

Cette tranchée est réalisée sur le même principe que T3 mais en utilisant un Propex 6062 comme géotextile.

* sa pente en surface est de 3%, d'amont vers aval

* sa profondeur moyenne est de 1,70 m

Lors de sa réalisation, de nombreuses venues d'eau ont été observées sur ses deux rives ainsi qu'une lentille de sable rouge et une poche de terre saturée.

- Tranchée 5 (T5) :

Le mode de réalisation est identique aux deux tranchées précédentes, à savoir pose du géotextile en chaussette autour de la grave. Mais cette fois-ci a été utilisé un Hate 43 144.

* sa pente en surface est de 3%, d'amont vers aval

* sa profondeur moyenne est de 2,05 m

On n'a pas observé de venue d'eau lors de sa réalisation

- Tranchée 6 (T6) :

Cette tranchée est réalisée différemment des autres ; en effet, ici un géocomposite Hydraway 2000 a été mis en place. Ainsi, il n'y a pas eu besoin de grave, on a remis en place les terres extraites.

* sa pente en surface est de 2%, d'amont vers l'aval

* sa profondeur moyenne est de 1,90 m

Aucune venue d'eau n'est constatée lors du creusement

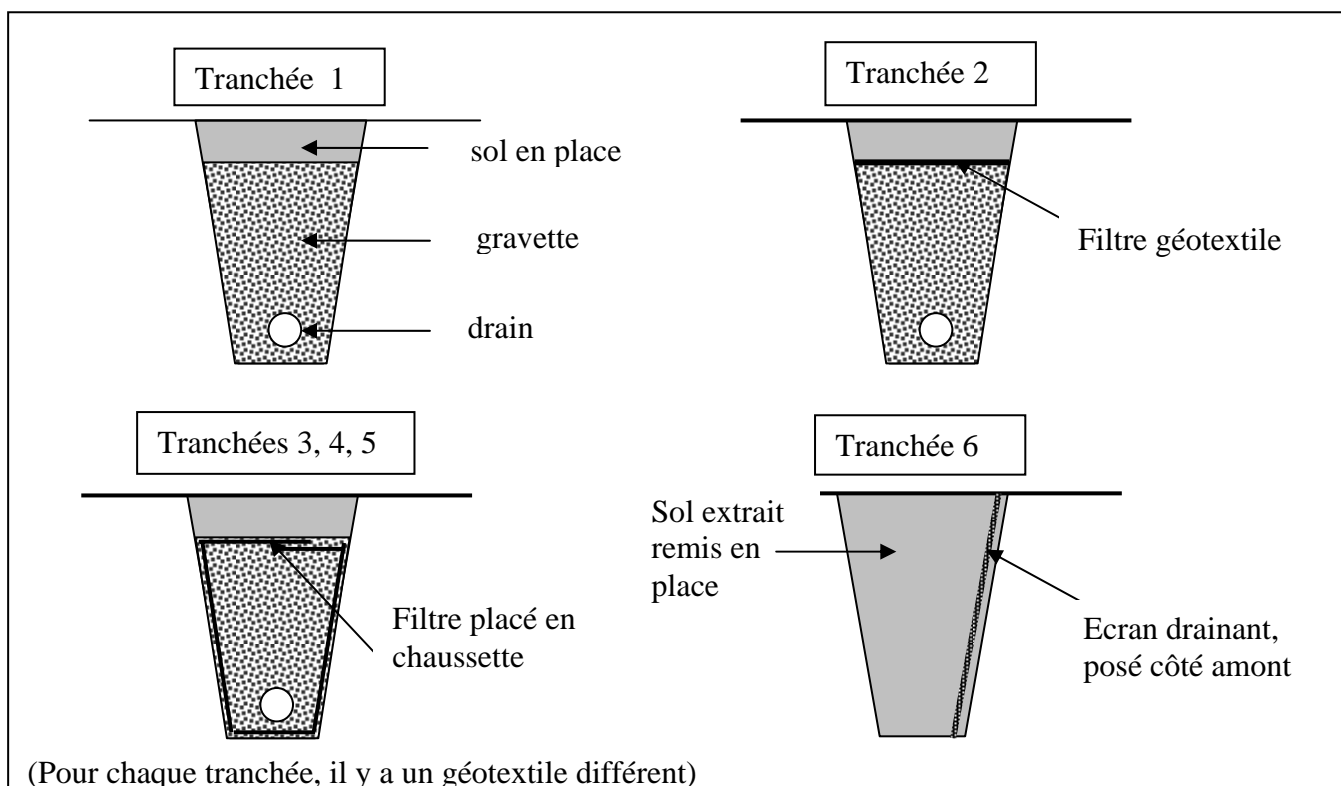


Figure I.4 : Coupes types des tranchées du site

Des géotextiles différents ont été sélectionnés dans le but de comparer leur comportement à long terme. Pour cela un panel a été choisi, balayant la plupart des grandes familles de géotextiles, (voir tableau suivant).

N° de la tranchée	Appellation commerciale	Notation LTHE	Masse surfacique (g/m ²)	Epaisseur (mm)	Ouverture de filtration (µm)	permittivité (s ⁻¹)
1	sans géotextile					
2	bidim b2	BD 130	130	1,6	140	4,6
3	bidim b2	BD 130	130	1,6	140	4,6
4	Propex 6062	Px 190	190	0,7	110	0,12
5	Hate 43114	HT 200	200		1500	
6	Hydraway 2000	HD 233	233	27,2	100	2,98

Figure I.5 : Tableau des caractéristiques physiques des géotextiles utilisés

(Les fiches techniques de chaque géotextile sont disponibles en annexes 2, 3, 4, 5)

I.1.d Réalisation des tranchées.

Lors de la réalisation des tranchées en 1993, aucun problème majeur n'a été rencontré, chaque jour un représentant du RTM était sur place pour vérifier le bon suivi des travaux. Pour permettre la visite des exutoires des tranchées et le jaugeage des débits de drainage, 4 regards ont été créés. Pour évacuer l'eau drainée par les tranchées, 2 collecteurs ont été installés ; ils rejettent l'eau dans les deux petits cours d'eau proches du terrain. Le premier

part du regard 1 (R1), et le deuxième du regard 4 (R4). Ce dispositif implique que l'eau collectée dans le regard 2 (R2) doit être acheminée dans le regard 1, comme l'eau du regard 3 (R3) dans le regard 4 (R4). C'est pourquoi dans la tranchée 2 un collecteur PVC étanche a été installé pour amener l'eau de R2 vers R1, et de même dans la tranchée 5 pour amener l'eau de R3 vers R4.

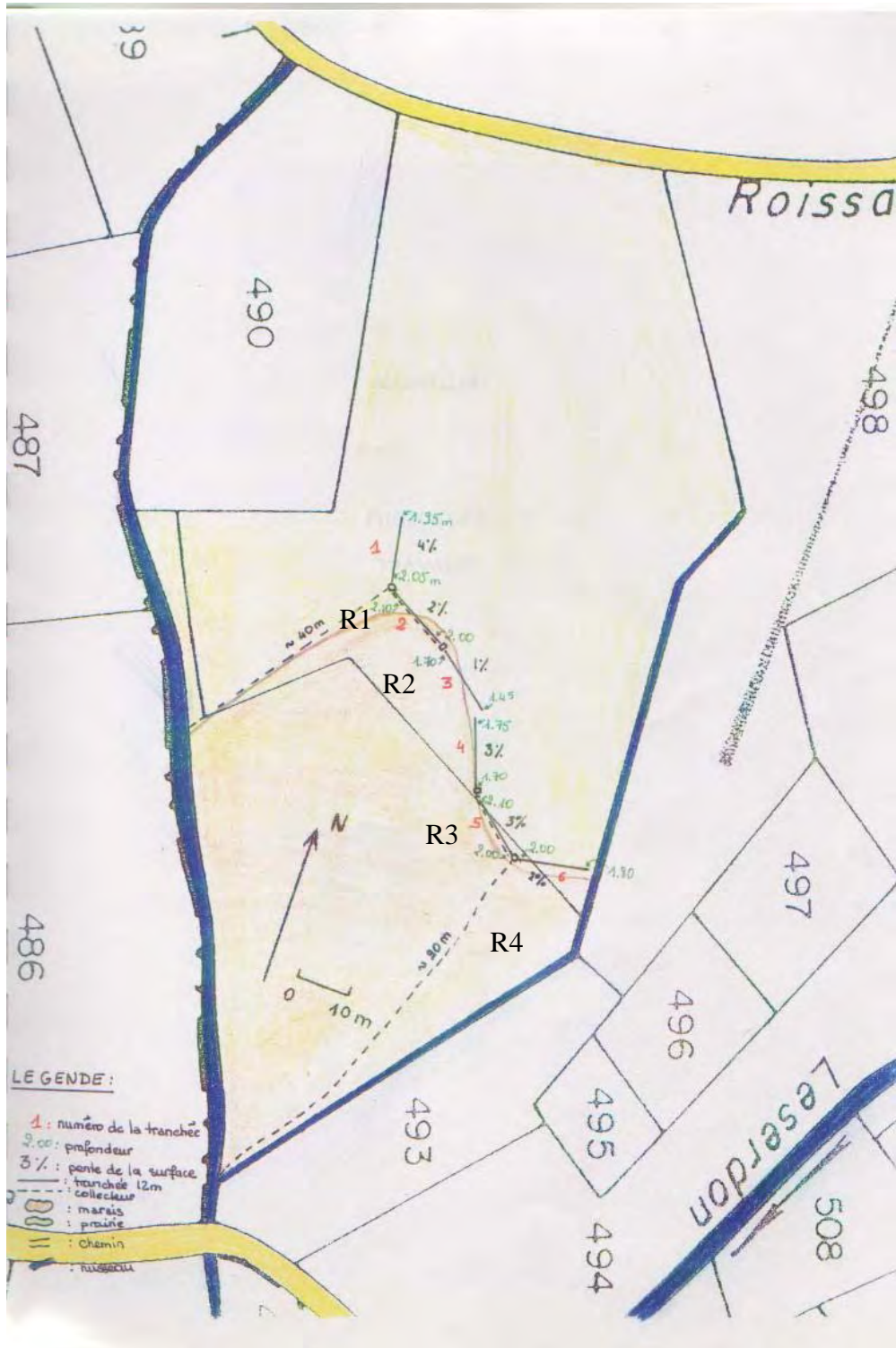


Figure I.6 : Plan du site après travaux, d'après LEROY J. (1993)

Enfin, un réseau de 31 piézomètres ainsi que des tensiomètres ont été mis en place pour suivre l'évolution de la saturation du terrain de part et d'autre des tranchées. A l'exutoire aval de chaque tranchée et dans les regards, un système de récupération des matériaux fins transportés par l'eau drainée a été installé ; ils sont détaillés dans la partie suivante.

I.2 LES DONNEES RECOLTEES

I.2.a La pluviométrie

Pour cette étude, on dispose des relevés pluviométriques journaliers de Météo France. Le pluviomètre étant installé sur la commune de Roissard, on peut les utiliser tel quel car la distance au site est faible. Ces données sont importantes puisqu'on étudie et jauge des débits d'eau drainée par les tranchées. Afin de pouvoir comparer le comportement des tranchées sur plusieurs années il est nécessaire de tenir compte des quantités d'eau météorite qui influent sur la saturation des sols drainés par les tranchées. Les données collectées sont résumées dans les graphiques suivants.

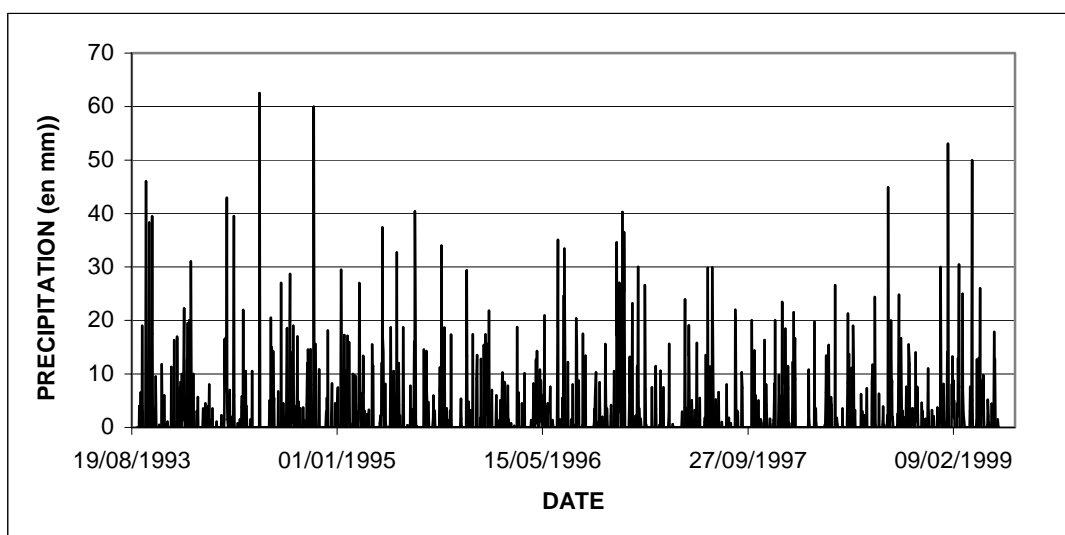


Figure I.7 : Précipitations journalières entre 1993 et 1999

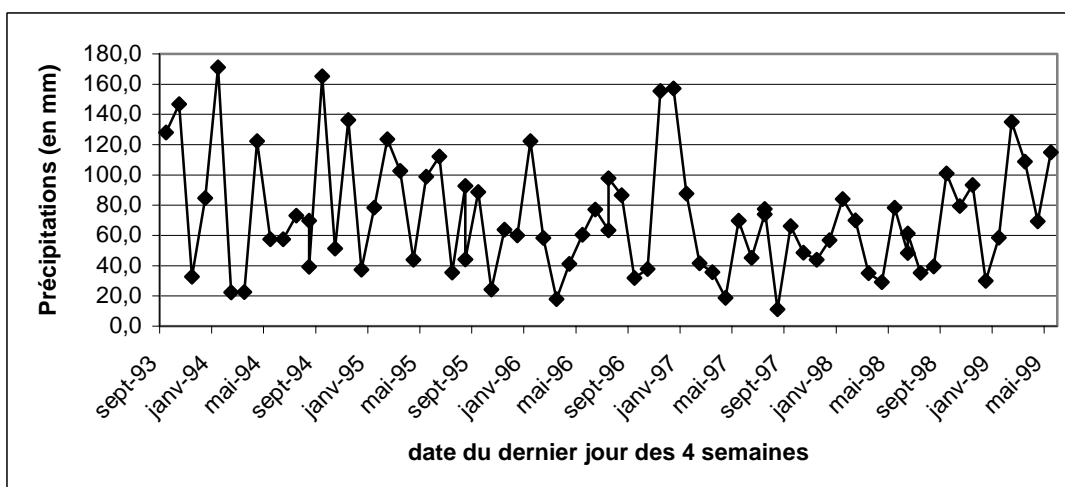


Figure I.8 : Précipitations cumulées par 4 semaines

I.2.b La topographie

Pour pouvoir étudier le site et notamment analyser les données piézométriques, un relevé topographique est nécessaire. Il a été réalisé en utilisant le point le plus bas, à savoir le fond du regard 4, pour avoir des coordonnées z « altitude » toujours positives.

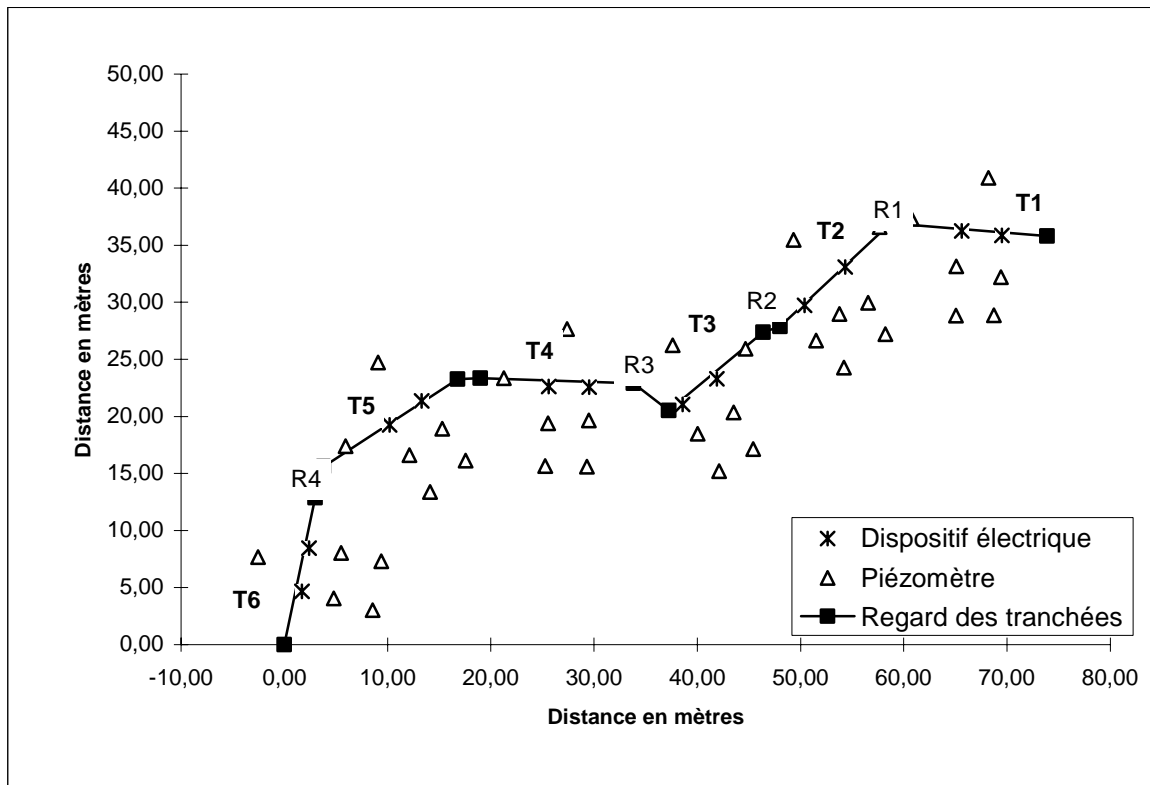


Figure I.9 : Relevé topographique, d'après VAGNER P. (1999)

(Ce relevé est disponible en annexe 6 en format agrandi).

Au cours de notre travail, nous nous sommes aperçus de certaines erreurs dans les coordonnées X et Y des piézomètres de la tranchées 3 et nous les avons corrigées : ce qui ne gêne pas l'analyse des niveaux piézométriques.

I.2.c Les piézomètres

Le but des piézomètres est de mesurer la profondeur du toit de la nappe à différentes distances de la tranchée. En effet, on essaye de mettre en évidence le rabattement de cette dernière, ce qui est une preuve du fonctionnement des tranchées. En évacuant l'eau, la tranchée crée un cône de rabattement et le niveau s'abaisse au fur et à mesure que l'on se rapproche d'elle. Concrètement sur notre site, les piézomètres sont des tubes en PVC de 40 mm de diamètre, crépinés sur toute leur hauteur, et indiquent donc la charge hydraulique maximale des horizons traversés. Pour nous, l'intérêt des piézomètres est de voir à quelle profondeur se situe la surface libre de la nappe. Il existe un risque d'erreur de mesure: en effet si le réseau d'équipotentiels n'est plus vertical, alors le piézomètre ne donne plus la cote de la surface libre. Mais à Roissard le rabattement n'est pas suffisant pour qu'un tel problème se présente..

Les piézomètres sont disposés comme suit : 1 placé à l'aval des tranchées, et 4 à l'amont. (Voir le schéma suivant)

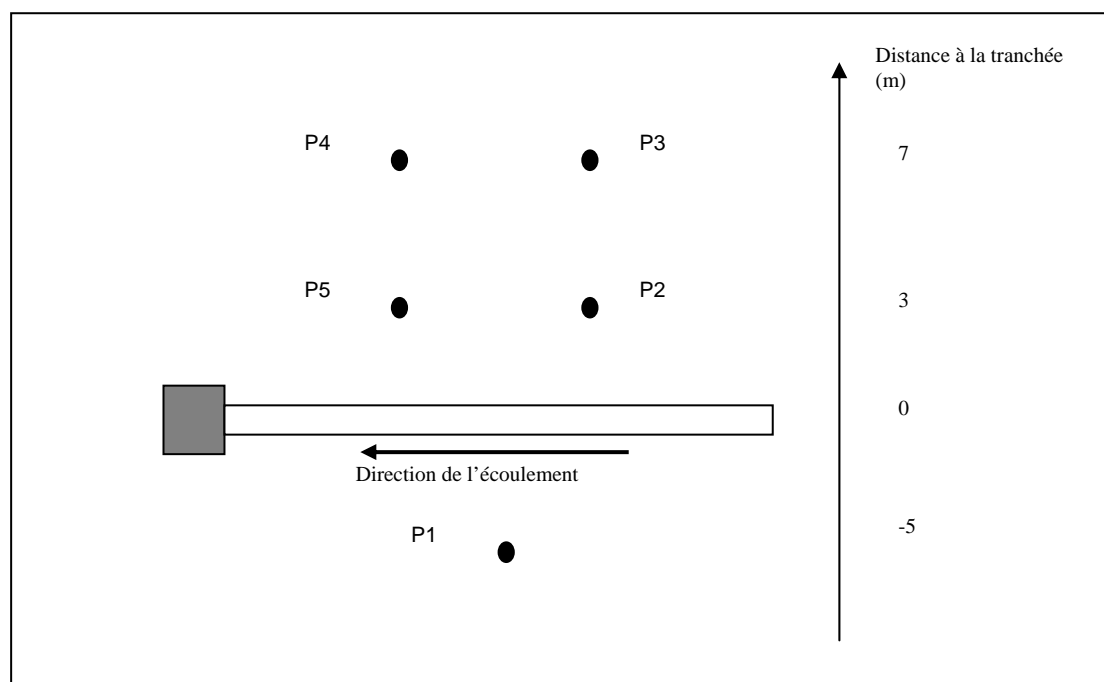


Figure I.10 : Schéma d'implantation des piézomètres pour une tranchée, d'après VAGNER P. (1999)

On dispose donc de 31 piézomètres ($6 \times 5 + 1$) ; en effet la tranchée 2 est munie d'un piézomètre supplémentaire (P2/7), comme le montre la figure I.11

Des relevés ont été réalisés régulièrement, pour suivre l'évolution de la charge hydraulique du terrain. Pour cela, on connaît les altitudes des têtes de piézomètres par rapport au fond du regard le plus profond (R4), on en déduit la charge d'eau au niveau de chaque piézomètre. L'ensemble des résultats et graphiques sont disponibles dans le paragraphe III.2.b. Ici, on ne présente qu'un graphique par tranchée sur la période 1993-1994, il est composé de la charge la plus haute (du 07/12/1993), la plus basse (du 08/08/1994) et de deux charges intermédiaires (du 07/02/1994 et du 03/05/1994).

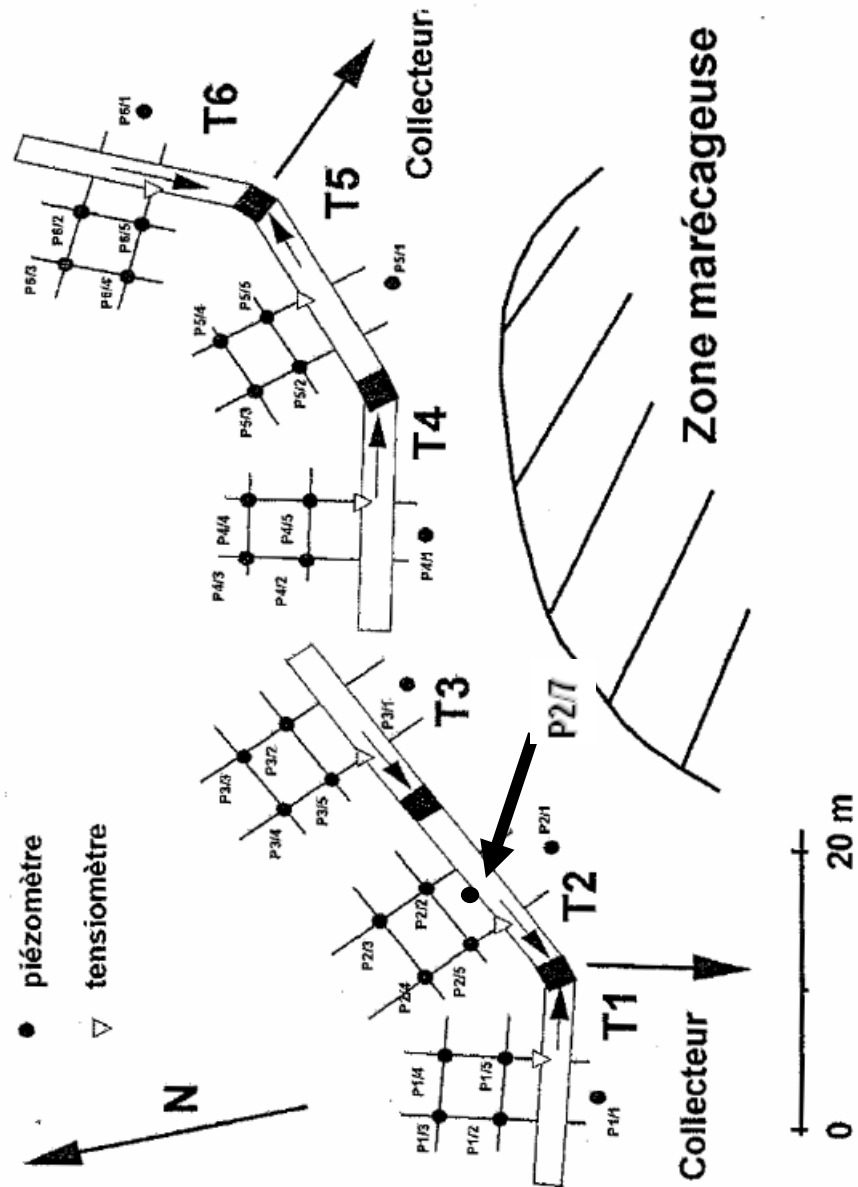


Figure I.11 : Plan de situation des piézomètres, d'après FARKOUH B. (1994)

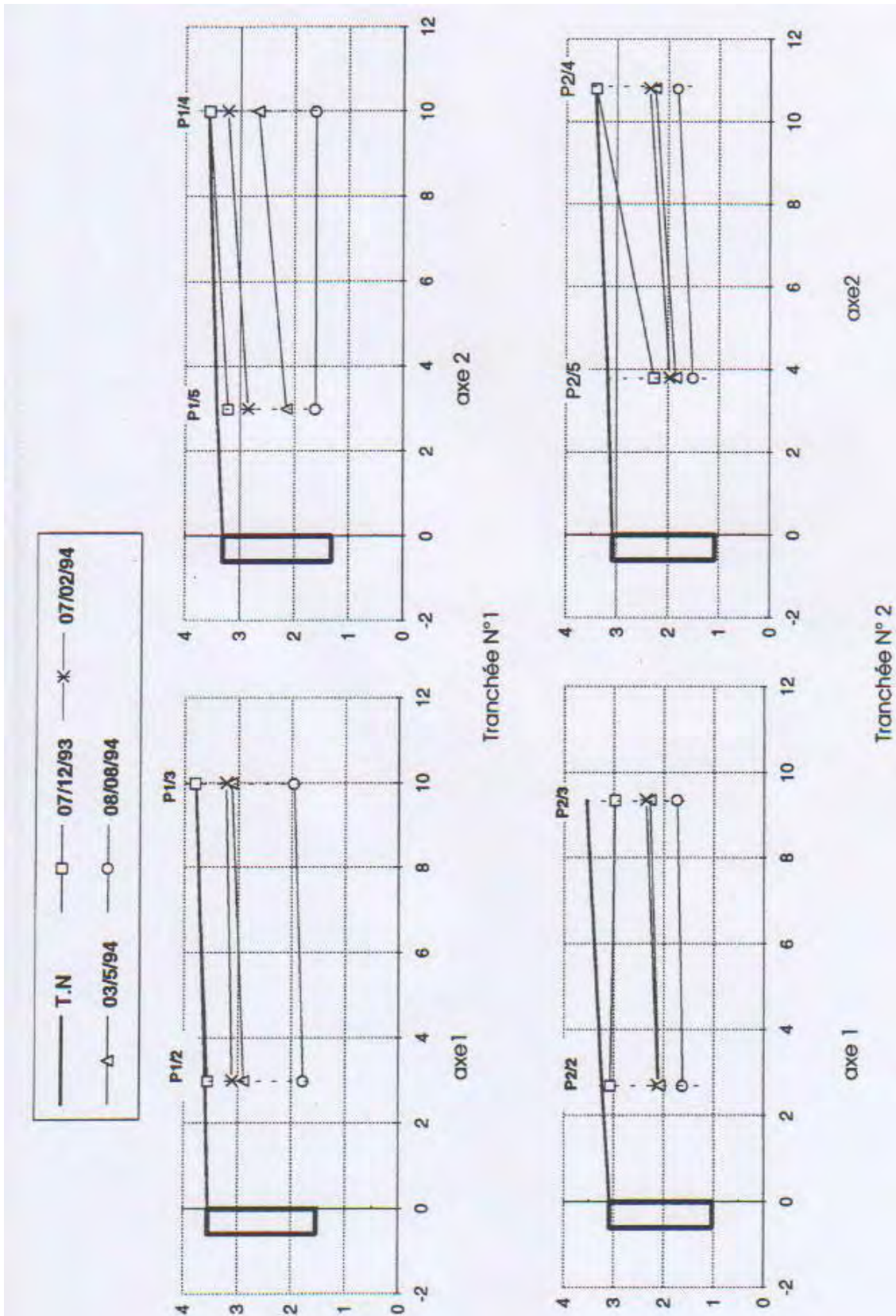


Figure I.12 : Niveaux piézométriques à l'amont des tranchées 1 et 2, d'après FARKOUH B. (1994)

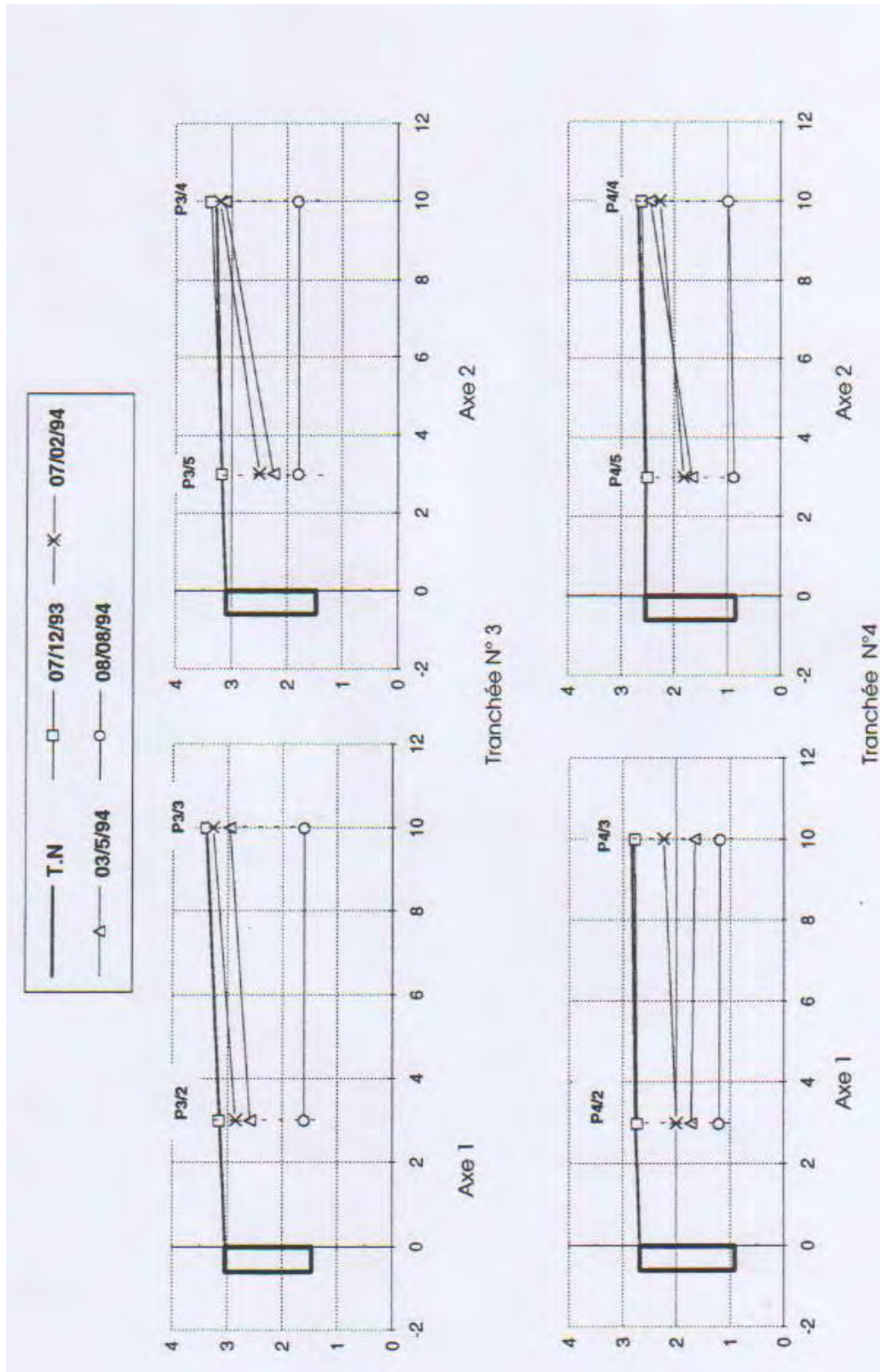


Figure I.13 : Niveaux piézométriques à l'amont des tranchées 3 et 4, d'après FARKOUH B. (1994)

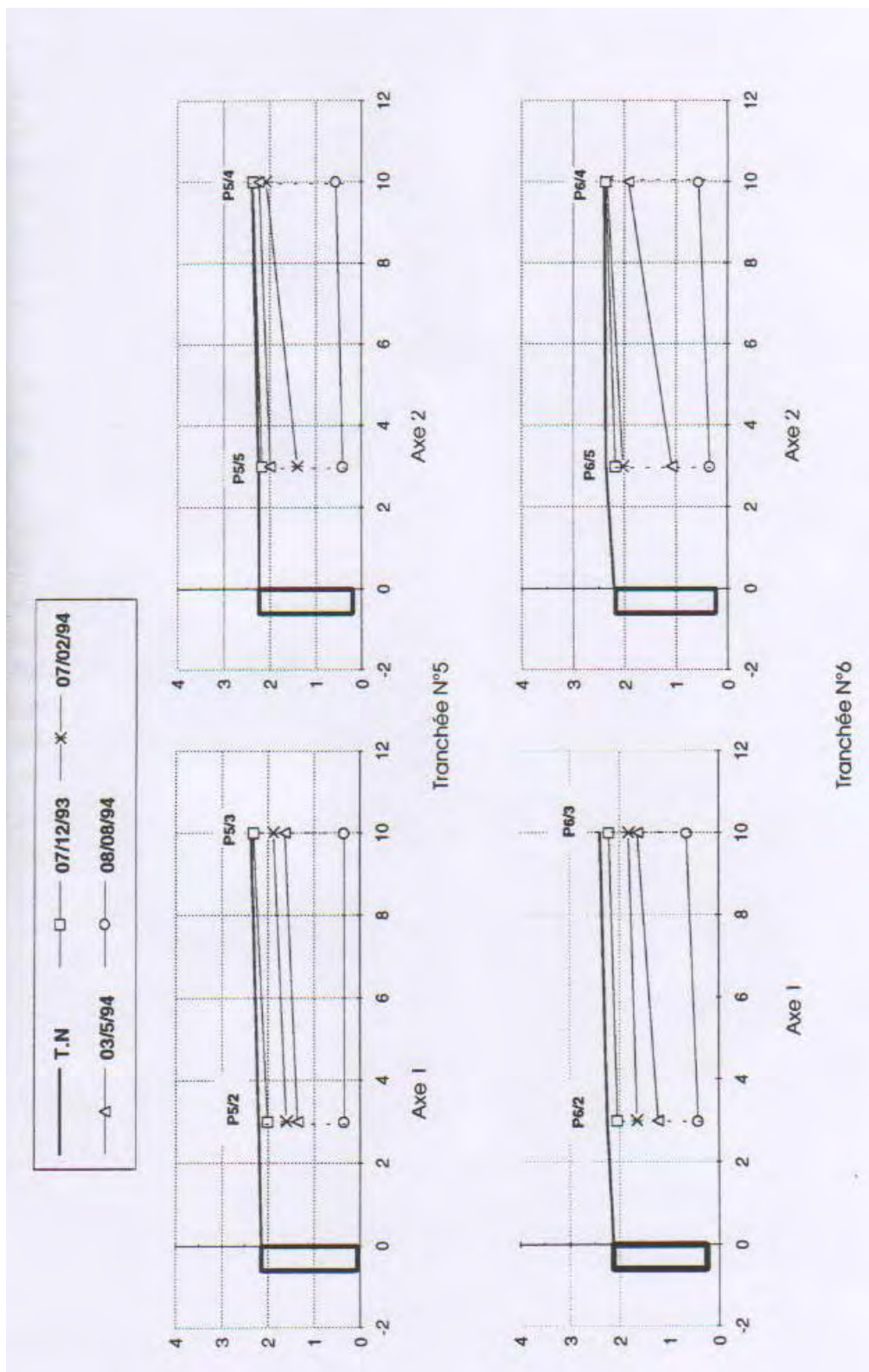


Figure 1.14 : Niveaux piézométriques à l'amont des tranchées 5 et 6, d'après FARKOUH B. (1994)

A l'époque de ces mesures, on peut remarquer une diminution de la charge d'eau quand on se rapproche de la tranchée, ce qui est normal puisque le principe de la tranchée drainante est de récupérer l'eau du terrain pour l'évacuer du sol, ce qui implique bien une perte de charge. On peut signaler que pour la tranchée 2, dans le relevé du 08/08/1994 (plus bas relevé), sur l'axe 2, la charge ne diminue pas. Ce phénomène n'est pas étonnant puisque le niveau d'eau est très bas, à la limite basse de la tranchée. La nappe est donc hors influence de la tranchée et n'est plus drainée, car trop basse.

Enfin, sur les graphiques présentés, on n'observe pas les niveaux des piézomètres Pn/1, c'est-à-dire des piézomètres situés à l'aval des tranchées. On peut tout de même dire que dans tous les cas, la charge a très fortement chuté, et pour la tranchée 3, et donc le piézomètre P3/1, la charge est toujours très basse et ne fluctue pratiquement pas.

Les piézomètres posent un problème d'interprétation à proximité des tranchées. C'est pour cela que des tensiomètres ont été installés.

I.2.d Les tensiomètres

Cinq tensiomètres au mercure ont été installés à la création du dispositif au niveau des tranchées pour approcher au mieux la hauteur de suintement. Un tensiomètre est composé d'une bougie poreuse en contact avec le sol, relié à un réservoir à mercure.

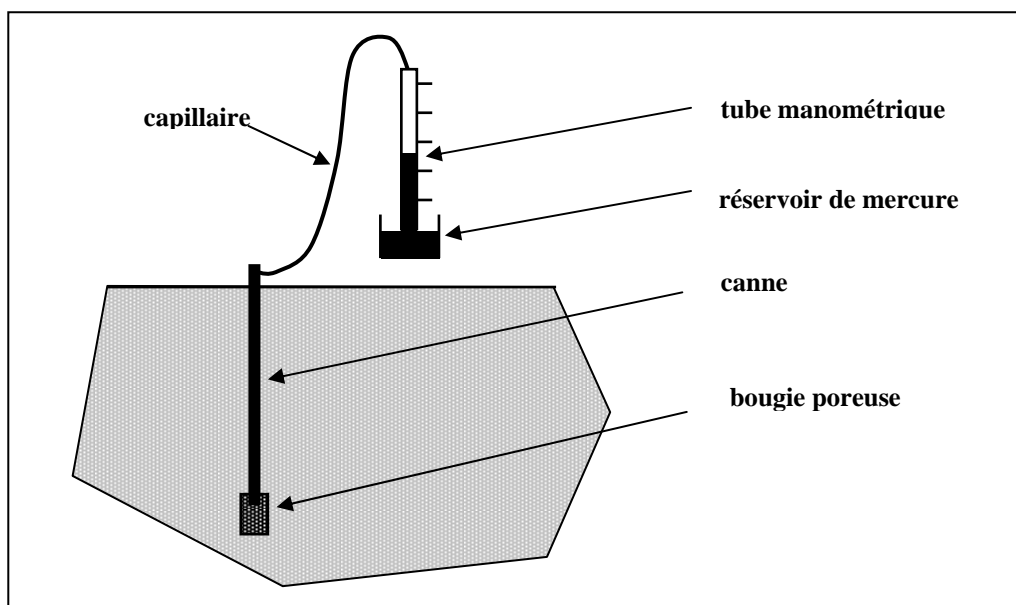


Figure I.15 : Schéma de principe d'un tensiomètre, d'après VAGNER P. (1999)

On peut ainsi mesurer la pression interstitielle via la remonté de mercure. Plus le sol est sec, plus la succion et donc la remonté de mercure sont importantes.

Néanmoins, l'interprétation est délicate puisque normalement, la pression doit s'annuler une seule fois (au passage de la zone saturée à non saturée). Mais parfois la pression s'annule deux fois.

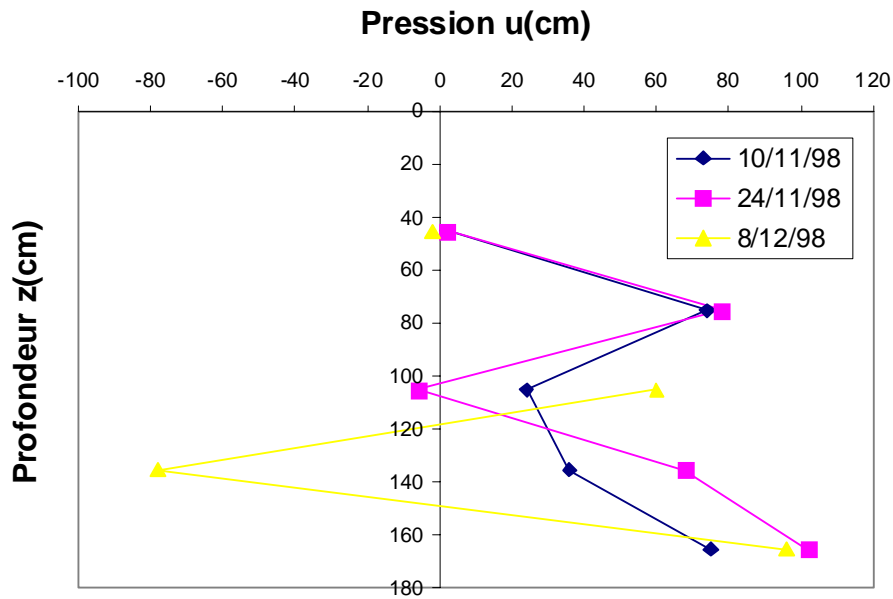


Figure I.16 : Exemple de profil de succion – tranchée 4, d'après VAGNER P. (1999)

On peut être surpris de ne pas avoir une réponse rectiligne du tensiomètre, mais des résultats en lignes brisées. En effet, cela signifie que le terrain n'est pas constitué d'une zone saturée en profondeur et d'une zone non saturée plus proche de la surface. On aurait donc une alternance de zones saturées et non saturées. L'explication se trouve dans la géologie de surface du site qui comporte, du haut vers le bas, une couche de couverture de terre végétale sur environ 50 cm, une couche d'argile remaniée sur environ 40 cm, et enfin le substratum d'argiles litées.

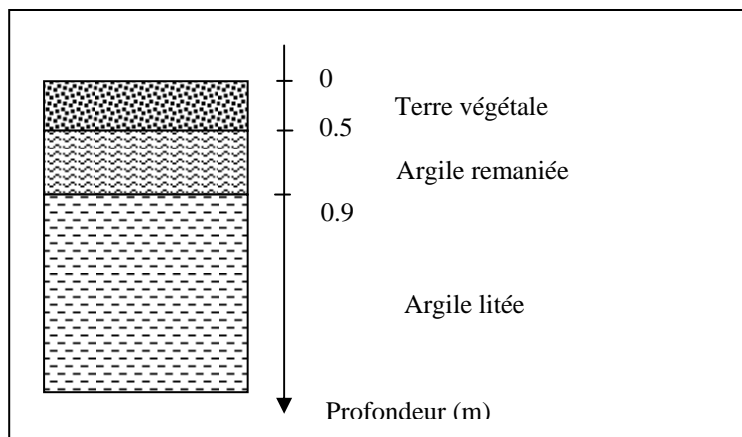


Figure I.17 : Coupe géologique type du site, d'après VAGNER (1999)

Les argiles litées du Trièves sont caractérisées par une forte anisotropie de perméabilité: la perméabilité verticale est bien plus faible que la perméabilité horizontale. La forte anisotropie du sol explique donc la forme complexe de la réponse des tensiomètres.

I.2.e Les débits

Au cours de cette étude, les débits de chaque tranchée ont été mesurés régulièrement, environ une fois par mois sur la période de septembre 1993 à juillet 1999. Pour cela, on mesure au chronomètre le temps nécessaire pour remplir un récipient de volume donné (généralement, ce volume était de 2 litres), on en déduit ensuite le débit de la tranchée. Ces données sont intéressantes puisque un éventuel colmatage se caractériserait notamment par une baisse de la capacité drainante des tranchées, et donc de leur débit à charge constante. Bien évidemment, la mesure seule des débits n'est pas suffisante pour en déduire un colmatage : il faut l'associer à la pluviométrie, puisque s'il y a moins d'eau dans le terrain, il est normal que le débit diminue.

Si on revient au pas entre les mesures, un problème se pose tout de suite : une fois par mois est un écart important entre deux mesures. A l'époque, un suivi journalier n'était pas possible, puisque le site se trouvait à une heure environ du laboratoire, et la mise en place d'un système de mesures automatiques n'était pas possible (la place dans les regards était restreinte, et le terrain ne disposait pas d'accès à l'électricité).

Sur les 5 années de mesures, on obtient les résultats suivants (afin de pouvoir comparer les débits entre eux, toutes les tranchées sont représentées sur le même graphique, en annexes 7 à 11 figure chaque tranchée séparément).

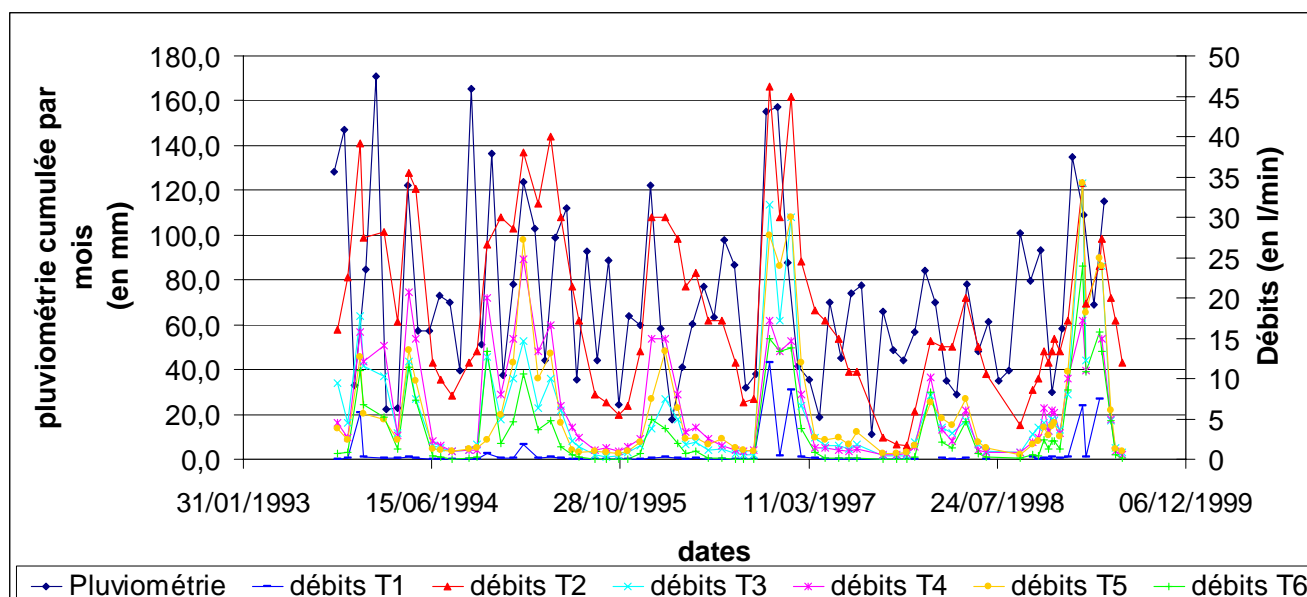


Figure I.18: Comparaison des débits des tranchées

Ce graphique nous montre que la tranchée 1 ne débite presque pas en comparaison des autres : la raison est que les conditions hydrauliques de la tranchée sont différentes. En effet, le terrain amont de cette tranchée est nettement plus sec. Cela pose un problème puisqu'elle devait servir de tranchée témoin (tranchée sans géotextile). La tranchée 2, quant à elle, est celle qui débite le plus : elle n'est pourvue que d'un géotextile posé horizontalement entre la terre végétale et la grave, elle nous servira donc de tranchée témoin.

La deuxième chose que l'on peut remarquer, est que les débits n'augmentent pas directement avec l'augmentation de la pluviométrie, il semblerait que le fonctionnement des tranchées soit plutôt bimodale, à savoir un régime été et un régime hiver. Le terrain jouerait alors un rôle régulateur, ce qui paraît logique puisqu'il est composé d'argile, peu perméable.

I.2.f Le sol collecté

Enfin, les tranchées sont équipées d'un dernier système de mesure, qui permet de connaître la quantité de sol transportée par les eaux drainées ainsi que la granulométrie de ces matériaux fins. Cet équipement rudimentaire est composé de deux bacs placés à l'exutoire de chaque drain. Le premier bac est complètement étanche et sert à décanter les plus grosses particules. Un système de passerelle étanche le relie au second, qui lui, sert à filtrer les matériaux transportés en suspension. Ce dernier est un bac percé qui laisse passer l'eau, alors qu'un géotextile placé à l'intérieur bloque le sol transporté. (Voir schéma de principe et photo).

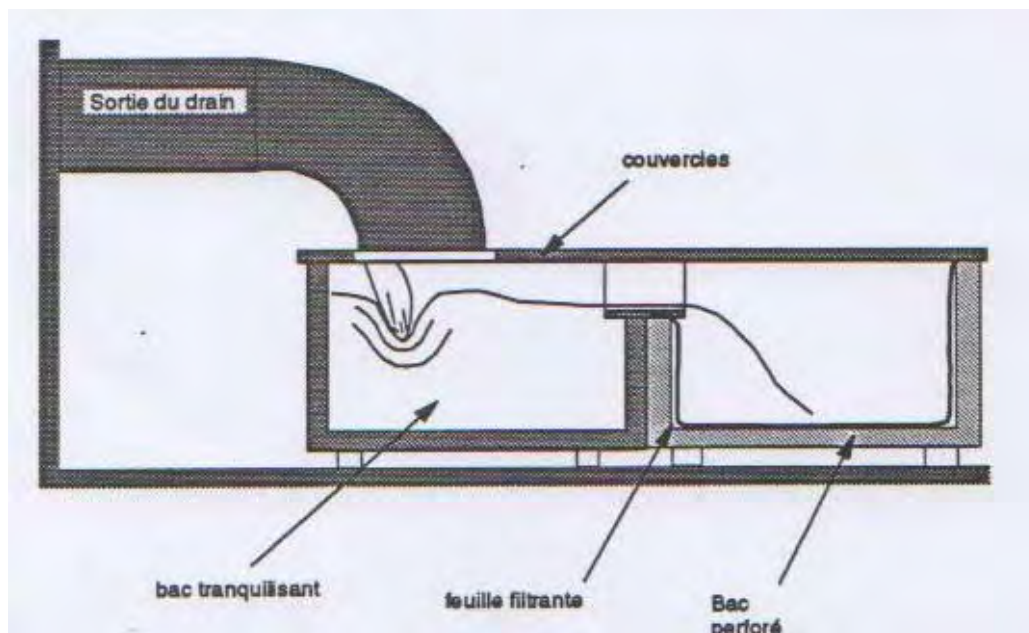


Figure I.19 : Schéma de principe du système de récupération du sol transporté, d'après FARKOUH B. (1992)



Figure I.20 : Photographie du dispositif de récupération du sol transporté

Le géotextile utilisé fait partie des géotextiles les moins ouverts (l'ouverture de filtration $Of \approx 100 \mu\text{m}$). Il est à noter que le système de collecte n'est pas parfait, puisque pour collecter toutes les particules de sol transporté, le géotextile doit tout d'abord se colmater, ce qui nécessite un laps de temps pendant lequel les particules les plus fines le traverse. De plus, il arrive que lors de forts débits, l'eau déborde, car le bac perforé ne laisse pas passer l'eau assez rapidement. A ces moments là, on perd donc une grande partie des particules.

Malgré ces défauts, les filtres étaient changés une fois tous les deux mois. Une fois les filtres prélevés, ils étaient lavés, puis on déterminait la courbe granulométrique du sol récupéré. Cette courbe était obtenue par granulomètre laser. Cet appareil utilise le principe de variation de l'angle de diffraction en fonction de la taille des particules. Entre 1993 et 1999, le granulomètre laser pouvait être utilisé avec deux bancs optiques (deux lentilles), un de 1000 mm dont le domaine de mesure était $5 \mu\text{m}$ à 2mm , et l'autre de 300 mm dont la gamme de mesure était $1 \mu\text{m}$ à $600 \mu\text{m}$. Une erreur de choix de lentille rend quelques mesures de l'époque inutilisables.

On a obtenu les résultats suivants :

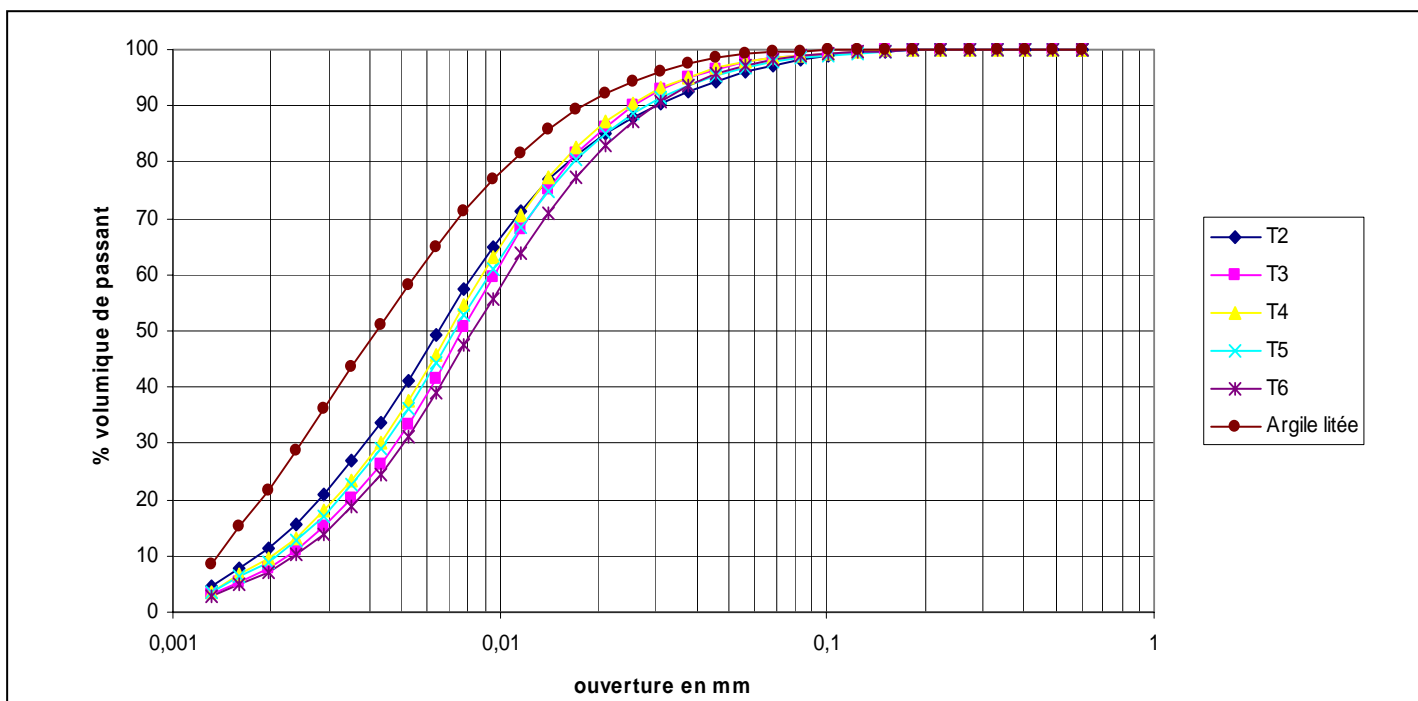


Figure I.21 : Courbe granulométrique de mars 1999, d'après VAGNER P. (1999)

On peut remarquer que la granulométrie des différentes tranchées est équivalente. Le deuxième point à relever est la différence entre la granulométrie de l'argile litée et du sol qu'on collecte. Cette différence est peut-être due au sac géotextile qui laisse passer une partie des fines. On peut également signaler que bien que le sac ait une $Of = 100 \mu\text{m}$, il est capable de bloquer des particules bien plus fines.

On a également les masses de sol collectées :

N° de la tranchée	Masse de sol en g/j	Concentration en g/m^3
2	2,5	0,14
3	1	0,25
4	3,1	0,74
5	3,6	0,72
6	1,8	2,15

I.2.g Bilan (1993-1999)

Globalement on peut dire que les tranchées jouent leur rôle, puisqu'on observe un rabattement de la nappe quand on se rapproche des tranchées. La tranchée 2 est celle qui a le débit le plus élevé, et cela quelle que soit l'époque de l'année. Son transport solide est le plus faible ($0,14 \text{ g/m}^3$ d'eau drainée). Pour toutes les tranchées, les piézomètres aval sont nettement plus bas que ceux amont. Les tranchées ne réagissent pas instantanément aux pluies, mais plutôt par saison, ce qui est sûrement dû aux argiles litées du Trièves qui jouent un rôle d'amortisseur. Au vu de ces seules mesures, il est difficile de conclure quant à la meilleure conception de tranchée et/ou à la performance des divers géotextiles mis en oeuvre. En effet, 5 années de fonctionnement, c'est bien peu en comparaison de la durée des ouvrages que protègent ces géotextiles, comme les barrages (qu'on construit souvent pour une durée supérieure à 100 ans). Néanmoins, à la fin de cette phase initiale d'études, la tranchée 2 semble être celle qui réagit le mieux au terrain. En effet, elle montre le débit le plus élevé, et le transport solide le plus faible.

En outre, on peut observer qu'au cours de cette période, une calcification est détectée dans toutes les tranchées.

Enfin, à l'été 1999, le suivi des tranchées s'est arrêté. Il reprendra presque 10 années plus tard.

II LE PROJET DE JUILLET 2008 A DECEMBRE 2009

Après une dizaine d'années sans suivi du site, c'est à l'initiative du Cemagref Aix-en-Provence, et plus particulièrement de l'unité de recherche OHAX (Ouvrages Hydrauliques et Hydrologie), que les mesures ont été relancées en juin 2008. En effet, cette unité de recherche est très intéressée par l'étude des risques de colmatage des filtres géosynthétiques utilisés pour le drainage des barrages et digues en remblai. Au printemps 2008, le site semble fonctionner normalement et tous les drains coulent, en dépit de son absence de suivi et d'entretien depuis 1999.

Dans ce chapitre, on présente la deuxième partie importante du travail réalisé au titre de la phase I du projet DrainAgeing et qui a consisté à remettre le site d'étude en état, pour en poursuivre son suivi, continuer les mesures et l'analyse de leurs résultats, et enfin, rechercher de nouvelles techniques d'investigation pour approcher au mieux les écoulements dans le terrain.

II.1 REMISE EN ETAT DU SITE

II.1.a Les piézomètres

A partir de juin 2008, la Régie ONF-RTM était chargée par le Cemagref de reprendre les mesures des débits, mensuellement. Lors de leurs déplacements, les techniciens de la Régie ONF ont pu marquer des piézomètres visibles qui étaient toujours en place. Ainsi en avril 2009, 8 piézomètres (sur 31) étaient repérés.

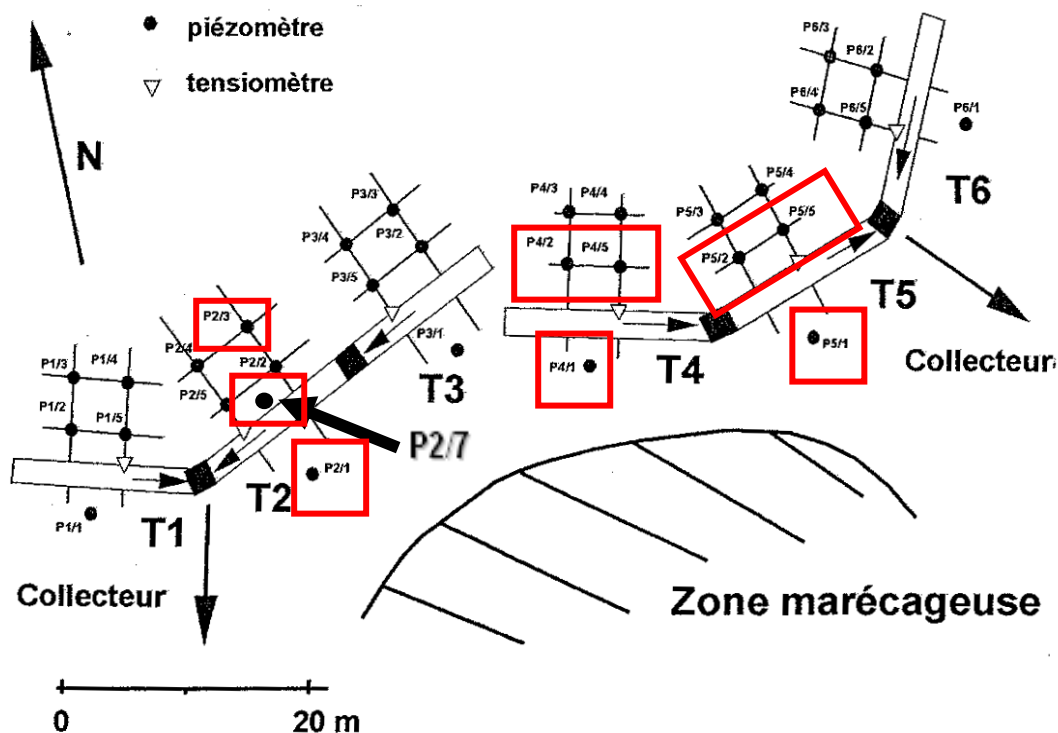


Figure II.1 : Plan de situation des piézomètres visibles avant remise en état du site

Le travail de M. Verstaevel a donc commencé par la recherche des piézomètres manquants. Pour cela, il a opté pour une méthode de recherche simple, à savoir : il utilisait au jugé le plan topographique de la figure II.2 et, à l'aide d'une pioche, il creusait jusqu'à trouver le dit piézomètre. Si cette méthode a été efficace au début (il est parvenu à retrouver 3 à 4 piézomètres par visite), elle s'est avérée de moins en moins rapide et nous ne parvenions pas à retrouver les piézomètres P2/5 et P2/4. Il a donc été décidé de faire un nouveau relevé topographique du site, (piézomètres retrouvés et regards des tranchées), et d'utiliser les coordonnées X et Y des deux piézomètres perdus et par itération de rapprocher la cible de ces coordonnées. Cette méthode a parfaitement marché puisqu'après avoir effectué le relevé du terrain, il nous a fallu environ 15 minutes pour retrouver P2/5 et P2/4. Nous disposions alors, à la fin du printemps 2009, du réseau de piézomètres presque au complet.

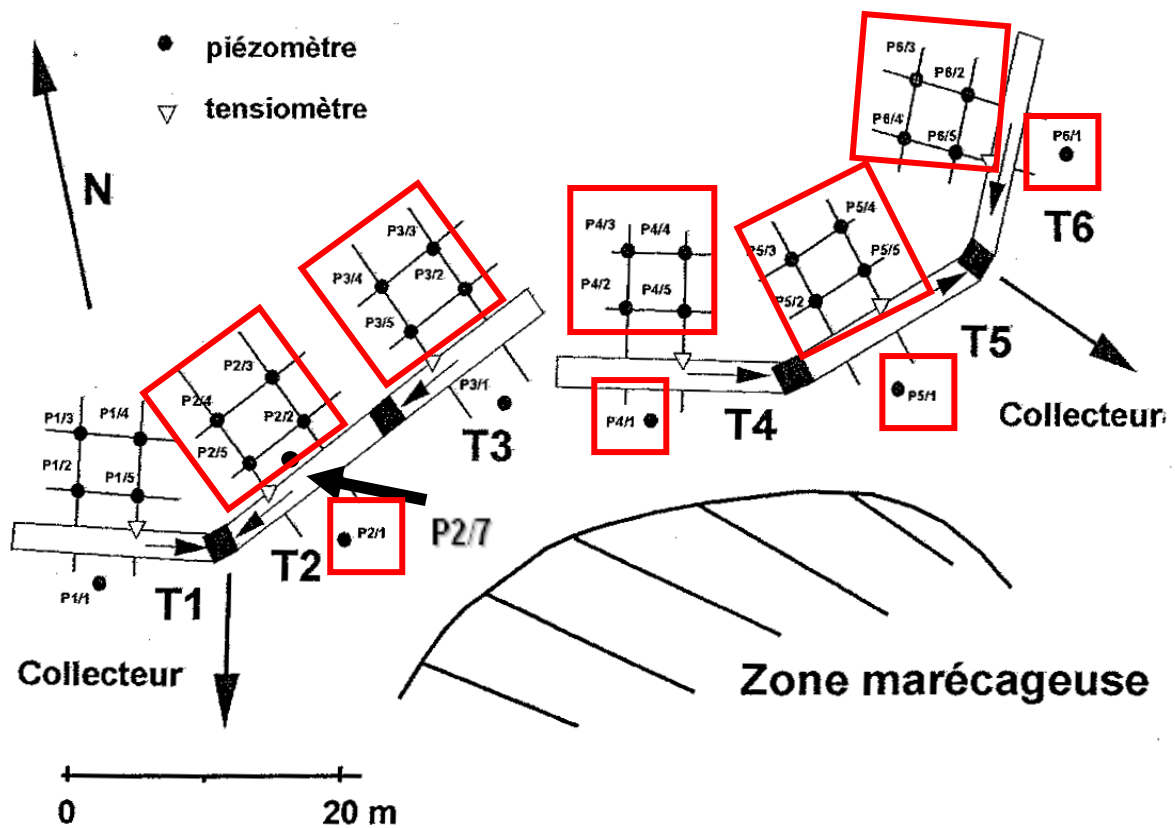


Figure II.2 : Plan de situation des piézomètres à la fin des recherches du printemps 2009

On remarque immédiatement que les piézomètres de la tranchée 1 n'ont pas été retrouvés : en effet, nous avons choisi de ne pas les chercher pour deux raisons majeures. D'abord, la tranchée 1 n'est plus la tranchée témoin du site expérimental car elle débite très peu et les terrains à l'amont et à l'aval sont très secs. Ensuite, elle est située dans la prairie exploitée par le locataire du terrain. Par ailleurs, il manque également le piézomètre P3/1, qui n'a pas été retrouvé car un tas de terre a été placé juste au dessus.

II.1.b Les système de récupération du sol transporté

Les bacs de récupération du sol transporté sont restés dans les regards pendant quelque dix ans, sans entretien. Le Cemagref a changé les filtres géotextiles en juillet 2008 et simplement remplacé les bacs. Ces derniers semblaient continuer de remplir leur rôle. En réalité, on s'est aperçu au printemps 2009 que l'eau avait énormément de mal à s'écouler et cela quand bien même on changeait les géotextiles. Après leur examen plus minutieux, il a été constaté que les bacs étaient en mauvais état. Tout d'abord, la plupart des ponts de passage entre deux bacs étaient cassés et tous fuyaient. Ils ont donc été tous ramenés au laboratoire pour les remettre en état et là on a constaté que les seconds bacs filtrants, qui doivent laisser passer l'eau, étaient complètement calcifiés et que l'eau avait du mal à s'écouler.



Figure II.3 : Photographie des bacs de filtration calcifiés

Après une semaine de travaux de nettoyage et de réparation, tous les bacs ont été remis en place le 19 juin 2009. Le système s'est remis à fonctionner normalement et l'eau pouvait s'écouler plus facilement.



Figure II.4 : Photographie du système de récupération du sol transporté après réparation

II.2 LES DONNEES RECOLTEES

Parallèlement à la remise en état du site, les mesures (piézométrie, jaugeage des débits) et leur analyse ont été poursuivies. De plus, nous avons réalisé un relevé topographique et fait procéder à une inspection télévisée des collecteurs drainants de fond de tranchée.

II.2.a Levé topographique

Le 5 juin 2009, avec l'aide d'un second stagiaire (Max Bonniot, en deuxième année de l'IUT génie civil de Grenoble), un relevé topographique du site a été effectué avec la station totale SOKKIA SET.6 de l'IUT et a permis notamment de corriger le plan topographique d'origine, qui comportait des erreurs.



Figure II.5 : Photographie de la station totale SOKKIA SET.6

Ensuite, les données topographiques ont été transférées sur PC, sous *Autocad*. Un plan topographique rénové est donc maintenant disponible (cf. en annexe 12 du présent rapport, au format A3).

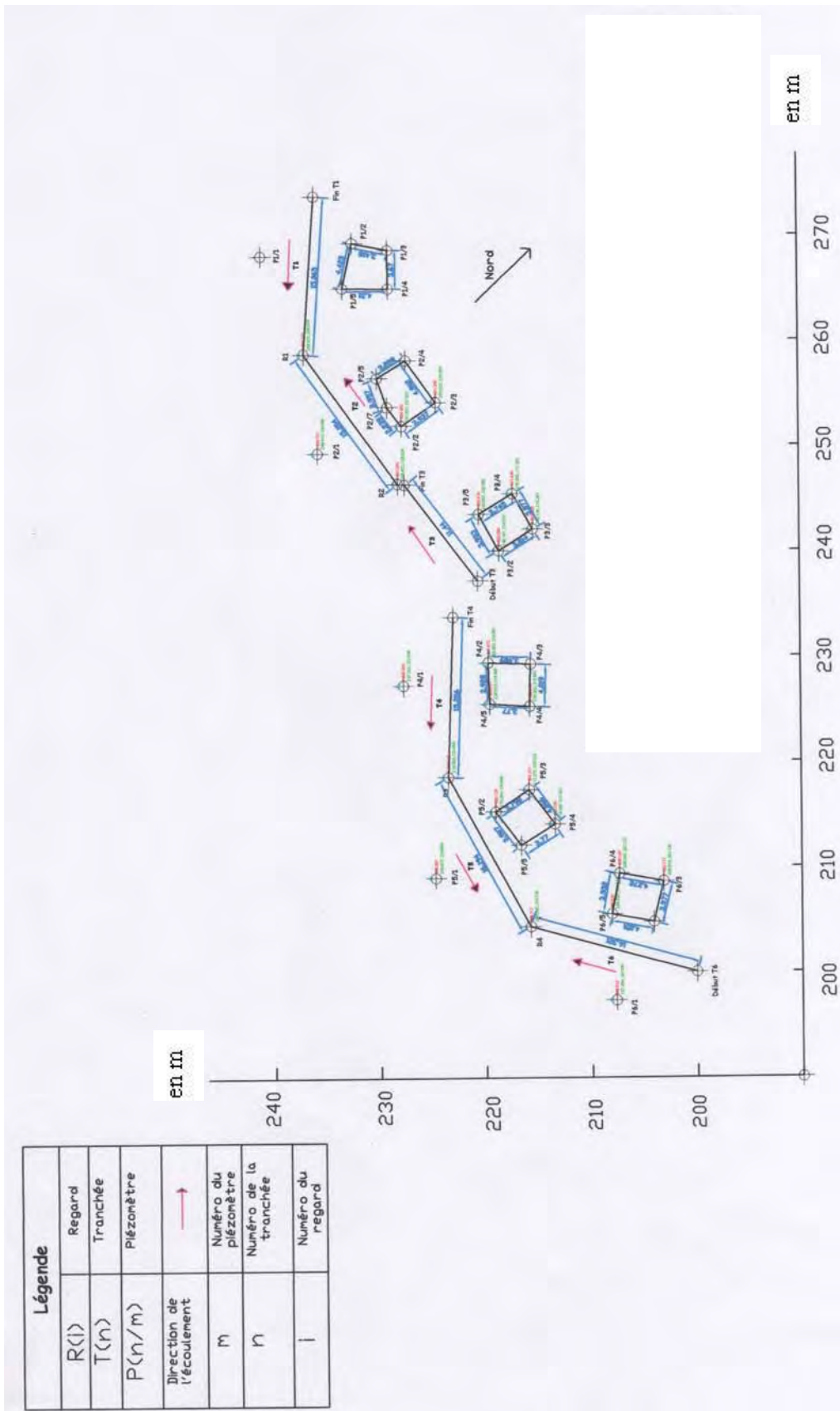


Figure II.6 : Plan topographique du site d'étude

II.2.b La piézométrie

Après remise en état (seules quelques têtes ont dû être changées), notre réseau piézométrique est donc composé de 25 piézomètres fonctionnels (sur 31 à l'origine). Depuis mai 2009, un relevé est effectué à chaque visite hebdomadaire.

Après rattachement des nouvelles mesures piézométriques à la même référence que celle de la première période d'étude (1993-1999), à savoir le fond du regard R4, on obtient les figures suivantes des résultats des relevés piézométriques de la période mai à août 2009, pour les tranchées 2 à 6.

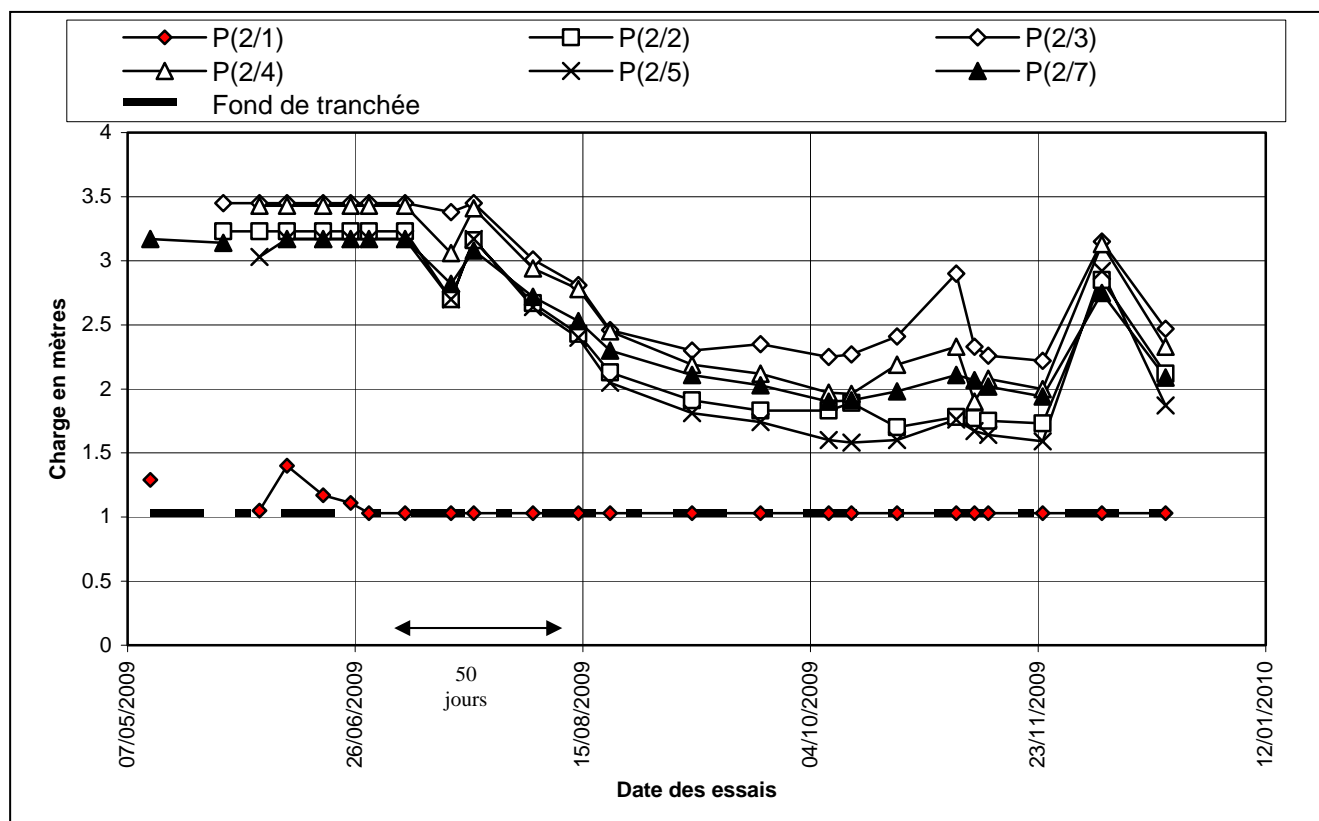


Figure II.7 : Relevé piézométrique de la tranchée 2

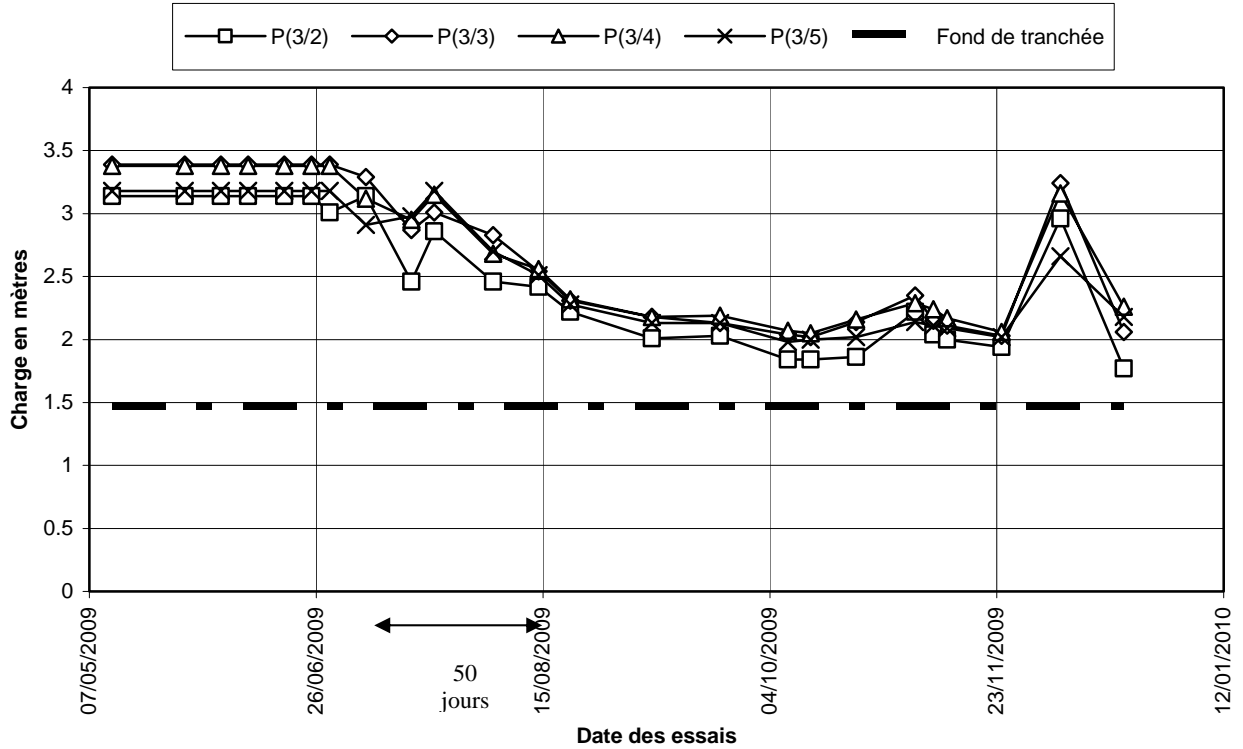


Figure II.8 : Relevé piézométrique de la tranchée 3

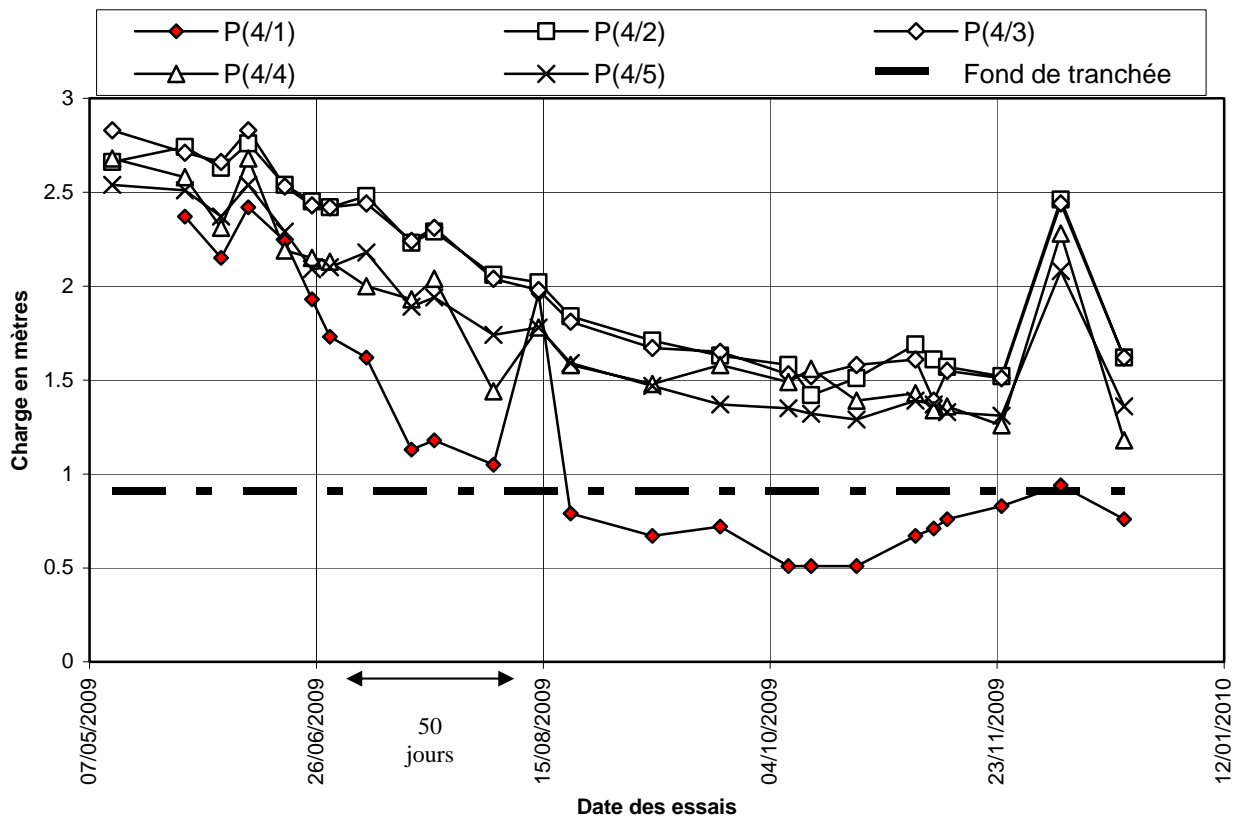


Figure II.9 : Relevé piézométrique de la tranchée 4

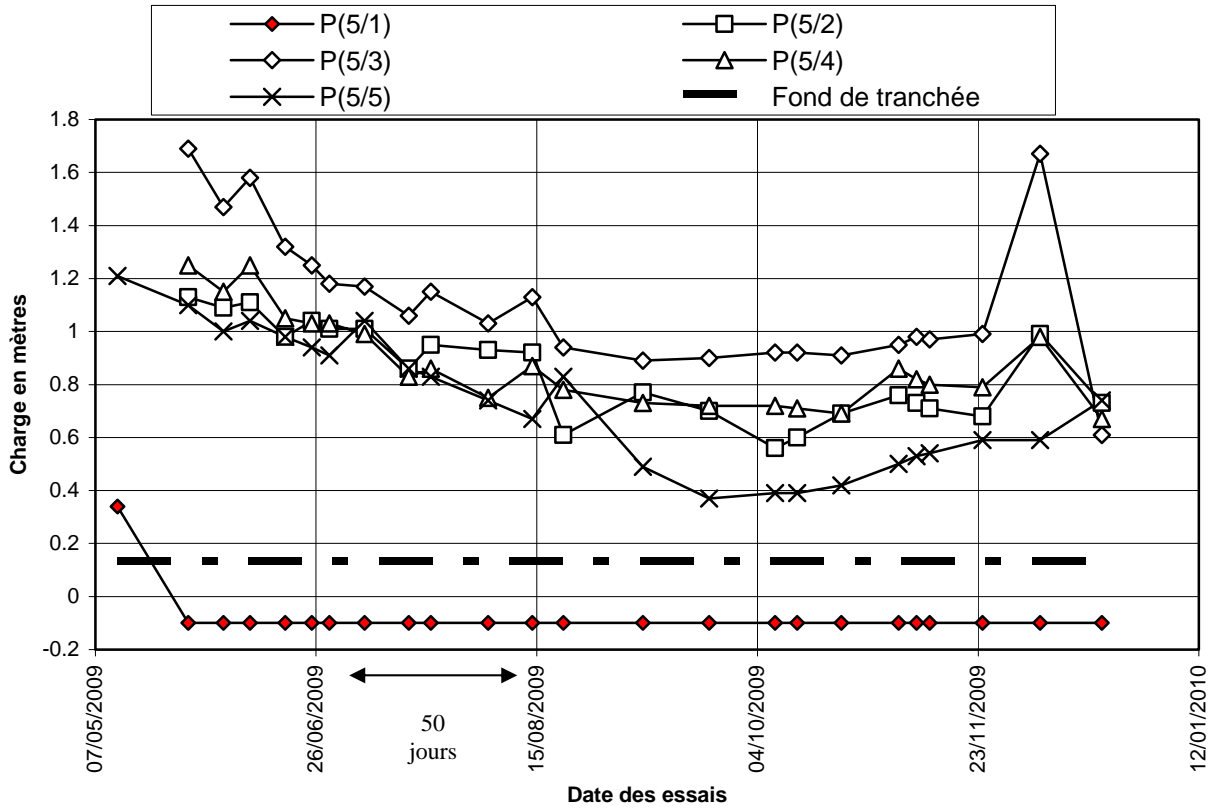


Figure II.10 : Relevé piézométrique de la tranchée 5

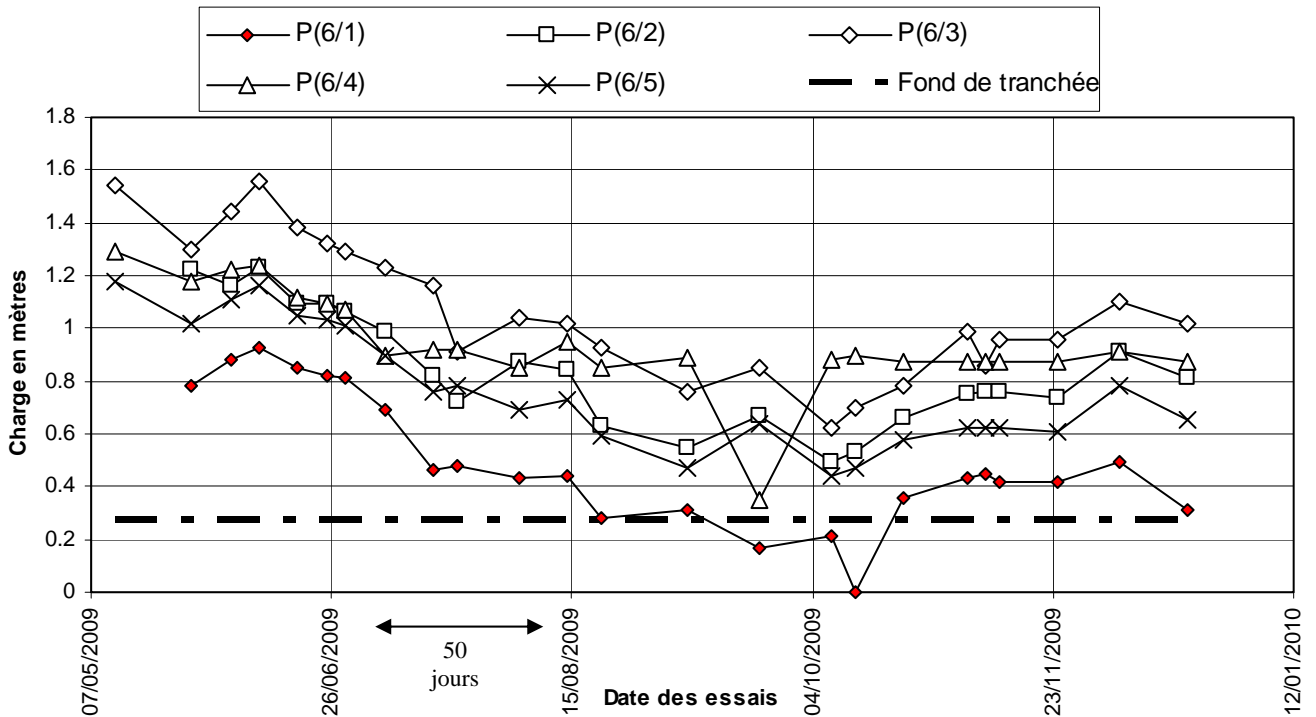


Figure II.11 : Relevé piézométrique de la tranchée 6

On observe que les piézomètres aval ont une charge bien plus basse que les piézomètres amont. Globalement du côté amont, plus on se rapproche de la tranchée plus la charge est basse, ce qui confirme le bon fonctionnement des tranchées. Toutefois, on ne dispose pas du piézomètre aval de la tranchée 3, ce qui est assez gênant pour pouvoir comparer les tranchées entre elles. Mais lorsqu'on est sur le terrain au niveau de la zone amont, on remarque que jusqu'au 29 juin 2009 la charge vaut 3,4 mètres, ce qui correspond à un niveau piézométrique à 0 mètre (TN). En effet jusqu'à cette date, le terrain en amont des tranchées 2 et 3 est marécageux (ce qui n'était pas le cas entre 1993 et 1999). En revanche, quand on enjambe la tranchée, le terrain à l'aval est nettement plus sec. On constate donc in-situ que la tranchée 3 occasionne un réel rabattement de la nappe.

II.2.c Les débits

Lors des visites hebdomadaires du site expérimental, de mai à décembre 2009, les mesures de débits ont été effectuées, avec, une fois par mois, l'aide d'un technicien de la Régie ONF-RTM. Nous avons gardé le même mode opératoire que celui utilisé entre 1993 et 1999, à savoir mesurer le temps nécessaire pour remplir un récipient de volume connu (mesure par empotement). Nous avons également collecté auprès de Météo-France les relevés pluviométriques de la station pluviométrique de Roissard, nécessaires pour la comparaison entre la période de 1993 à 1999 et juin 2008 à novembre 2009

On obtient les résultats suivants (les graphiques de chaque tranchée sont en annexe 13 à 24) :

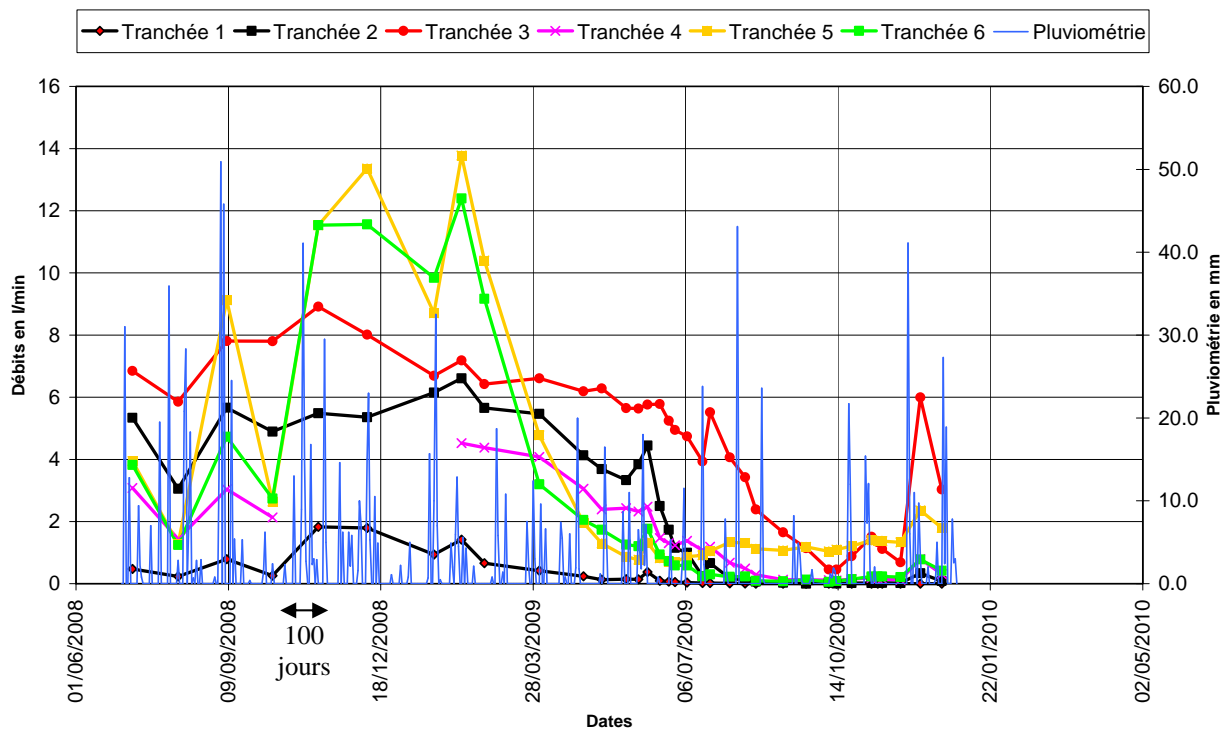


Figure II.12 : Débits des tranchées de juillet 2008 à décembre 2009 et pluviométrie journalière

Etant donné que les mesures de débits sont hebdomadaires, il semble aussi judicieux de les comparer avec la pluviométrie cumulée sur une semaine avant la mesure, ce que montre la figure suivante.

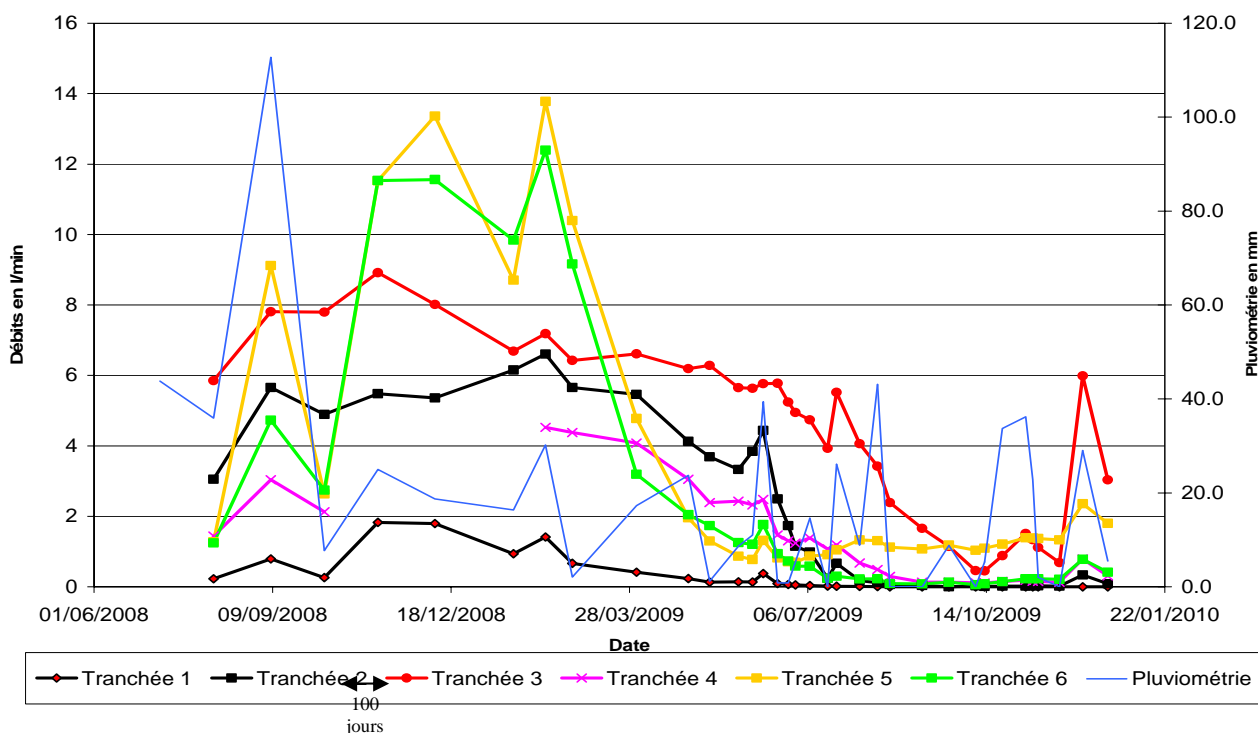


Figure II.13 : Débits des tranchées de juillet 2008 à décembre 2009 et pluviométrie cumulée sur une semaine avant la mesure

On peut remarquer que la tranchée 3 débite plus que les autres, sauf pour 5 mesures, qui correspondent avec une impossibilité de mesure du débit de la tranchée 4. En effet, à cette période le regard 3 était rempli d'eau sur 30 à 50 centimètres, ce qui empêché de mesurer le débit de la tranchée 4.

En ce qui concerne les pics des tranchées 5 et 6 de l'hiver 2008-2009, nous n'avons pas à ce jour d'explication satisfaisante ; n'ayant pas les relevés piézométriques de cette période, on ne sait pas si le terrain était particulièrement gorgé d'eau. On peut tout de même signaler que cela correspond au moment où la le regard 3 (celui dans lequel débouche la tranchée 4) était rempli d'eau. Il sera intéressant de voir si ce comportement apparemment singulier des tranchées 5 et 6 se reproduit lors de l'hiver 2009-2010. On remarque également que la tranchée 5 est restée stable à la fin de l'été 2009, surpassant même légèrement la tranchée 3

II.2.d Le sol transporté

Les géotextiles des bacs de filtration ont été changés par le Cemagref en juillet 2008, après quelque 10 ans de fonctionnement. Ensuite, ils ont été changés en juin 2009 après 14 mois de fonctionnement.

Puis ils ont été changés une fois par mois, soit le temps que met actuellement le bac de filtration de la tranchée 3 pour se colmater. Une fois prélevés, il faut sécher les géotextiles et les laver pour récupérer les échantillons de sol. Puis, on procède à l'analyse granulométrique des sols au granulomètre laser *Mastersizer 2000*, équipé avec l'échantillonneur *Hydro 2000G*.

Afin de réaliser en série ces analyses granulométriques et après plusieurs tests exploratoires, un protocole d'essais en voie humide avec l'eau du laboratoire a été retenu.

Il consiste à :

- séparer le sol récupéré dans les géotextiles en trois parties ;
- humidifier chaque partie à une teneur en eau comprise entre la limite de plasticité et de liquidité
- prélever de chaque partie trois échantillons qui sont testés séparément au granulomètre laser avec au minimum trois mesures.

Ce qui donne au minimum 9 courbes granulométriques par sol récupéré de chaque tranchée, qui, au final, sont moyennées pour obtenir la courbe représentative de chaque sol.

Ci-dessous sont présentés les résultats des prélèvements d'août 2009 (vous trouverez en annexes 30 et 31, celles de juin et de juillet 2009)

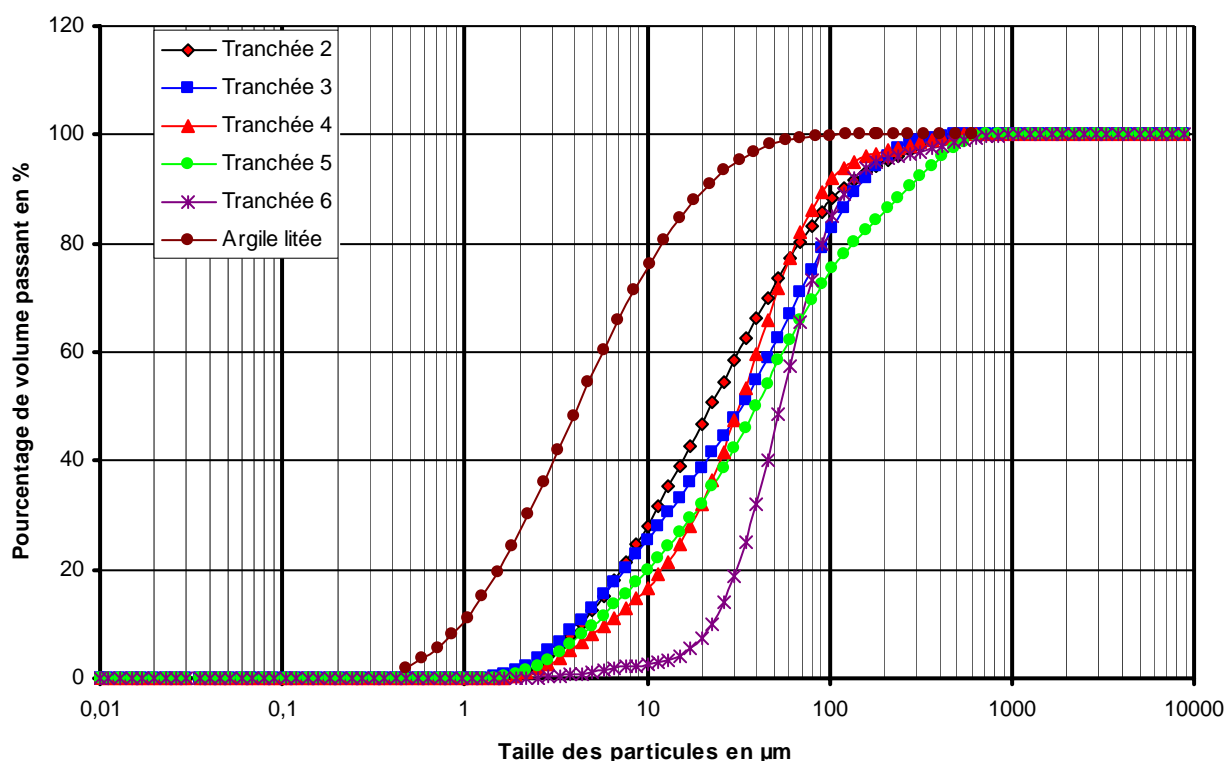


Figure II.14 : Courbe granulométrique du prélèvement d'août 2009

On remarque que, comme pour les analyses de 1999, il y a moins de fines dans le sol collecté que dans l'argile d'origine. De plus, la tranchée 6 se singularise par un sol transporté comportant peu de particules fines inférieures à 10 µm, ce que l'on n'observait pas en 1999.

On va maintenant s'intéresser aux granulométries d'une tranchée sur les Mesures (juin 2009, juillet 2009 et août 2009). Les courbes de toutes les tranchées sont disponibles en annexes 32 à 37. Pour cela j'ai choisi de vous présenter la tranchée 5.

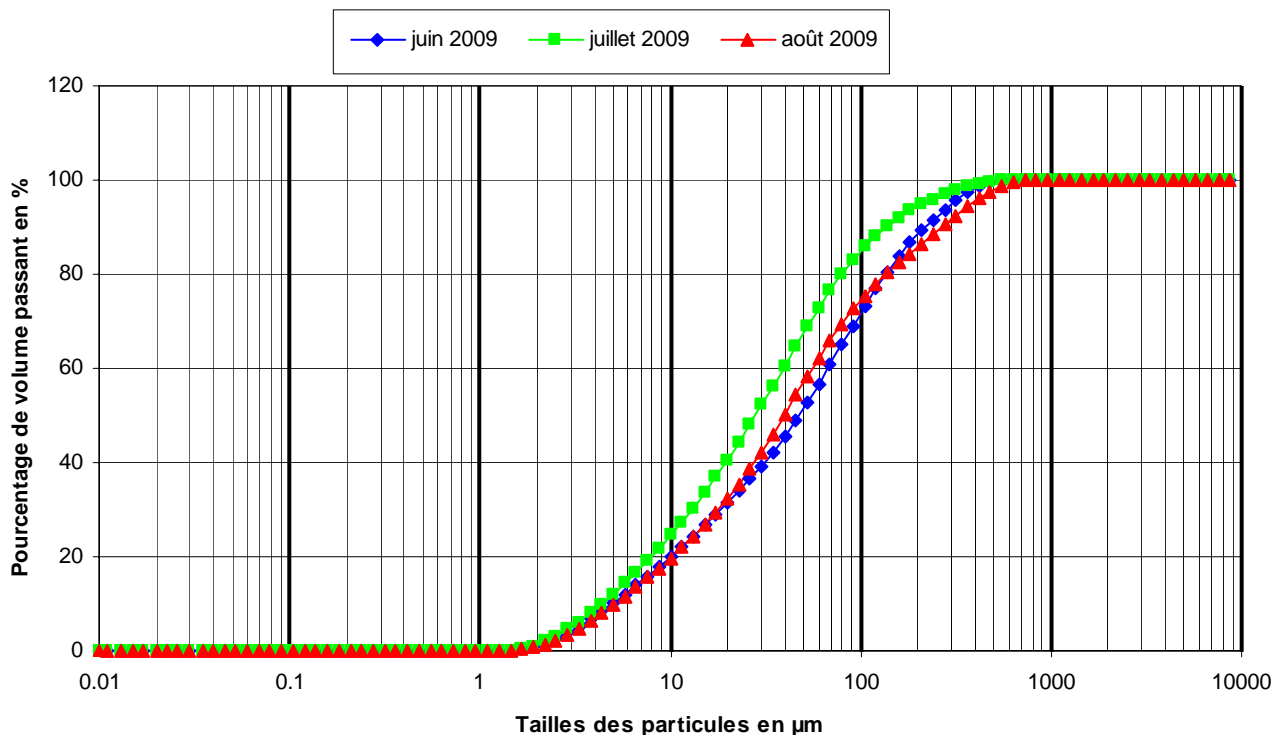


Figure II.15 : Comparaison des courbes granulométriques de la tranchée 5 de 2009

A première vue les courbes granulométriques des trois périodes semblent être assez proches. En effet, après consultation des annexes, on peut remarquer que seules les tranchées 4 et 5 ont des courbes qui sont proches pour les trois mesures. Les différences qu'on observe sont certainement dues aux incertitudes déjà citées dans ce rapport, comme le dépôt dans le collecteur drainant, la perte de matériaux dans le bac de filtration lorsqu'il déborde ou simplement parce que les particules les plus fines peuvent passer à travers le filtre.

On peut tout de même retenir que les échantillons transportés paraissent plus grossiers que l'argile litée d'origine, sous réserve des pertes de particules fines au travers du dispositif de mesure.

C'est pourquoi du fait de ces incertitudes de prélèvement, nous avons décidé de privilégier la mesure des débits, en retirant les systèmes de collecte, les remplaçant par des systèmes de mesures automatiques des débits, décrits dans le dernier paragraphe.

II.2.e L'examen télévisuel

Les financements obtenus au titre de la phase I du projet DrainAgeing nous ont permis de faire réaliser une inspection télévisuelle des collecteurs drainants des tranchées drainantes suivantes :

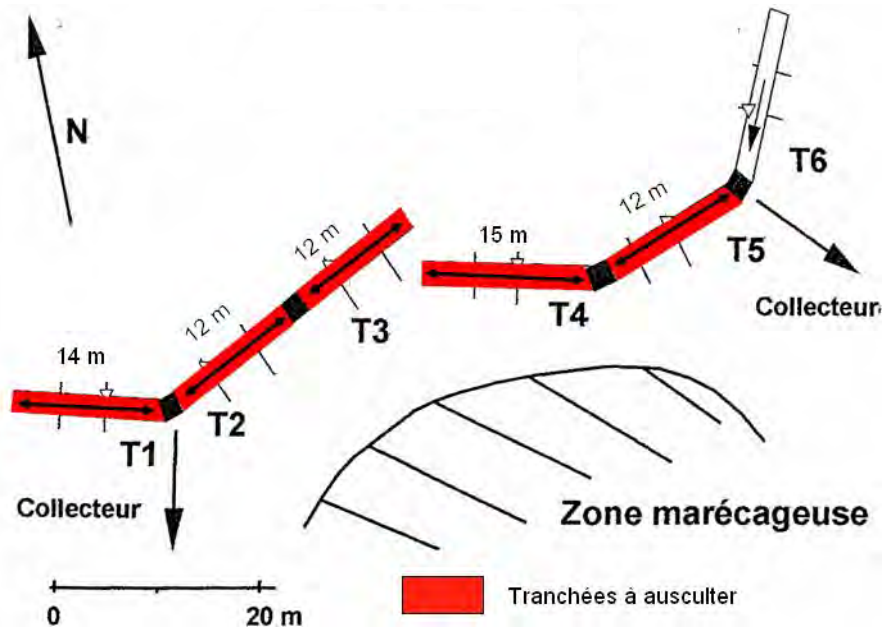
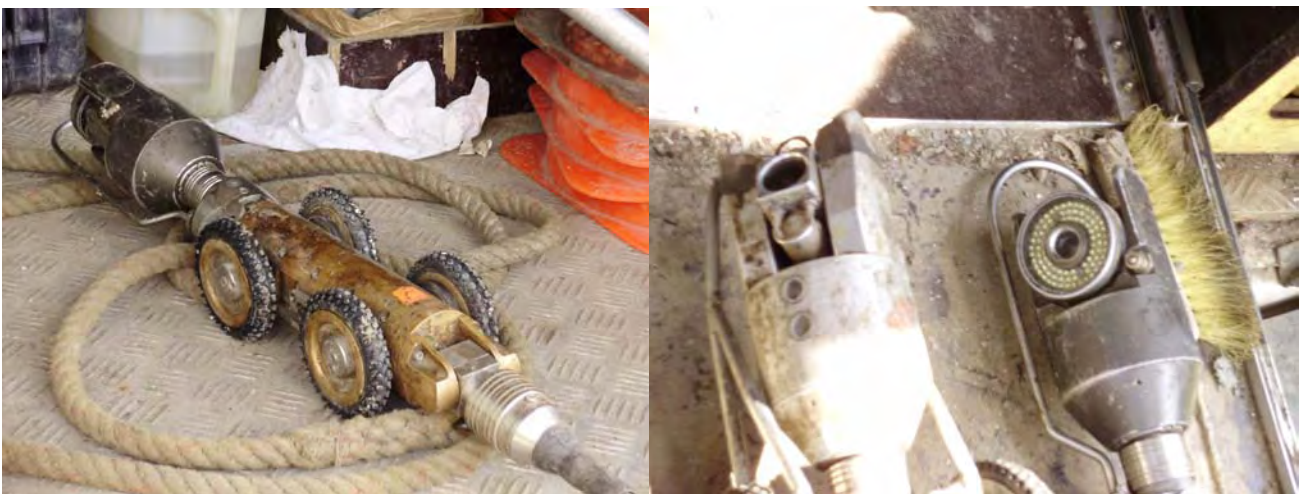


Figure II.16 : Plan des tranchées à ausculter

Le but de la reconnaissance est d'aller au cœur du système de drainage pour observer l'état du collecteur drainant (drain autoroutier) de fond de tranchée, les zones de venue d'eau, de colmatage et les dépôts de sol dans la cunette sans fente. C'est l'entreprise TEDECO (38360 SASSENAGE), spécialisée dans l'auscultation de réseaux urbains, qui a été retenue pour l'intervention, suite à une consultation effectuée par le service RTM Isère. Pour ausculter un collecteur, on y introduit par l'aval, depuis le regard, un petit robot sur roues muni d'une caméra et de diodes pour l'éclairage. Ce robot est piloté de l'intérieur d'un camion, d'où nous pouvons suivre sa progression sur un écran. Ainsi, il est possible de demander en temps réel à l'opérateur de s'arrêter pour zoomer sur un point, ou prendre des photographies. A la suite de cette auscultation qui a eu lieu le 29 juin 2009, l'entreprise a remis un rapport et un DVD du déroulement des opérations.



Figures II.17 : Photographie du robot utilisé pour l'auscultation télévisuelle des drains

Les drains autoroutiers 1, 2, 3 et 4 ont été parcourus sans trop de problème. Globalement, le phénomène le plus remarqué est une calcification des crépines et un dépôt plus ou moins

modéré dans la cunette. Pour la tranchée 1, le dépôt est presque inexistant. Pour la tranchée 5, la progression a été plus difficile puisque le robot n'a pas pu aller jusqu'à l'extrémité du drain. En effet, un dépôt trop important a bloqué le robot au bout de 11 mètres environ. Les deux derniers mètres de ce drain n'ont donc pas été examinés. Pour la tranchée 6, de par sa conception en écran drainant, il est impossible d'y faire entrer un robot. Le robot n'a pu avancer que jusqu'à l'extrémité aval de l'écran HYDRAWAY : on a pu voir que l'intérieur du géocomposite était également touché par le phénomène de calcification.

Etabli en complément du compte rendu sommaire de TEDECO, un rapport beaucoup plus détaillé de l'intervention figure en annexe 25, établi après visionnage minutieux du DVD.



Figure II.18 : Photographie de la calcification des crépines de la tranchée 3

Le chapitre suivant propose une comparaison plus approfondie du comportement des tranchées en intégrant les deux périodes de suivi dont nous disposons, soit 1993-1999 et 2008-2009.

III COMPARAISON DES PERIODES DE SUIVI DU **DISPOSITIF DE TRANCHEES DRAINANTES**

Dans cette partie, on compare les deux principales périodes de suivi du dispositif de Roissard (1993-1999 et 2008-2009) ainsi que les résultats. En effet, il ne faut pas oublier que l'objectif premier de l'étude expérimentale était de savoir si les géotextiles étaient nécessaires ou non pour la protection des tranchées drainantes, et si oui quel géotextile et quel mode de réalisation s'avèrent les plus adaptés. Ce chapitre est divisé en deux parties traitant chacune d'un aspect d'intercomparaison : tout d'abord les périodes d'étude, puis les différentes tranchées du dispositif.

III.1 LES PERIODES D'ETUDE

Avant de pouvoir comparer le comportement des tranchées drainantes, il convient de distinguer les deux périodes de suivi des tranchées, à savoir : 1993 à 1999, et juin 2008 à août 2009.

III.1.a La pluviométrie

Pour comparer la pluviométrie, les sous-périodes suivantes ont été considérées :

- juillet 1994 à août 1995
- juillet 1995 à août 1996
- juillet 1996 à août 1997
- juillet 1997 à août 1998
- juillet 1998 à août 1999
- juillet 2008 à août 2009

Ainsi, on peut comparer chaque année sur un même cycle de saison. On obtient alors le graphique suivant.

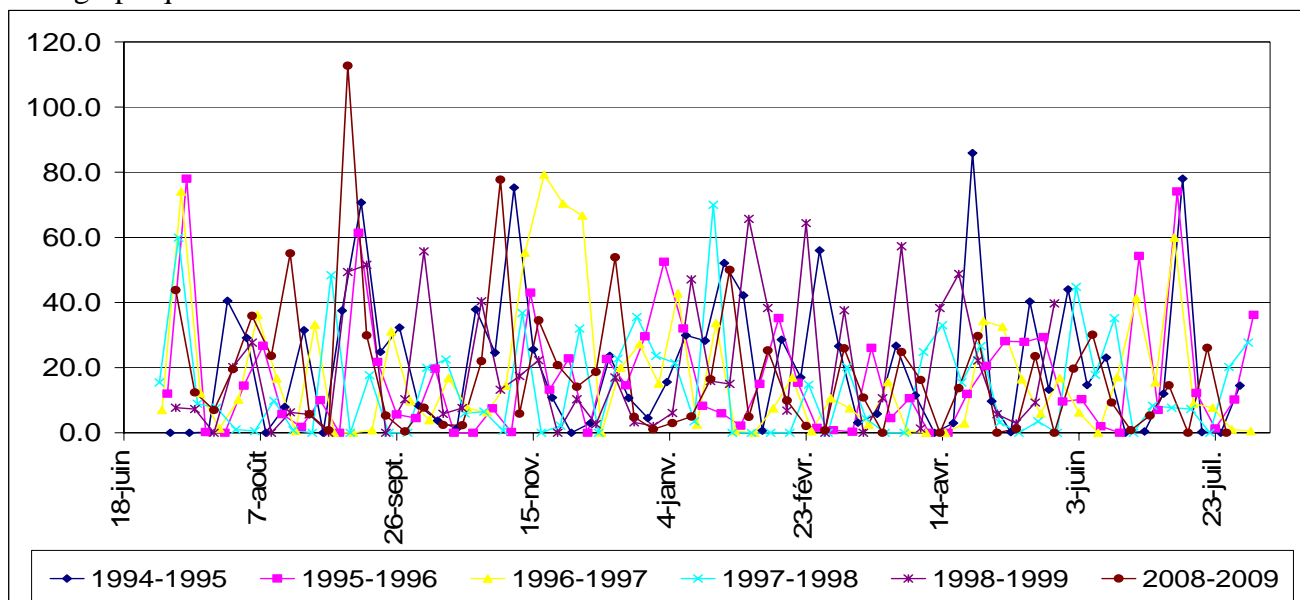


Figure III.1 : Pluviométrie cumulée sur une semaine, pour une même période d'étude selon les années

On note qu'à première vue aucune courbe ne se superpose, et que les années semblent très différentes.

Toutefois, trois années (1994-1995, 1998-1999 et 2008-2009) semblent plus proches, avec des pluviométries du même ordre. On va donc utiliser ces trois périodes pour comparer le comportement des tranchées.

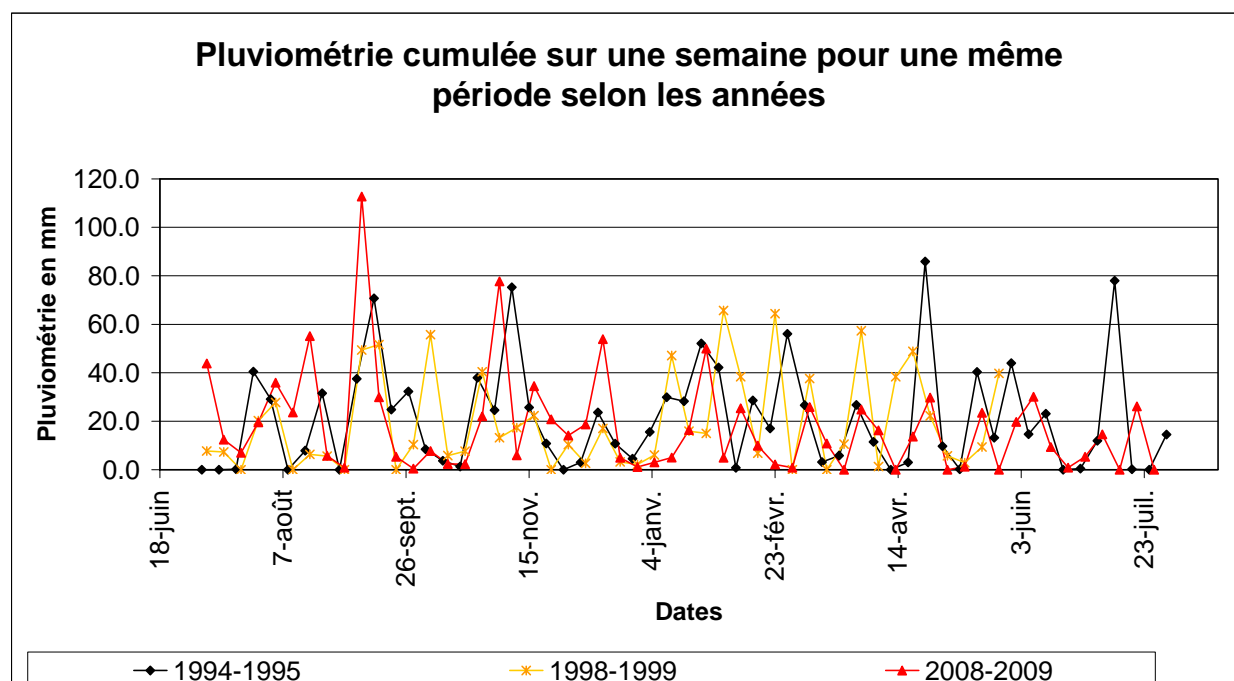


Figure III.2 : Pluviométrie cumulée sur une semaine, pour une même période selon les années.

III.1.b Observations générales sur site

Pour la première période d'étude (1994-1999), il convient de se rapporter aux témoignages de l'exploitant du terrain, Monsieur Faustin BOGNIER, ainsi que des personnes qui ont travaillé sur le projet à cette époque comme Monsieur Henri MORA ou Yves-Henri FAURE. Ils sont tous d'accord pour dire qu'à l'aval des tranchées, le terrain était vraiment marécageux. Or, en avril 2009, le terrain à l'aval des tranchées apparaît comme un petit bois au sol plutôt sec. C'est la première grande différence que l'on constate avec le début du projet : les tranchées drainantes semblent avoir assaini le terrain aval.

En ce qui concerne l'amont des tranchées drainantes, et particulièrement l'amont des tranchées 2 et 3, la nappe était affleurante en avril 2009. Elle n'est descendue que début août. C'est une différence importante puisque sur la première période d'étude entre 1993 et 1994, la nappe était rarement affleurante plus de deux mesures mensuelles consécutives. Nous avons donc essayé de comprendre pourquoi on observait un tel changement. Il semblerait que l'écoulement d'un petit cours d'eau qui passait autour du site expérimental ait été modifié. Aujourd'hui, il divaguait vers les tranchées 2 et 3. Il est difficile de mettre parfaitement en évidence cette modification puisque l'eau s'écoule juste en surface et on n'arrive pas à voir un « nouveau lit ». En effet, ce cours d'eau ne paraît pas couler toute l'année, mais uniquement au printemps pour ce que nous en avons vu et pour ce que nous en a dit l'exploitant.

III.2 LES TRANCHÉES

Dans cette partie, les tranchées sont comparées entre elles. Pour cela, on s'appuie principalement sur deux types de données que nous avons sur les deux périodes d'études, à savoir : les mesures de débits et les relevés piézométriques.

III.2.a Les mesures de débits

Ici, on compare les mesures de débits entre les tranchées. Bien évidemment, il ne faut pas s'attacher à la valeur absolue des débits mesurés puisqu'on a vu dans la partie précédente que selon les années, la quantité d'eau apportée par la pluie variait, de même alors pour les débits. On les compare donc en relatif les unes par rapport aux autres.

Tout d'abord, observons les mesures de débits sur la première période d'étude, de 1993 à 1999.

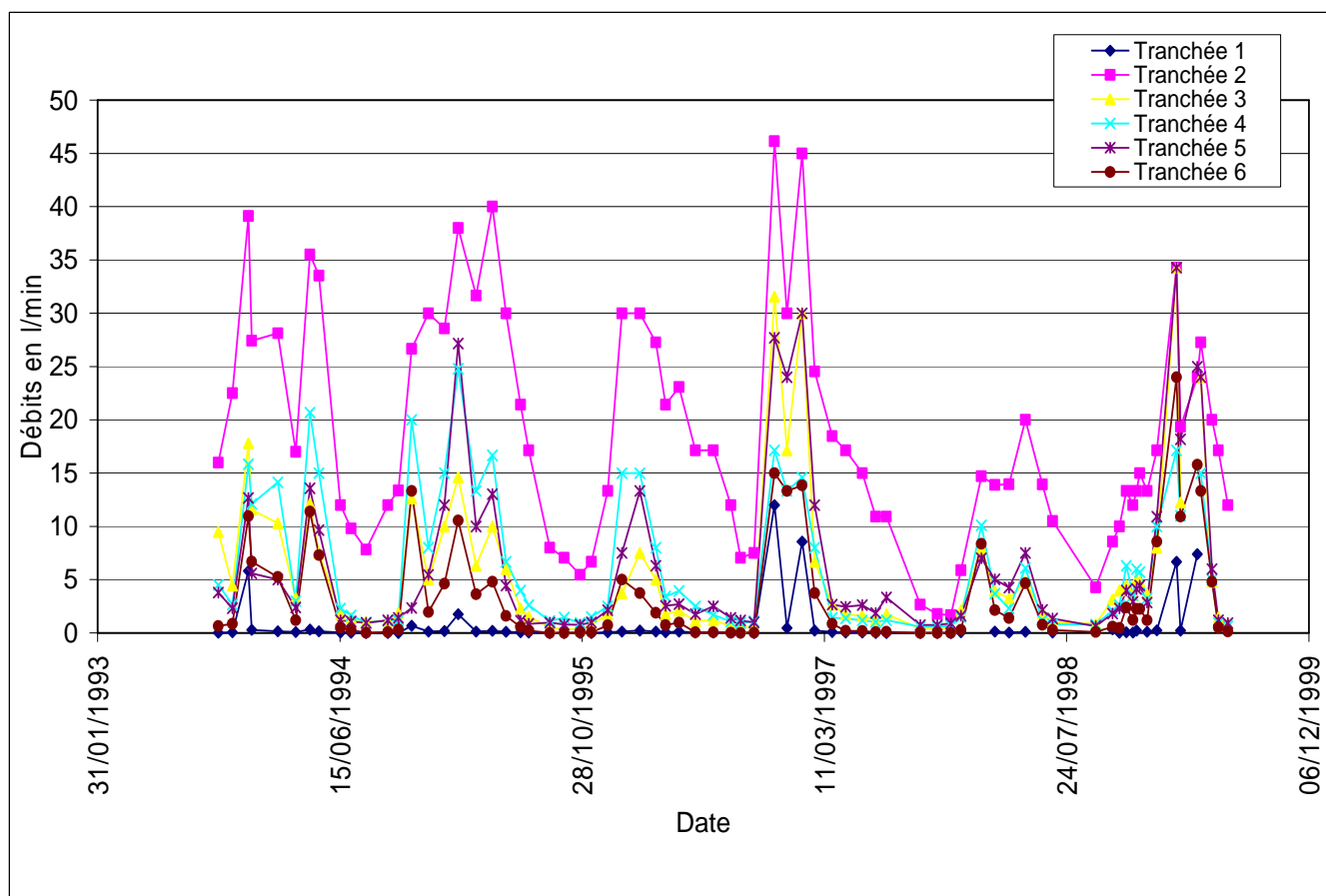


Figure III.3 : Mesures des débits d'octobre 1993 à juin 1999

Sur cette période d'étude, on remarque immédiatement que la tranchée qui débite le plus est la tranchée 2 : pour chaque mesure, c'est elle qui a le débit maximum. Le débit de cette tranchée atteint un maximum de 46 litres par minute le 28 novembre 1996. Ensuite, on remarque que les mesures des débits des tranchées 3, 4, 5 et 6 sont assez proches. La tranchée 1, est celle qui débite le moins et est nettement en dessous des autres.

On va maintenant observer les variations des débits sur la seconde période d'étude, entre juillet 2008 et décembre 2009.

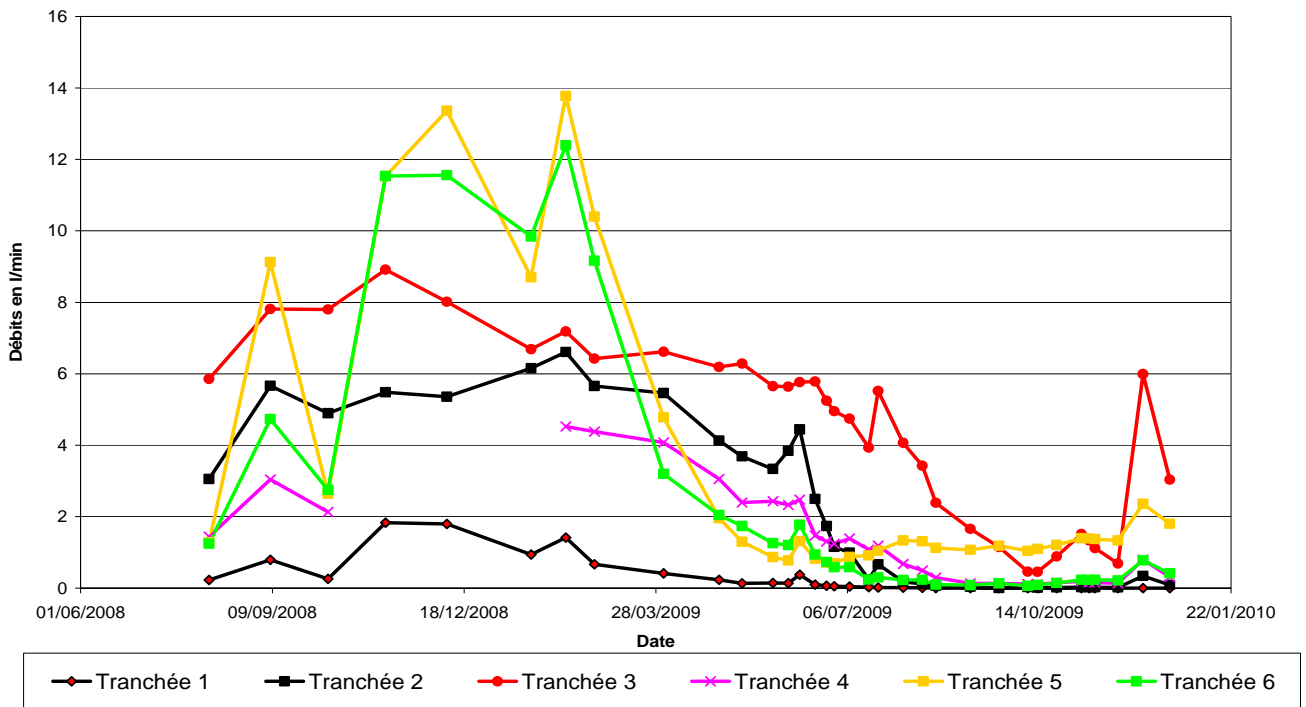


Figure III.4 : Mesures des débits de juillet 2008 à décembre 2009

On remarque ici que la tranchée 2 ne domine plus les autres, et sur cette période, le débit maximum pour cette tranchée est d'environ 6,6 litres par minute (on est loin des 46 litres par minute de 1996).

Sur la période novembre 2008 à février 2009, ce sont les tranchées 5 et 6 qui débitent le plus (période humide), alors que sur le reste de l'année c'est la tranchée 3 qui débite un peu plus que les autres, et notamment que la 2. Ce qui n'était pas le cas entre 1993 et 1999. Rappelons que la tranchée 2 dispose d'un géotextile posé horizontalement entre le terrain naturel et la grave, alors que la tranchée 3 dispose de ce même géotextile mais mis en chaussette tout autour de la grave.

Maintenant, comparons le débit moyen sur la première période avec celui de la seconde, pour toutes les tranchées drainantes. On obtient le tableau suivant :

	1993-1999	2008-2009
	Débit moyen en l/min	Débit moyen en l/min
tranchée 1	0.758	0.290
tranchée 2	18.736	2.325
tranchée 3	5.856	4.572
tranchée 4	6.244	1.464
tranchée 5	6.456	3.138
tranchée 6	3.530	2.423

Figure III.5 : Débits moyens des tranchées sur les deux périodes d'étude

On remarque que le débit moyen de la tranchée 2 a très fortement chuté alors que celui de la tranchée 3 s'est quant à lui maintenu, tout comme celui de la tranchée 6. Pour les tranchées 4 et 5, le débit a également diminué d'un facteur 4 à 2. Pour la tranchée 1, les débits sont toujours très faibles, et le débit moyen a également diminué. On peut encore signaler que sur la période de juillet 2008 à décembre 2009, les débits moyens des tranchées 2, 5 et 6 sont équivalents, alors qu'ils n'étaient pas comparables sur la période de 1993 à 1999.

Intéressons nous maintenant aux débits moyens calculés sur la même période de juillet à juillet de chaque année comme nous l'avons fait pour la pluviométrie dans le paragraphe IV.1.a.

La tranchée 1 est exclue de l'analyse puisque ses débits sont très faibles et qu'il n'y a pas de différences majeures entre les périodes d'étude.

TRANCHEE 2		TRANCHEE 3	
PERIODE	Débit moyen en l/min	PERIODE	Débit moyen en l/min
juillet 94 à juillet 95	23.575	juillet 94 à juillet 95	5.681
juillet 95 à juillet 96	17.209	juillet 95 à juillet 96	2.135
juillet 96 à juillet 97	20.140	juillet 96 à juillet 97	7.485
juillet 97 à juillet 98	9.991	juillet 97 à juillet 98	2.546
juillet 98 à juillet 99	15.974	juillet 98 à juillet 99	7.257
juillet 2008 à juillet 2009	3.828	juillet 2008 à juillet 2009	6.279

TRANCHEE 4		TRANCHEE 5	
PERIODE	Débit moyen en l/min	PERIODE	Débit moyen en l/min
juillet 94 à juillet 95	8.923	juillet 94 à juillet 95	6.237
juillet 95 à juillet 96	4.593	juillet 95 à juillet 96	3.322
juillet 96 à juillet 97	4.929	juillet 96 à juillet 97	8.672
juillet 97 à juillet 98	2.611	juillet 97 à juillet 98	3.155
juillet 98 à juillet 99	5.681	juillet 98 à juillet 99	8.528
juillet 2008 à juillet 2009	2.390	juillet 2008 à juillet 2009	4.324

TRANCHEE 6	
PERIODE	Débit moyen en l/min
juillet 94 à juillet 95	3.234
juillet 95 à juillet 96	1.046
juillet 96 à juillet 97	3.655
juillet 97 à juillet 98	1.639
juillet 98 à juillet 99	5.225
juillet 2008 à juillet 2009	3.887

Figure III.6 : Tableaux résumés des débits moyens de juillet à juillet de chaque année

On rappelle que les périodes 1994-1995, 1998-1999 et 2008-2009 des tableaux de la page précédente ont des pluviométries similaires et peuvent être comparées.

Ces résultats sont résumés dans le graphique suivant :

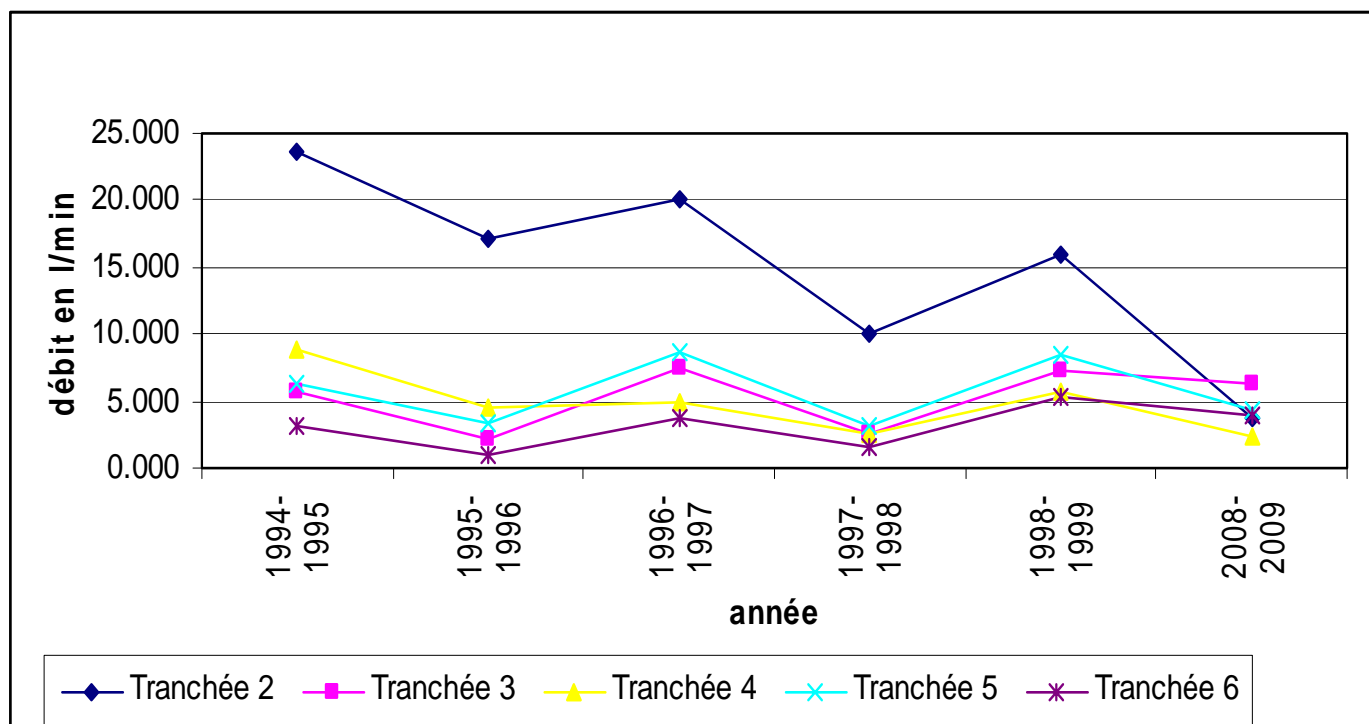


Figure III.7 : Débits moyens de juillet à juillet de chaque année

Sur ce graphique on voit parfaitement la chute du débit moyen de la tranchée 2, sur la période 2008 à 2009, toutes les autres tranchées ayant des débits moyens du même ordre de grandeur.

Toutefois, depuis environ le mois d'août 2009 au mois d'octobre 2009, la tranchée 3 a un débit nettement supérieur aux autres, la chute du débit de cette tranchée en été 2009 étant clairement plus faible ou retardée que les autres chutes, comme le montre la figure III.4. Néanmoins, à partir d'octobre, la chute du débit de cette tranchée est revenue au niveau du débit de la tranchée 5. Elles ont toutes les deux un débit équivalent mis à part un pic début décembre 2009.

III.2.b La piézométrie

La piézométrie est le second indicateur pouvant expliquer la quantité d'eau que draine chaque tranchée. Pour cette comparaison, nous ne travaillerons donc que sur les tranchées 2, 3, 4, 5 et 6, les piézomètres de la tranchée 1 n'ayant pas été retrouvés. Dans les graphiques suivants, on compare les relevés piézométriques tranchée par tranchée.

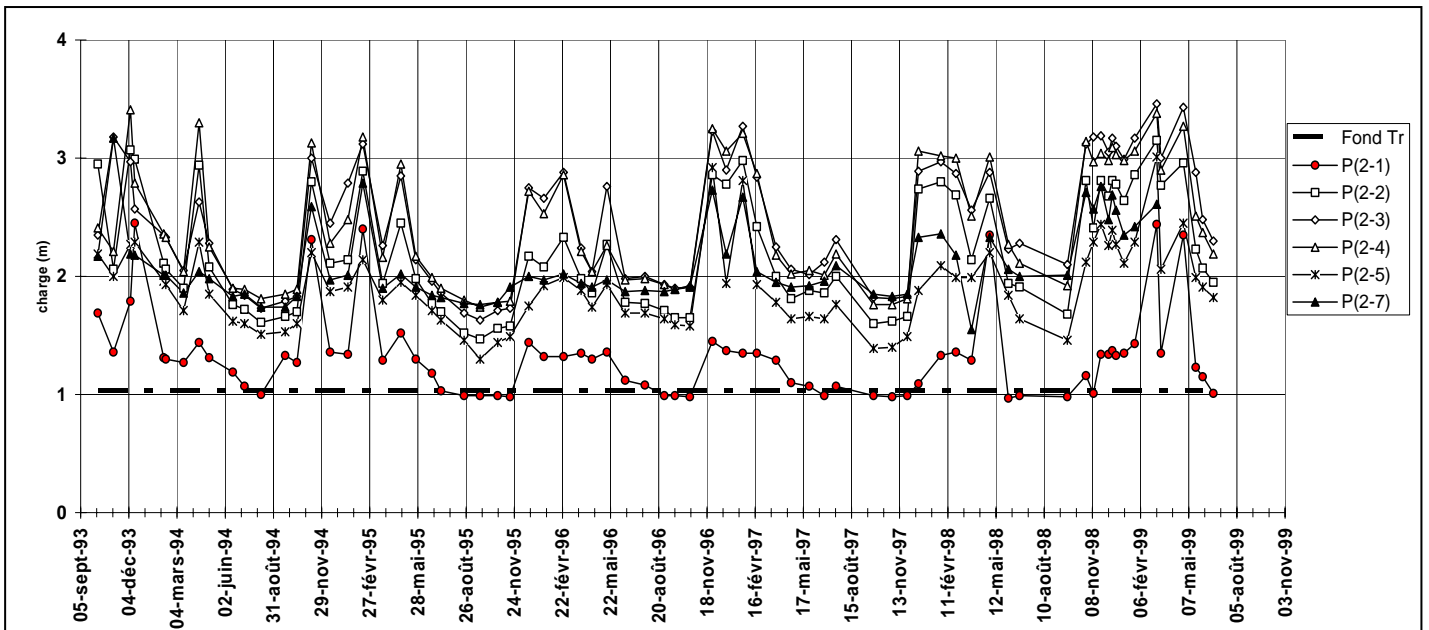


Figure III.8 : Relevé piézométrique de la tranchée 2, pour la période 1993 à 1999, d'après VAGNER P. (1999)

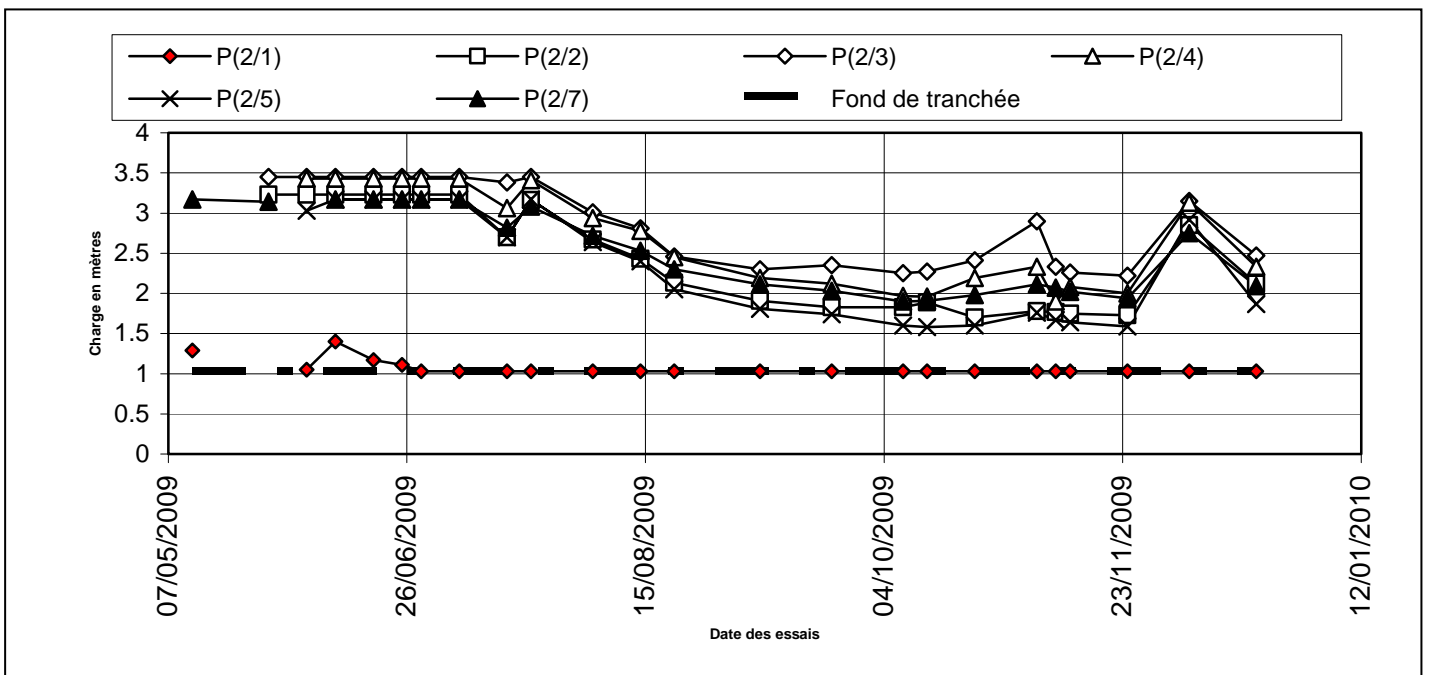


Figure III.9 : Relevé piézométrique de la tranchée 2, pour la période de mai 2009 à décembre 2009

La différence majeure que l'on remarque est que les piézomètres amont restent longtemps pleins pour la période 2008-2009, alors que sur le premier graphique (1993-1999), on constate une vraie variation saisonnière avec des périodes de hautes eaux et de basses eaux. Il est toutefois assez difficile de tirer des conclusions de cette comparaison car pour la période 2008-2009, nous ne disposons que des mesures estivales et automnales et il manque 6 mois de l'année.

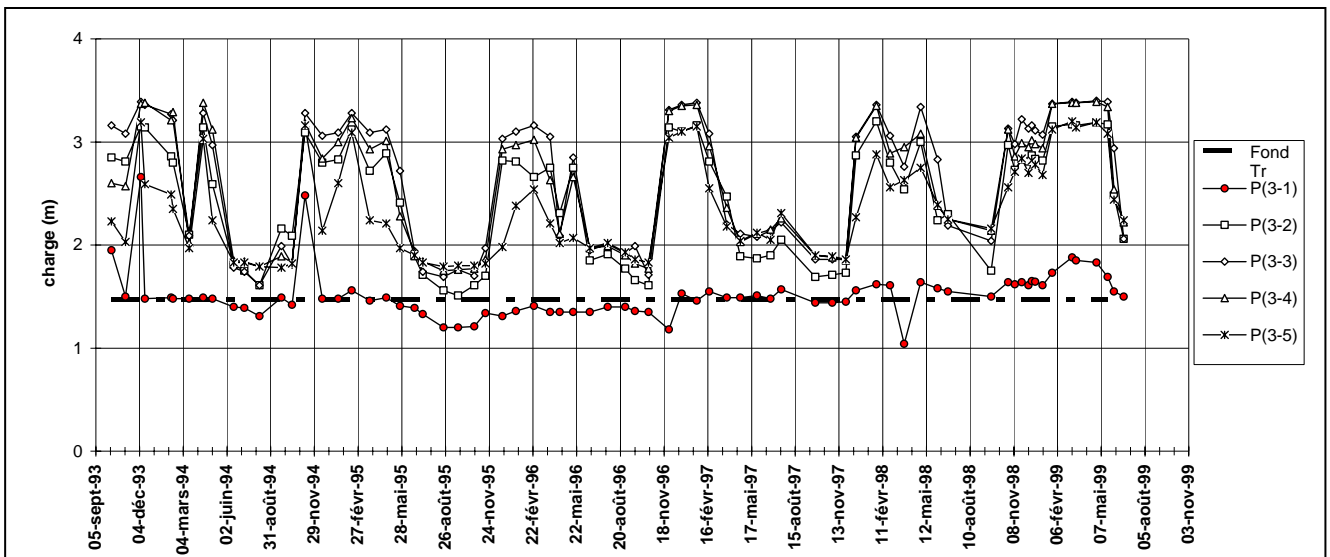


Figure III.10 : Relevé piézométrique de la tranchée 3, pour la période 1993 à 1999, d'après VAGNER P. (1999)

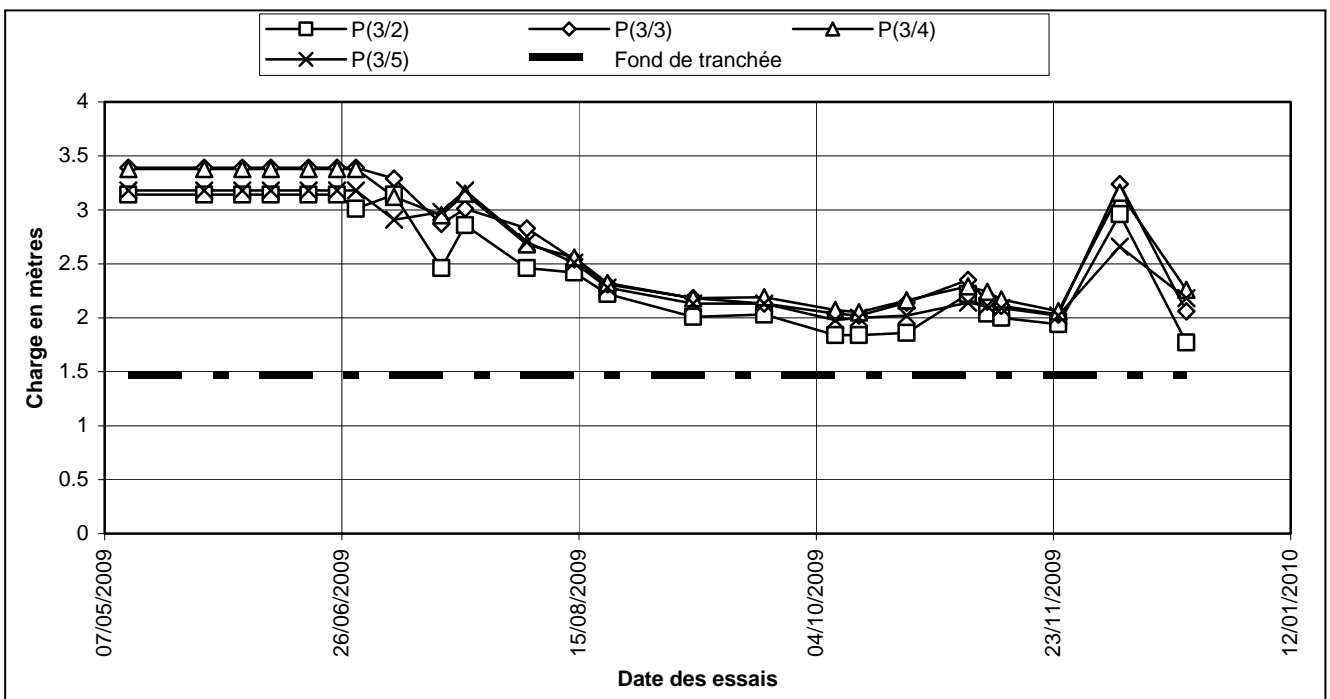


Figure III.11 : Relevé piézométrique de la tranchée 3, pour la période de mai 2009 à décembre 2009

Pour cette tranchée, on remarque qu'en 1999, il existait déjà ce palier de très hautes eaux (piézomètres amont remplis), de février à juin. En 2009, les hautes eaux se terminent à peu près au même moment. Ensuite, on constate une chute du niveau piézométrique, situation en accord avec ce qui est observable sur le site où se note un retrait des zones humides.

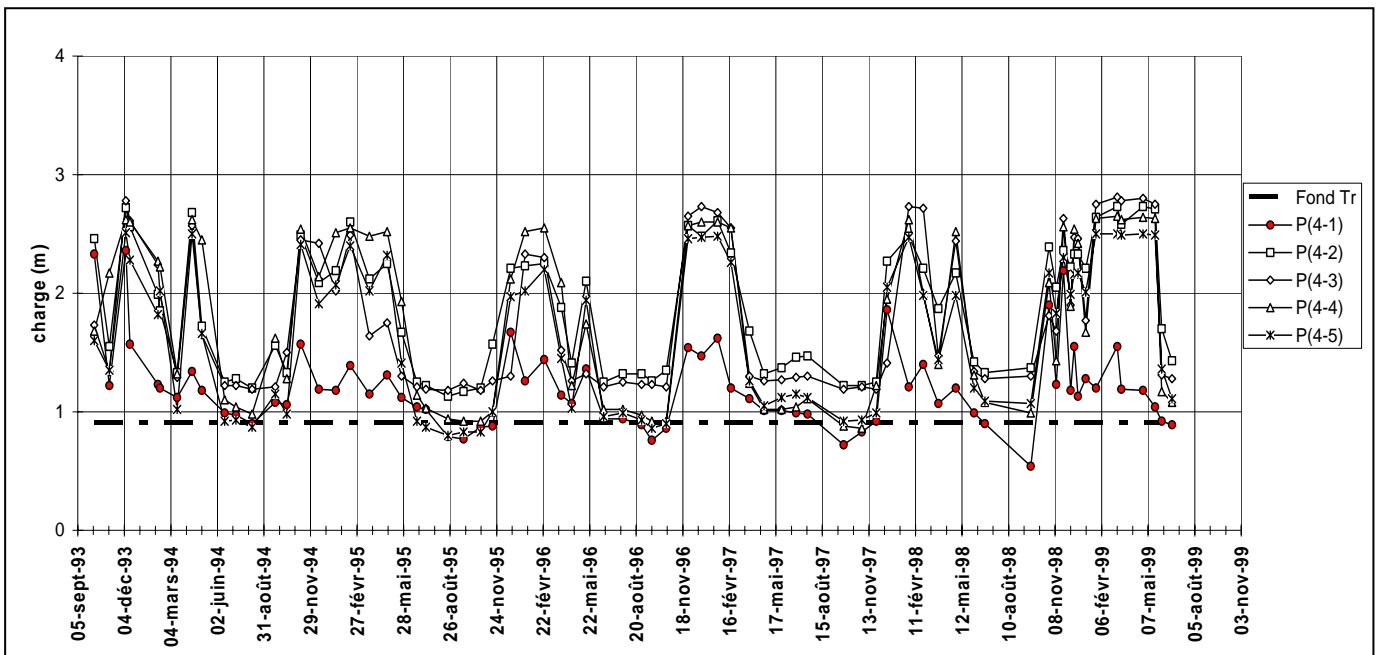


Figure III.12 : Relevé piézométrique de la tranchée 4, pour la période 1993 à 1999, d'après VAGNER P. (1999)

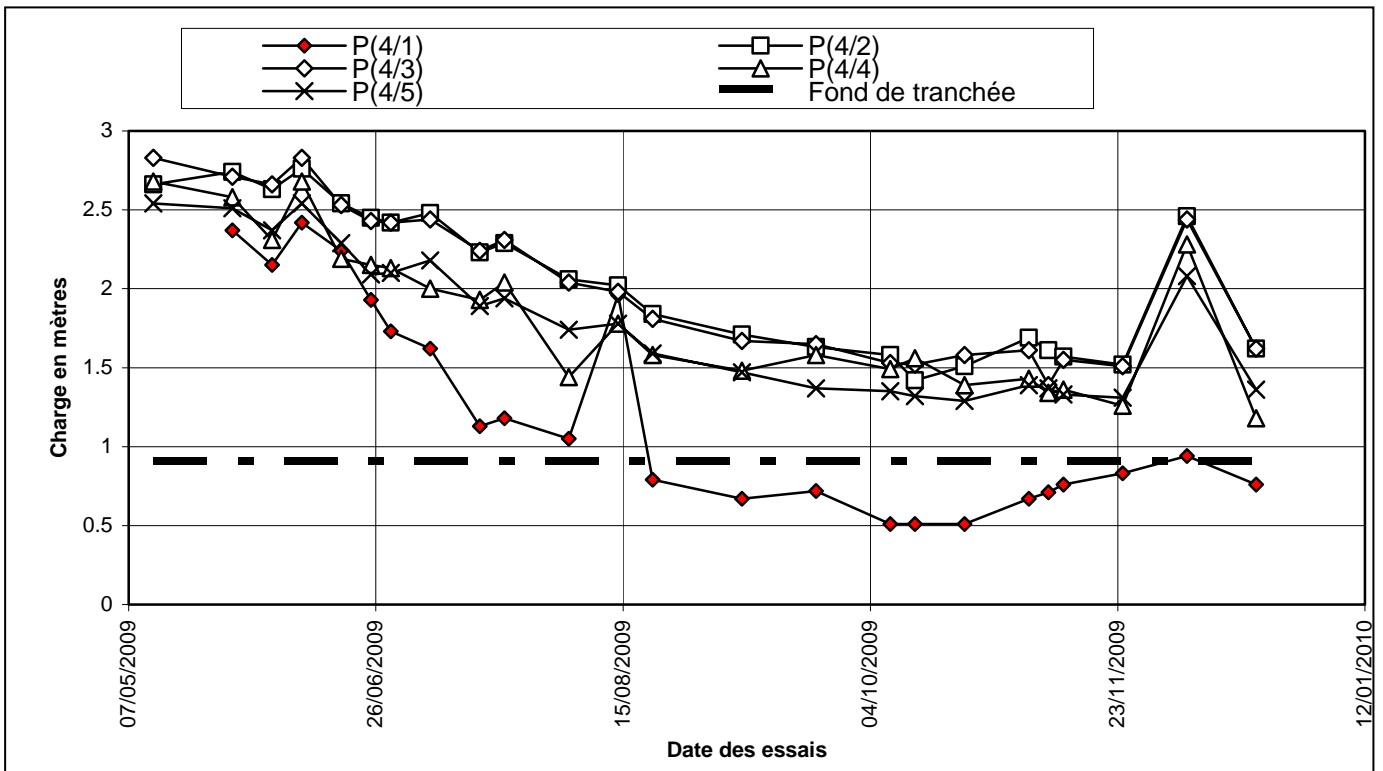


Figure III.13 : Relevé piézométrique de la tranchée 4, pour la période de mai 2009 à décembre 2009

Cette tranchée présente un comportement équivalent à la tranchée 3, même si les niveaux d'eau dans les piézomètres chutent plus précocement dans la tranchée 4 et par rapport à 1999.

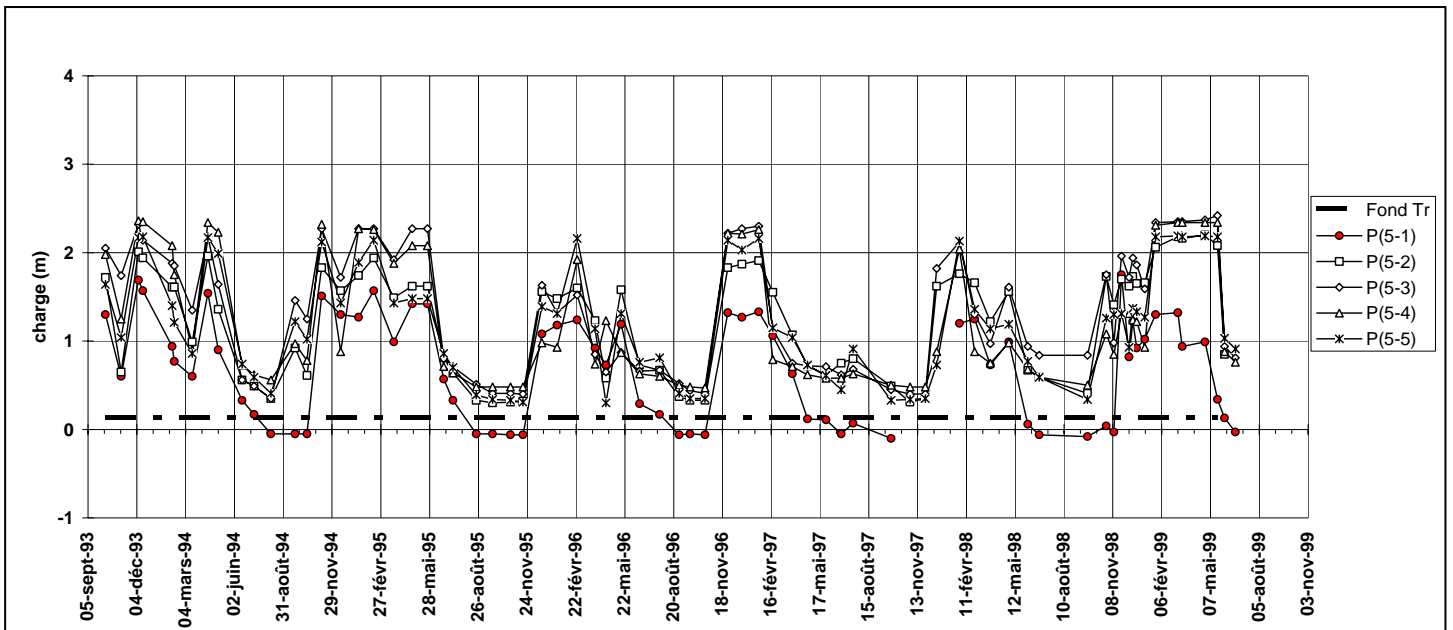


Figure III.14 : Relevé piézométrique de la tranchée 5, pour la période 1993 à 1999, d'après VAGNER P. (1999)

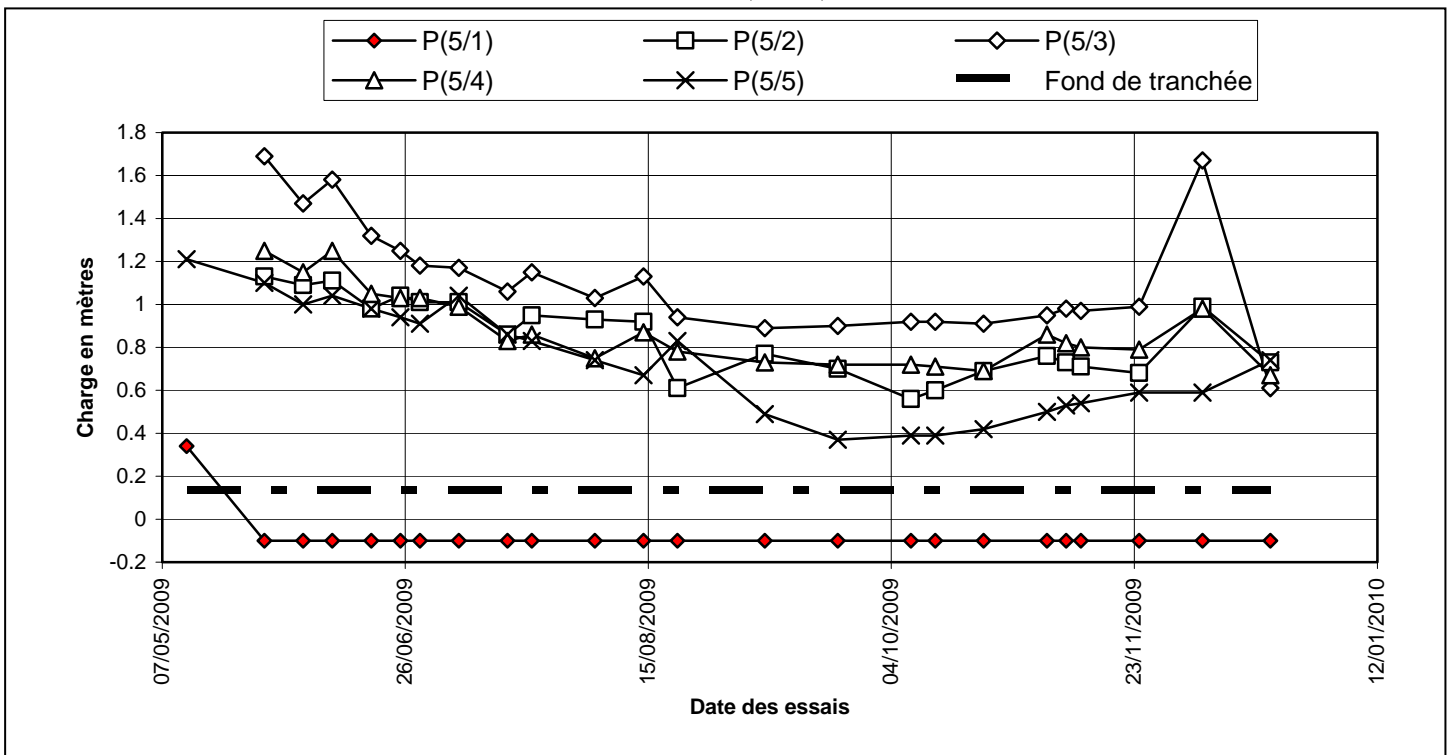


Figure III.15 : Relevé piézométrique de la tranchée 5, pour la période de mai 2009 à décembre 2009

En 1999, on observe le même palier que pour les tranchées 3 et 4. Par contre en 2009, ce palier n'existe pas ce qui indique qu'il y a moins d'eau à l'amont de la tranchée. Le niveau d'eau entre mai et septembre 2009 ne varie pas beaucoup, ce qui est normal puisqu'on est en période de basses eaux. Par contre, on peut remarquer que le piézomètre aval baisse plus tôt qu'avant puisqu'en 1999 il fallait attendre fin août, alors qu'en 2009, dès la fin mai il est bas.

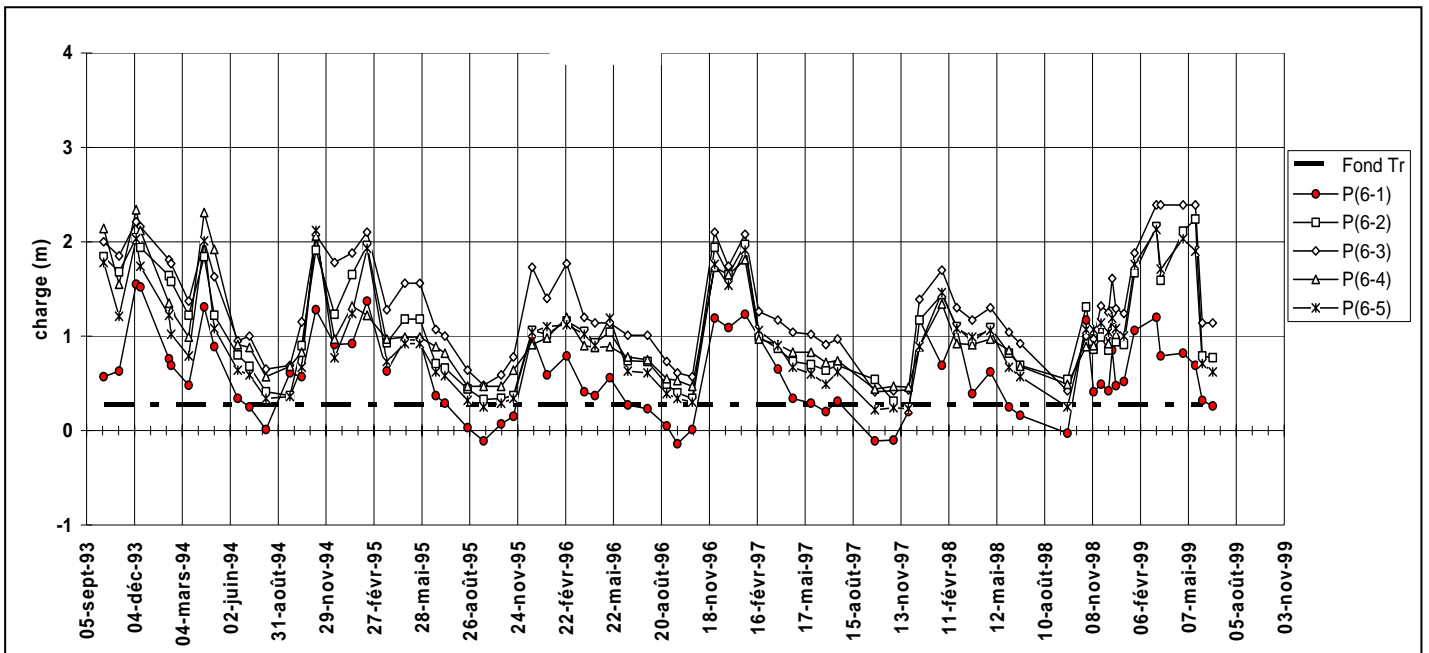


Figure III.16 : Relevé piézométrique de la tranchée 6, pour la période 1993 à 1999, d'après VAGNER P. (1999)

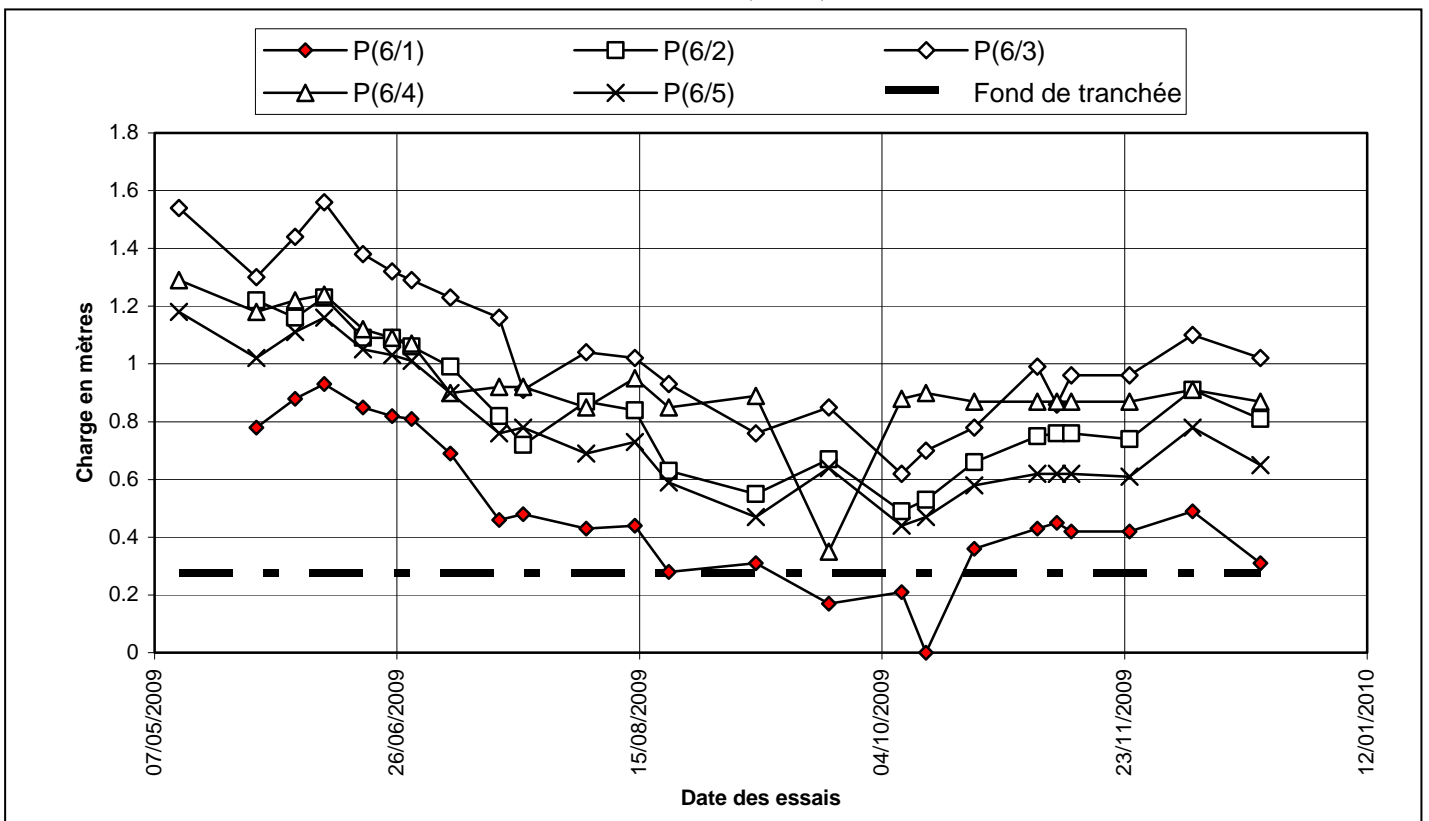


Figure III.17 : Relevé piézométrique de la tranchée 6, pour la période de mai 2009 à novembre 2009

Cette tranchée semble évoluer en 2009 de manière assez semblable à l'année 1999, avec un léger retard.

III.3 CONCLUSION

Au vu des mesures, des visites effectuées sur le terrain, et des archives et témoignages recueillis, il semble qu'il y a plus d'eau à l'amont des tranchées 2 et 3 qu'à l'origine. Cette augmentation du niveau d'eau pourrait être due à une modification de l'écoulement d'un ruisseau intermittent à l'amont du terrain.

En ce qui concerne les tranchées drainantes, on remarque tout de suite que malgré la quantité d'eau à l'amont de la tranchée 2, son débit a fortement baissé par rapport à la période 1993-1999. S'agirait-il d'un colmatage du matériau drainant de la tranchée, résultant de son absence de géosynthétique en chaussette ?

Les débits des tranchées 4, 5, et 6 n'ont que très légèrement diminué. La tranchée 3, quant à elle, semble avoir conservé sa capacité drainante d'origine, et moins subir le temps. Il en est de même pour la tranchée 6. On peut également remarquer que les débits des tranchées 5 et 6 ont « explosé » pendant l'hiver 2008-2009. Malheureusement sans mesure piézométrique du terrain à cette époque, on ne peut pas dire si la raison de cette augmentation est due à une plus grande saturation.

Il faut toutefois rester prudent sur nos comparaisons 2008-2009 avec les périodes plus anciennes, car nous ne disposons que de 18 mois et demi de mesures récentes pour les débits et seulement 8 mois et demi pour la piézométrie.

IV PROJET DE REOUVERTURE ET D'ANALYSE DES **TRANCHEES DRAINANTES (VERS LA PHASE II DE** **DRAINAGEING)**

Notre travail avait pour dernier objectif de préparer la réouverture des tranchées drainantes (phase II de DrainAgeing). Ce projet de réouverture est important, car il permettra de voir comment ont évolué les ouvrages, quel est l'état des géotextiles dans chaque tranchée drainante, comment se présente la grave (plutôt colmatée ou plutôt propre). Il est également nécessaire de fixer la période la plus propice pour réaliser ce chantier, ainsi que les prélèvements et essais à faire pour caractériser le vieillissement des tranchées drainantes et des géosynthétiques, sur ces 17 années de fonctionnement, à l'échéance 2010 ou 2011 dans le cadre du projet DrainAgeing. Les modalités et l'évaluation des coûts de réouvertures des tranchées sont traitées ici en deux parties, une concerne les travaux de génie civil et la seconde concerne le coût des essais qui seront réalisés après l'ouverture des tranchées drainantes. Une première partie introductive explique en quoi le projet intéresse l'ingénierie des barrages.

IV.1 UN PROJET DE REOUVERTURE INTERESSANT AUSSI POUR LE DOMAINE DES BARRAGES

Le dispositif expérimental de tranchées drainantes de Roissard a été construit dans le cadre de recherches sur les travaux de stabilisation et de drainage des glissements de terrain. La motivation de ces recherches reposait notamment sur des témoignages relatant des cas de colmatage plus ou moins avérés et/ou naissants de géotextiles filtres utilisés dans les tranchées drainantes, au bout de quelques années de service et ce, en dépit d'un dimensionnement initial semble-t-il respectueux des règles de filtre formulées par le Comité Français des Géotextiles. Or, une problématique strictement équivalente se pose pour les filtres et drains créés dans les ouvrages hydrauliques en remblai, et en particulier les barrages.

Rappelons donc, brièvement, comment se présente le dispositif de drainage des barrages en remblai.

IV.1.a Dispositif de drainage d'un barrage en remblai

Dans un barrage en remblai de taille courante, ce dispositif est composé principalement de deux éléments :

- un drain cheminée vertical continu, en sable 0 - 5 mm, de la base du remblai jusqu'au niveau normal des eaux + 0,20 à 0,30 mètre pour éviter tout risque de contournement sous la crête. Ce drain est généralement obtenu en recréant à la pelle le remblai toutes les 5 ou 6 couches compactées et en y déversant le sable ;
- une évacuation vers l'aval, si possible indépendante du tapis drainant, ou des bandes drainantes. Elle consiste en des cordons en matériaux granuleux (en général du gravier

entouré de sable ou d'un géotextile) de section totale très largement suffisante pour évacuer le débit prévisible.

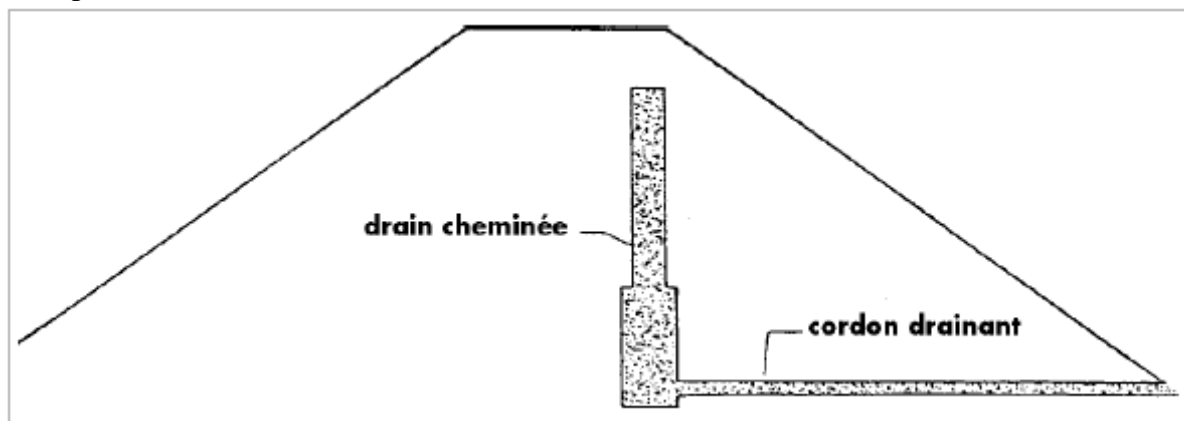


Figure IV.1 : Dispositif drainant d'un barrage argileux homogène, d'après DEGOUTTE G. et al (2002)

Pour le drainage des barrages, sont ainsi mis en œuvre des matériaux granulaires et/ou des géosynthétiques.

IV.1.b Nature des matériaux utilisés dans les drains

Les critères granulométriques à retenir pour les matériaux granulaires sont les suivants (les deux premiers sont issus des règles de TERZAGHI élaborées pour des matériaux granuleux uniformes) :

. $\frac{d_{15}F}{d_{85}M} < 5$ avec F pour le filtre et M pour le matériau plus fin à filtrer (le filtre doit empêcher la migration des particules de M vers F).

. Les sols constitutifs des filtres et drains doivent être relativement uniforme, pour éviter la ségrégation et assurer la stabilité interne, la règle préconisée est $2 < \frac{d_{60}}{d_{10}} < 8$.

. Il faut moins de 5 % d'éléments inférieurs à 80 μm et d_{15} des sables $> 0,1$ mm (en appliquant la formule de VAUGHAN et SOARES $k = 0.35d_{15}^2$; où k en cm/s et d_{15} en mm on obtient pour $d_{15} = 0,1$ mm une perméabilité $k = 3,5 \times 10^{-5}$ m/s, ce qui est une valeur limite pour un matériau drainant).

.Lorsqu'on a un sol très fin, le critère $d_{15}F < 5d_{85}M$, n'est pas utilisable. Il faut alors utiliser un sable 0-5mm.

. Dans le cas d'un sol très gradué, avec $Cu = d_{60}/d_{10} > 16$, le filtre contigu à ce matériau doit être déterminé avec le d_{85} de la partie inférieure de la courbe granulométrique du sol, après le changement de pente (cf. figure suivante).

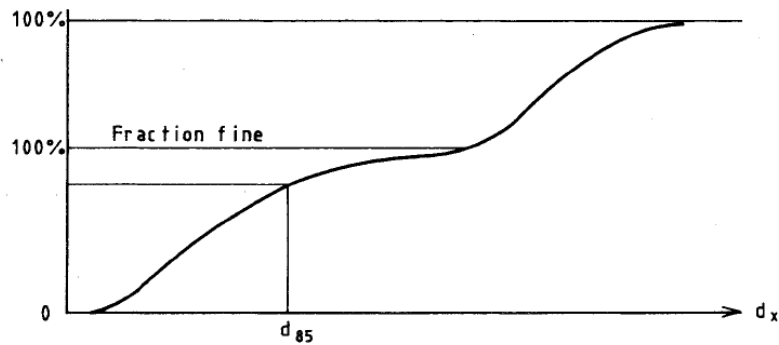


Figure IV.2 : d_{85} de la fraction fine d'un sol à granulométrie discontinue, d'après NF G 38-061(1993)

Lorsque l'on utilise un géotextile en lieu et place d'une couche granulaire pour filtrer le sol, le critère suivant (dit de rétention) s'applique sur l'ouverture de filtration Of du produit :

$$Of < C \times d_{85}, \text{ avec } Of > 50 \mu$$

D'après la norme française NF G 38-061 datant de février 1993, on a :

d_{85} : le diamètre des éléments du sols à filtrer tel que 85% en poids des éléments de ce sol soient inférieurs à ce diamètre,

et $C = C_1 \times C_2 \times C_3 \times C_4$

C_1 : coefficient tenant compte de la granularité du sol à filtrer

- granularité continue et étalée ($C_u \geq 5$) : $C_1 = 1$
- granularité uniforme ($C_u < 5$) : $C_1 = 0.8$

C_2 : coefficient tenant compte de la compacité du sol à filtrer I_D

Sol	Caractérisation	C_2
Cohérent	$d \geq 95\%$ de d_{OPN}	1.25
	$d < 95\%$ de d_{OPN}	0.8
Non cohérent, sables et graviers propres	$I_D \geq 50$	1.25
	$I_D < 50$	0.8

Figure IV.3 : Tableau de caractérisation du coefficient C_2 , d'après NF G 38-061 (1993)

Avec $I_D = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$, où e est l'indice des vides, e_{max} est l'indice des vides du sol à sa compacité minimum et où e_{min} est l'indice des vides du sol à sa compacité maximum.

C_3 : coefficient tenant compte de l'écoulement hydraulique i_s gradient hydraulique dans le sol à filtrer au voisinage du géotextile :

- $i_s \leq 5$: $C_3 = 1$
- $i_s > 5$: $C_3 = 0.8$
- écoulement alterné (protection de berge) : $C_3 = 0.6$

C_4 : coefficient tenant compte du rôle du géotextile :

- rôle de filtre seul : $C_4 = 1$
- rôle de filtre drain homogène : $C_4 = 0.3$

IV.1.c Intérêt du projet « DrainAgeing » pour les barrages

Dans le domaine d'application des barrages en remblai (mais aussi des digues), les dispositifs de drainage-filtration vus ci-dessus forment les derniers remparts face à un mécanisme de rupture particulièrement redouté et sournois : celui de l'érosion interne.

La durabilité et le non-colmatage des drains, cheminées et autres tapis drainants, le plus souvent filtrés par des géosynthétiques, sont ici d'autant plus importants que ces dispositifs sont implantés au cœur des remblais et qu'ils se révèlent quasiment impossibles à réparer une fois construits.

Aussi, le projet de réouverture des tranchées drainantes de Roissard - au bout de 17 années de fonctionnement et de 8 années d'auscultation - intéresse également grandement les concepteurs de barrage, dans la mesure où les retours d'expérience d'ouvrages déterrés sont très peu nombreux. On peut, d'ailleurs, constater que le drainage aval et la filtration, par drain cheminée, des noyaux argileux compactés de barrages zonés présentent des similitudes intéressantes¹ avec le cas testé en semi-vraie grandeur sur le site de Roissard.

C'est ainsi qu'est né le projet DrainAgeing – comme « Vieillissement des Drains » ou « Ingénierie du drainage » - visant à évaluer le comportement à long terme de drains filtrés par géotextile, sur la base de la réouverture des tranchées du dispositif expérimental de Roissard. Ce projet bénéficie de fait du double soutien du Pôle Grenoblois d'études et de recherche pour la prévention des Risques Naturels (domaine d'application des glissements de terrain) et du Projet National ERINOH « Erosion interne dans les ouvrages hydrauliques » (domaine d'application des barrages et des digues).

IV.2 LES TRAVAUX DE GENIE CIVIL

Cette partie a été principalement traitée par Max BONNIOT, au cours de son stage de six semaines (du 25 mai au 3 juin 2009) de fin de dernière année de l'IUT génie civil de Grenoble. Nous avons suivi et orienté son travail, conjointement avec Cécile BERTRAND du service RTM Isère. Il a fallu tout d'abord élaborer le protocole d'ouverture, pour ensuite en déterminer le coût.

Nos choix se sont arrêtés sur trois méthodes.

Ils ont été décidés suivant deux éléments principaux. La nature des terrains, tout d'abord : le site est dans les argiles litées du Trièves, avec une nappe affleurant à plusieurs endroits. Ensuite, la législation sur l'hygiène et la sécurité des chantiers qui impose l'utilisation de blindage ou le talutage approprié des parois des fouilles de tranchée, dès lors que l'on creuse à plus de 1,30 mètres de profondeur et que du personnel doit descendre.

Enfin, pour l'élaboration du bordereau des prix, nous nous sommes basés sur deux ouvertures de deux mètres de longueur chacune par tranchée.

¹ A l'instar des argiles litées, les noyaux de barrage présentent une anisotropie de perméabilité du fait de leur compactage par couches horizontales.

IV.2.a Premier principe d'ouverture : la méthode CARRON

Cette méthode ne nécessite qu'une mini-pelle d'une puissance d'environ 12 KW, du type EC15B chez VOLVO (voir schéma technique en annexe 26). La taille du godet serait de 300 mm ou 800 mm. La nécessité d'utiliser uniquement une pelle, sans blindage, est le principal avantage de cette technique. Elle consiste à descendre le terrain autour des zones de réouverture des tranchées drainante, en réalisant un talus. Cela nous permettrait de descendre dans un premier temps jusqu'à 0,70 m à 1,20m de profondeur en talutant au large la fouille, puis d'atteindre si nécessaire le fond de l'ouvrage avec une tranchée plus étroite mais peu profonde, voir le schéma suivant.

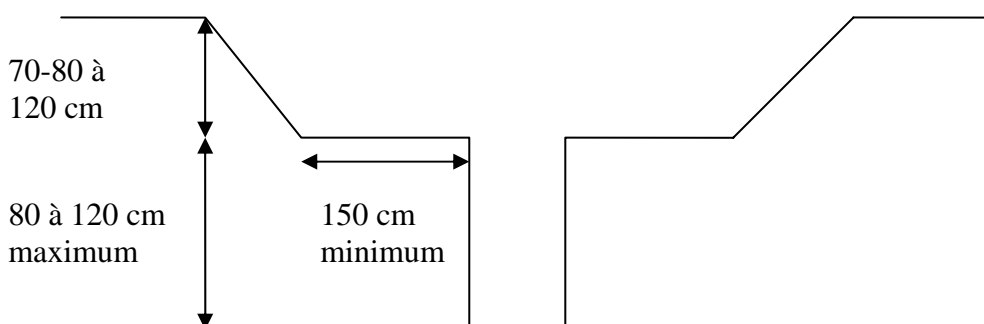


Figure IV.4 : Schéma explicatif de la méthode CARRON

Décomposition du coût de cette technique :

- Amenée et repli de la mini-pelle : 530,00 €
- Prix de réouverture de 2 mètres de tranchée : 290,00 €

Au total pour 2 ouvertures de 2 mètres et pour les 6 tranchées, on obtient un coût de :
 $530 + (2 \times 290) \times 6 = 4010,00$ € soit environ 170,00 € par mètre linéaire d'ouverture.

IV.2.b Technique par pose de caisson de type léger

Cette technique est simple : elle consiste à ouvrir la tranchée avec la même mini-pelle que pour la méthode CARRON, jusqu'au fond de fouille. Ensuite, on pose à l'aide de l'engin mécanique un blindage léger pour soutenir les parois.

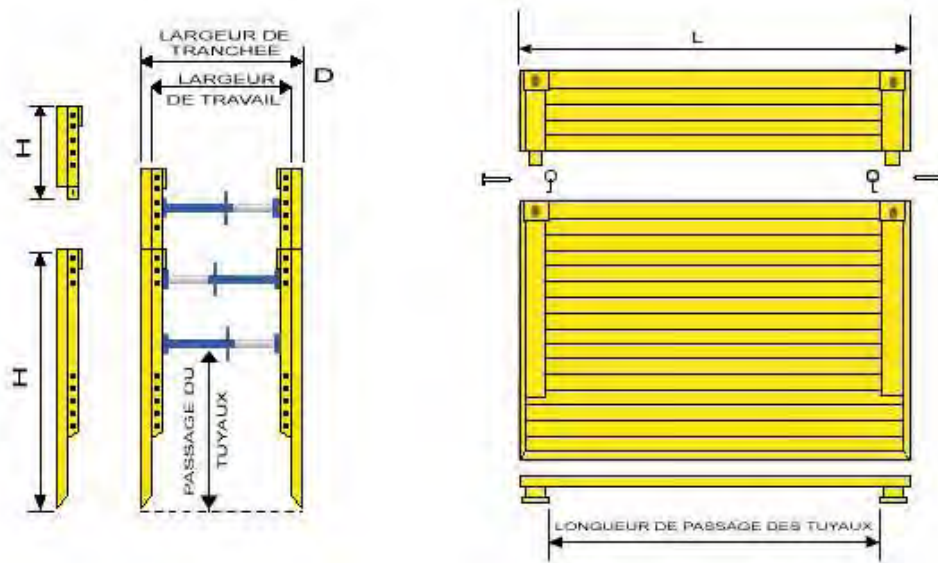


Figure IV.5 : Un blindage de type léger, d'après BONNIOT M. (2009)

Le schéma suivant représente la réalisation de la fouille et la pose du blindage.

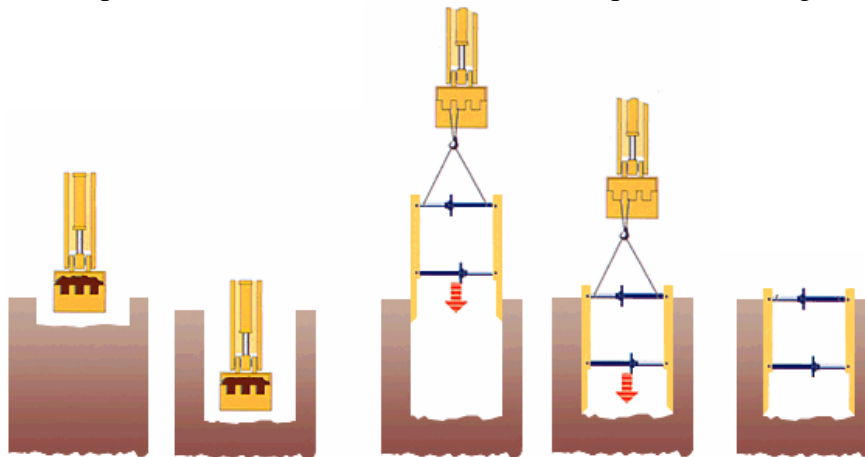


Figure IV.6 : Schéma de réalisation de la fouille et pose du blindage, d'après BONNIOT M. (2009)

Une fois le blindage posé et réglé, il est possible de réaliser les prélèvements et essais en toute sécurité dans une « fenêtre » entre deux blindages.

Le blindage est monté une fois en début de chantier et est descendue en une seule fois. Ce qui permet de gagner du temps par rapport au blindage qu'il faut boulonner dans la fouille. La pose du blindage nécessitera toutefois de déterrer et d'extraire le géotextile à l'aide de la pelle mécanique.

En ce qui concerne le coût il est plus élevé que celui de la méthode CARRON puisqu'il faut ajouter le coût de location du blindage, qui dépend du temps nécessaire pour effectuer les prélèvements et essais.

IV.2.c Technique par pose de palplanches

La dernière méthode consiste à utiliser des palplanches pour soutenir les parois de la fouille. Cette technique consiste à creuser sur environ 50 cm de part et d'autre de l'emprise

des tranchées, pour placer le guide des palplanches, ensuite on fonce les palplanches en suivant le guide, avec le godet de la pelle comme le montre le schéma suivant.

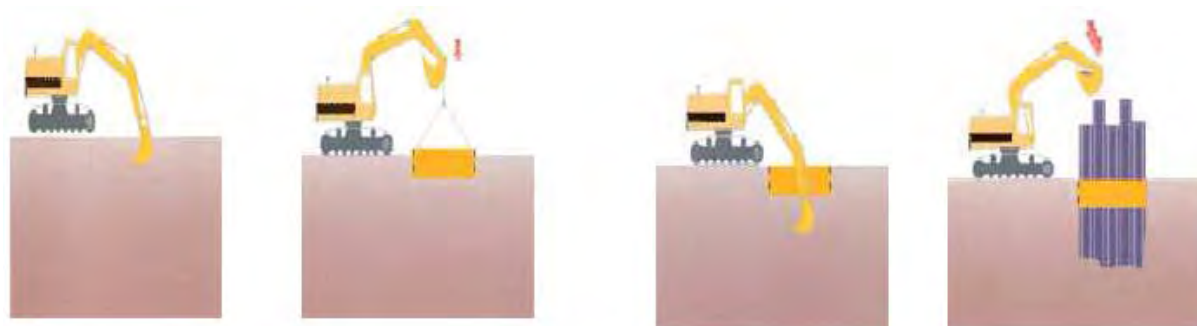


Figure IV.7 : Schéma explicatif de la technique par pose de palplanches, d'après BONNIOT M. (2009)

En dernier lieu on ouvre la tranchée à l'abri et avec le soutènement des palplanches.

IV.2.d La méthode choisie

La méthode privilégiée à l'issue du stage de Max BONNIOT, était une variante de celles expliquées auparavant. En effet, elle consiste à utiliser la méthode CARRON pour l'ouverture parallèlement aux tranchées drainantes et à poser des palplanches pour le soutènement transversal des fouilles.

On trouve en annexe 27 le libellé des prix de cette intervention, avec les détails sur chaque étape et son coût. Le budget prévisionnel de réouverture et remise en état du site, (c'est une clause que le propriétaire du terrain a fixée pour nous autoriser à reprendre l'étude sur sa parcelle), s'élèverait à **35 000,00 €** hors essais.

Depuis la fin du stage de Max BONNIOT (3 juin 2009), le protocole d'ouverture a encore été affiné. En effet, il s'est avéré que l'idée de fonder des palplanches perpendiculairement aux tranchées drainantes serait très difficilement réalisable et destructeur pour le système drainant. C'est pourquoi, nous nous orientons plutôt vers un protocole en deux phases très proches de la méthode CARRON. Tout d'abord une ouverture talutée de la tranchée sur 1 mètre environ (à ce moment, nous pourrions prélever nos échantillons de grave, de terrains naturels et de géotextiles). Ensuite, on réaliserait l'abaissement de terrain de la méthode CARRON, pour pouvoir enfin ouvrir la tranchée drainante jusqu'au fond.

IV.3 LES ESSAIS

Dans l'estimation du budget prévisionnel du projet de réouvertures des tranchées drainantes, il convient d'intégrer des essais à réaliser suite à la réouverture. En effet, en plus des observations qui seront faites lors de l'ouverture à proprement dite, des essais seront à effectuer pour évaluer et mesurer le vieillissement des différentes tranchées, toujours dans l'optique de savoir si l'usage d'un géotextile dans le but d'éviter le colmatage des systèmes drainants, est utile ou non. Ces essais concerneront les géotextiles seuls, le terrain naturel et la grave seule ainsi que leurs interactions. Ils seront composés d'essais normalisés ainsi que d'autres que l'on peut qualifier d'essais de « recherche ».

Trois laboratoires seront impliqués pour ces essais :

- Cemagref d'Antony (Hauts-de-Seine, 92) : laboratoire de géosynthétiques, accrédité COFRAC² (essais de perméabilité et d'ouverture de filtration) ;
- Cemagref Aix-en-Provence (Bouches-du-Rhône, 13) : laboratoire de mécanique des sols de l'Unité OHAX (essais au perméamètre, HET) ;
- LTHE (essais sur colonne, essais d'érosion).

IV.3.a Les essais sur les géosynthétiques

- Essai de perméabilité d'un géotextile :

Cet essai vise à déterminer les caractéristiques de perméabilité à l'eau du géotextile, normalement au plan, sans contrainte mécanique ; selon la norme NF EN ISO 11058, il sert à la certification ASQUAL des géosynthétiques.

Sa réalisation nécessite 3 éprouvettes de diamètre 200 mm.

- Essai d'ouverture de filtration :

Il permet la détermination de l'ouverture de filtration (taille de la plus petite particule arrêtée par le géotextile) caractéristique ; selon la norme NF EN ISO 12956, il entre également dans la certification ASQUAL des géosynthétiques.

Pour cet essai, il est nécessaire de disposer d'au minimum 5 éprouvettes de diamètre 90 mm.

Ces deux essais sont incontournables pour évaluer la performance résiduelle des géosynthétiques des tranchées. Des essais mécaniques comme la résistance à la traction pourraient aussi s'avérer utiles.

IV.3.b Les essais sur le terrain naturel et la grave

- Essai au perméamètre :

Il s'agit d'un essai classique de détermination de la perméabilité d'un sol. Il sera réalisé sur des échantillons d'argiles litées dans notre cas. On mesurera la perméabilité horizontale de l'argile à proximité des tranchées drainantes. Le but est de comparer ces résultats avec des échantillons d'argiles litées du Trièves non remaniés et hors influence des tranchées drainantes. On les prélèvera sur le site, mais loin des tranchées ou sur un autre site dans le Trièves par exemple au niveau du glissement de l'Harmalière.

Les résultats de ces essais seront à comparer avec les caractéristiques initiales des matériaux.

- Le Hole Erosion Test (HET) :

Cet essai est en développement au Cemagref Aix-en-Provence dans le cadre du projet ERINOH. Littéralement, il signifie « mesure de l'érosion de trou ». Il a été développé dans le

² Le Comité français d'accréditation (COFRAC), créé en 1994 sous l'égide des pouvoirs publics, est une association loi 1901 à but non lucratif dont les membres représentent l'ensemble des partenaires concernés : pouvoirs publics, professionnels, laboratoires et organismes accrédités, groupements de consommateurs et utilisateurs, acheteurs publics. Le COFRAC a pour objet principal de procéder à l'accréditation, conformément aux normes françaises, européennes ou internationales, de tous les organismes intervenant dans l'évaluation de la conformité à un référentiel, et dans tous les domaines où une accréditation est utile.

but d'étudier l'érodabilité des sols fins. On suit l'érosion d'un trou d'épingle aménagé dans un échantillon de sol soumis à un flux hydraulique avec deux capteurs de pression, un à l'amont et un à l'aval, ainsi qu'avec un turbidimètre. La procédure d'analyse est en annexe 28.

Comme pour l'essai précédent, des prélèvements hors influence des tranchées drainantes seront réalisés pour comparer les résultats.

Ici, l'objectif sera de caractériser l'érodabilité des argiles litées, par rapport à d'autres sols testés dans le cadre du projet de recherche ERINOH. Il serait intéressant de pouvoir tester l'argile dans les deux sens (vertical et horizontal) pour apprécier l'influence de la structure en « lits » du terrain.

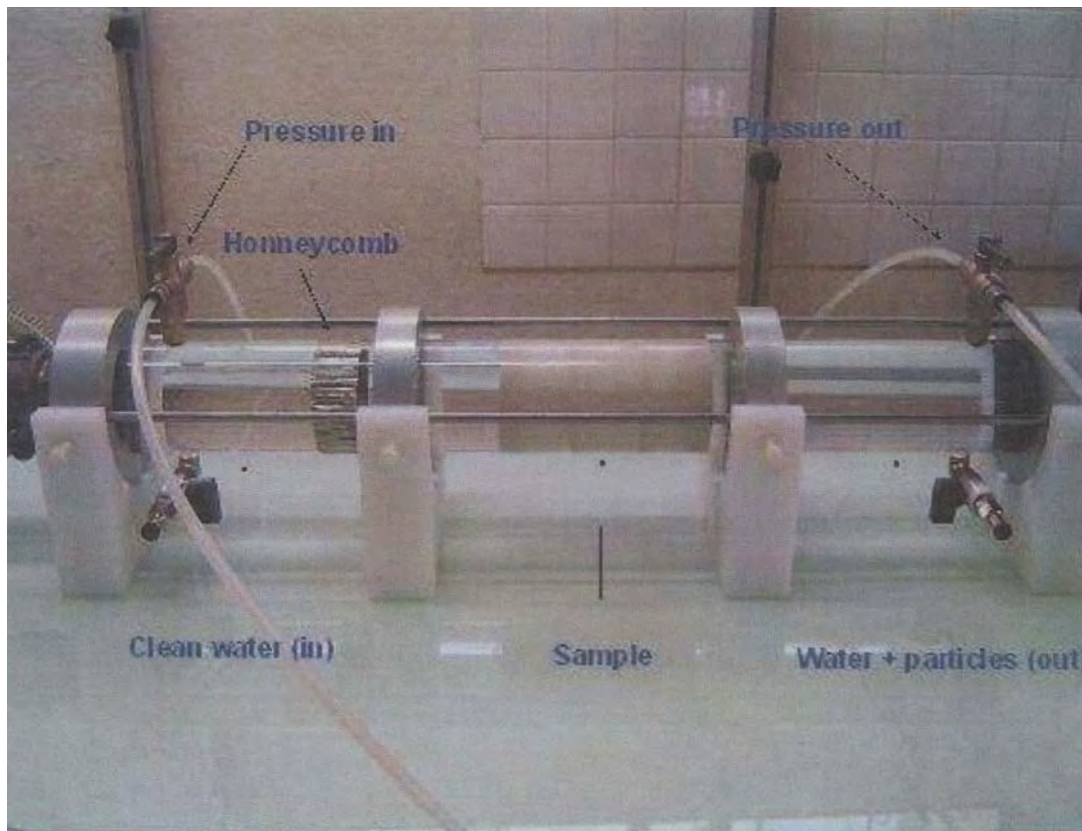


Figure IV.8 : Photographie du dispositif de Hole Erosion Test, d'après BENHAMED N. et BONELLI S. (2008)

- Essai de filtration sur colonne avec suivi des gradients :

Cet essai est aussi un essai de recherche conduit au LTHE, il n'est pas normalisé en France et en cours de développement. Il consiste à recréer le côté amont d'une tranchée, mais verticalement, à savoir une couche d'argile litée, de géotextile, et d'une couche de bille de verre à la place la grave. Le dispositif est équipé par des capteurs de pression, qui permettent de suivre le gradient hydraulique à différentes hauteurs de la colonne. Pour cela trois capteurs sont disposés, un au niveau des billes de verre (P1), un dans les argiles (P2) et un dans l'eau au dessus (P3). Grâce à ces mesures on peut déterminer le Gradient Ratio (GR) d'après ASTM D5101-90 par la relation suivante :

$$GR = \frac{\Delta h_{12}/l_{12}}{\Delta h_{23}/l_{23}}$$

avec Δh_{12} et Δh_{23} respectivement les gradients hydrauliques entre P1 et P2, et entre P2 et P3, et avec l_{12} et l_{23} respectivement les distances entre P1 et P2, et entre P2 et P3.

Au début $GR \approx 1$, ensuite si GR diminue c'est que l'on assiste à un lessivage du sol, et si GR augmente jusqu'à dépasser la valeur 3, on il y a colmatage.

La durée de l'essai est de 24 heures.

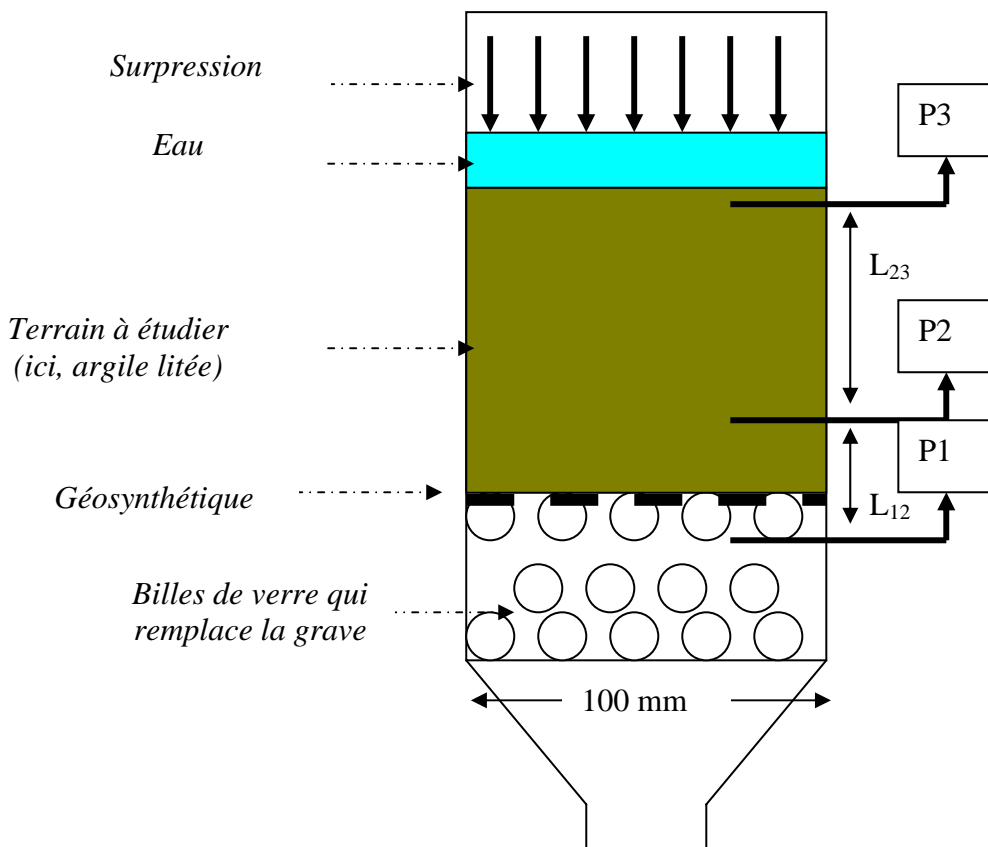


Figure IV.9 : Schéma du dispositif d'essai de filtration sur colonne avec suivi des gradients

- Essai d'érosion transversal avec écoulement horizontal :

L'idée de cet essai est de replacer un prélèvement grave + géosynthétique + terrain naturel non remanié dans un banc d'essai, où on fait circuler de l'eau. On mesure alors le débit sortant en fonction de la charge amont, et la turbidité. Cet essai permettra de reproduire exactement le fonctionnement du géosynthétique sur le terrain, et de connaître les particules qui passent au travers du système. Le dispositif est représenté sur le schéma suivant en coupe transversale :

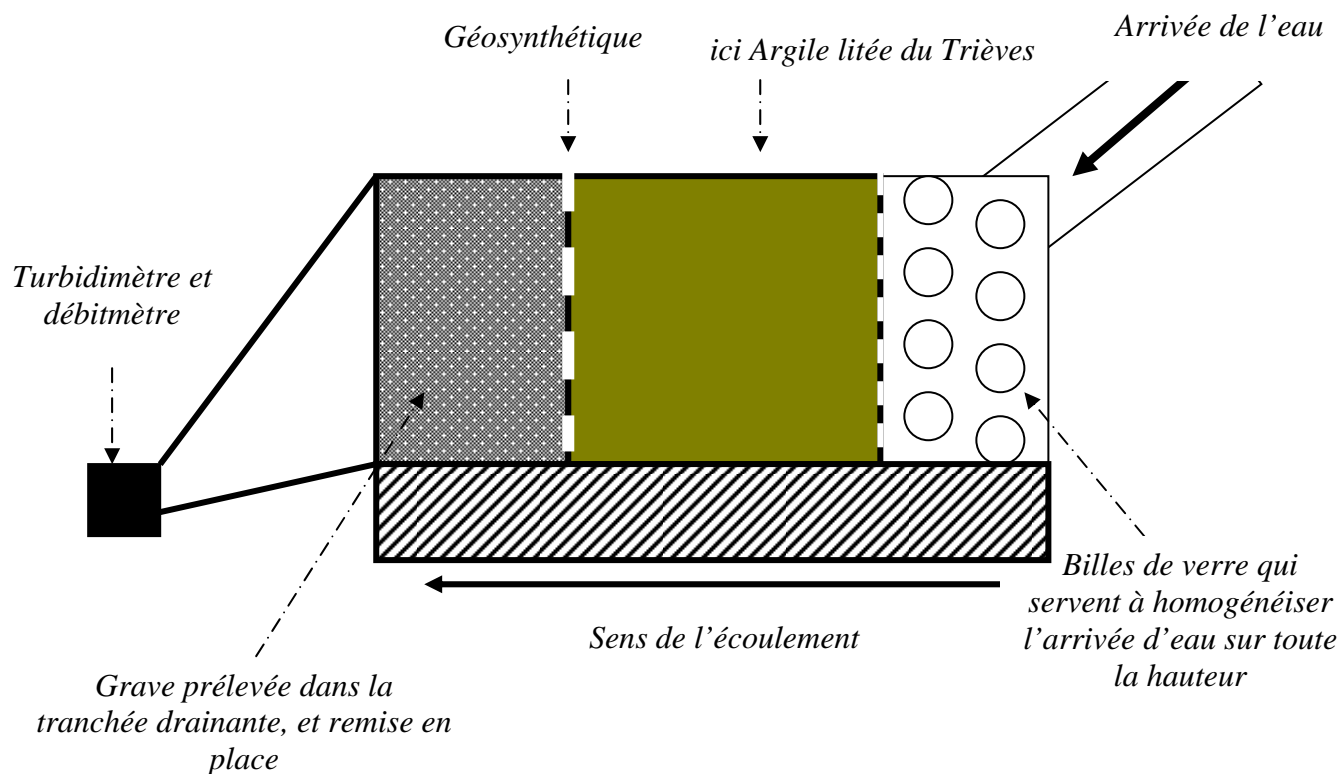


Figure IV.10 : Schéma en coupe transversale, du dispositif d'essai d'érosion transversale avec écoulement horizontal

On trouve en annexe 29 la fiche de coûts de ces essais par tranchée. Le montant prévisionnel du coût des essais pour toutes les tranchées et pour trois prélèvements par tranchée s'élève environ à **25 000,00 €HT**.

Ainsi le budget brut prévisionnel de l'ouverture des tranchées et des essais est de 25 000 € + 35 000 €, soit 60 000 €HT. Ce budget ne prend pas en compte le coût des personnels recherche du LTHE et du Cemagref, qui suivront les travaux régulièrement et réaliseront les prélèvements. Pour obtenir un montant d'opération, il convient de rajouter à ce budget de coûts marginaux subventionnables, le coût marginal de la maintenance et de suivi du site de début 2010 à mi-2011 (4 000 €HT) et une provision d'environ 10 % pour frais de maîtrise d'œuvre des travaux et imprévus, ce qui le porte à quelque **70 000 €HT**.

Le chantier pourrait intervenir en 2010 (août-septembre est la période favorable) mais ce sont surtout les questions de financement et d'autorisation qui détermineront la date. De plus, l'ouverture pourrait être un peu retardée, si les débitmètres automatiques sont mis en

place. En effet, dans ce cas, on souhaiterait au moins avoir une année complète de mesures, ce qui décalerait le chantier à l'été 2011.

V LES AVANCEES EN COURS (DECEMBRE 2009)

V.1 LA CREATION DE FOSSES EN AMONT DU SITE

Comme rappelé en conclusion du chapitre III, des eaux de ruissellement parasites pourraient être à l'origine de la saturation du terrain observée temporairement vers les tranchées 2 et 3. Pour se protéger contre ce phénomène, inconnu à la création du site expérimental, nous avons décidé de réaliser un réseau de fossés à l'amont de la parcelle, à l'appui du témoignage des exploitants. Ces fossés ont été créés le 12 novembre 2009 (avant le retour de la saison pluvieuse), ils font entre 30 et 50 centimètres de profondeur (voir les photographies suivantes).



Figures V.1 : Photographies des fossés

Nous pourrons juger de leur efficacité au cours du prochain hiver 2009-2010.

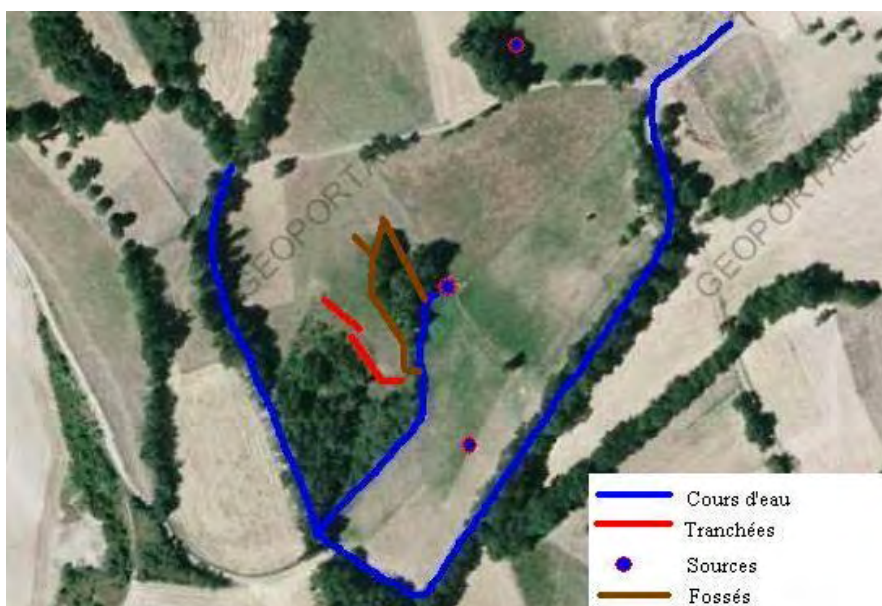


Figure V.2 : Plan de situation des fossés

V.2 MISE EN PLACE DE CAPTEURS ENREGISTREURS DE PRESSION DANS LES PIEZOMETRES

Rapprocher la fréquence des mesures est intéressant pour pouvoir évaluer au mieux le comportement du terrain et des tranchées drainantes, et les corrélations avec la pluviométrie. Afin de répondre à ce besoin sans surcharger des mesures manuelles devenant déjà lourdes à la fréquence hebdomadaire, il a été décidé de mettre en place des systèmes de mesures en continu pour un piézomètre de chaque tranchée. A cette fin, 6 capteurs enregistreurs de pression ont été commandés et installés le 7 décembre 2009. Ils sont programmés pour prendre une mesure de pression et température toutes les 4 heures. Nous avons décidé de mettre un capteur par tranchée et un baromètre pour l'ensemble du site qui permettra de compenser les mesures. Cette compensation barométrique est nécessaire pour pouvoir comparer les mesures à la sonde piézométrique (qui détecte et mesure un niveau d'eau) avec celles d'un capteur de pression qui mesure toute la pression qui lui est appliquée, y compris la pression atmosphérique. Ainsi toute baisse ou augmentation de cette dernière est répercutée sur la mesure. Les capteurs de pression sont disposés selon le plan suivant :

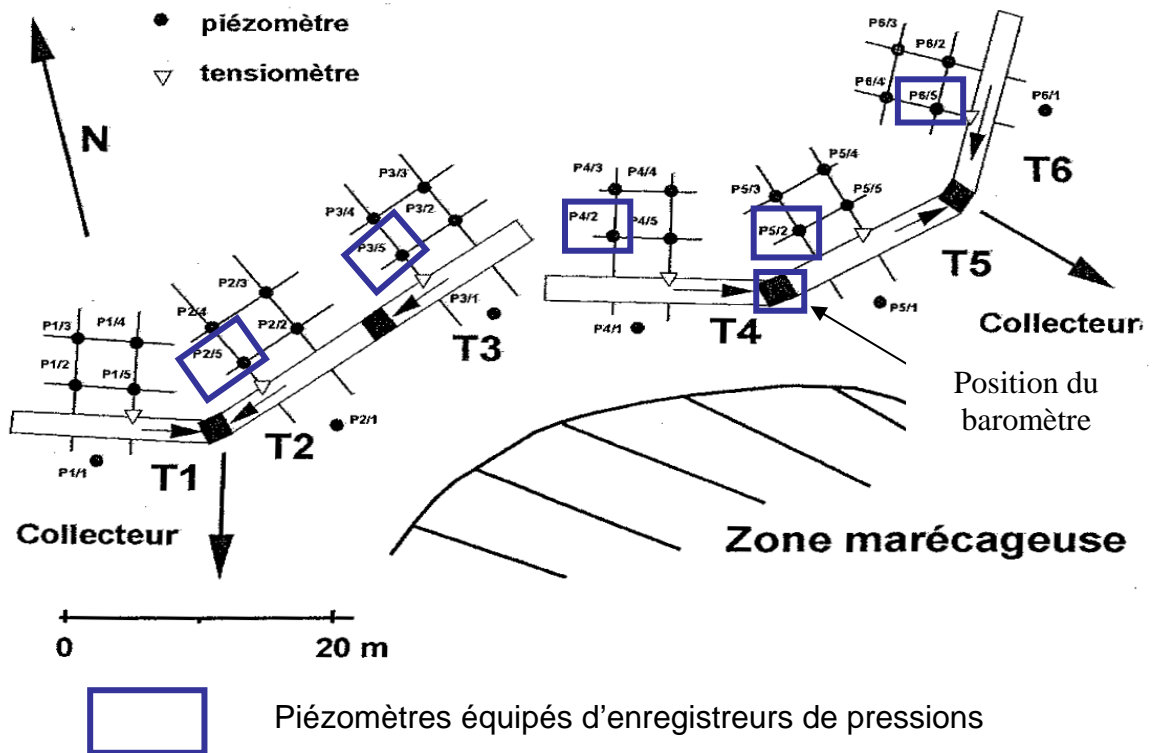


Figure V.3 : Plan de repérage des capteurs enregistreurs de pression

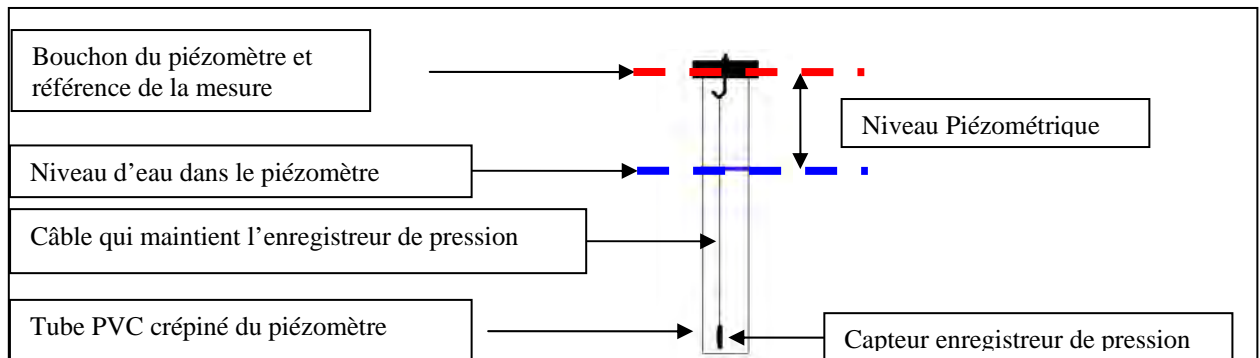


Figure V.4 : Schéma des capteurs enregistreurs de pressions

Un relevé de contrôle a été effectué le 21 décembre 2009, pour vérifier que tous les capteurs étaient bien fonctionnels ; les mesures en sont regroupées dans les graphiques suivants :

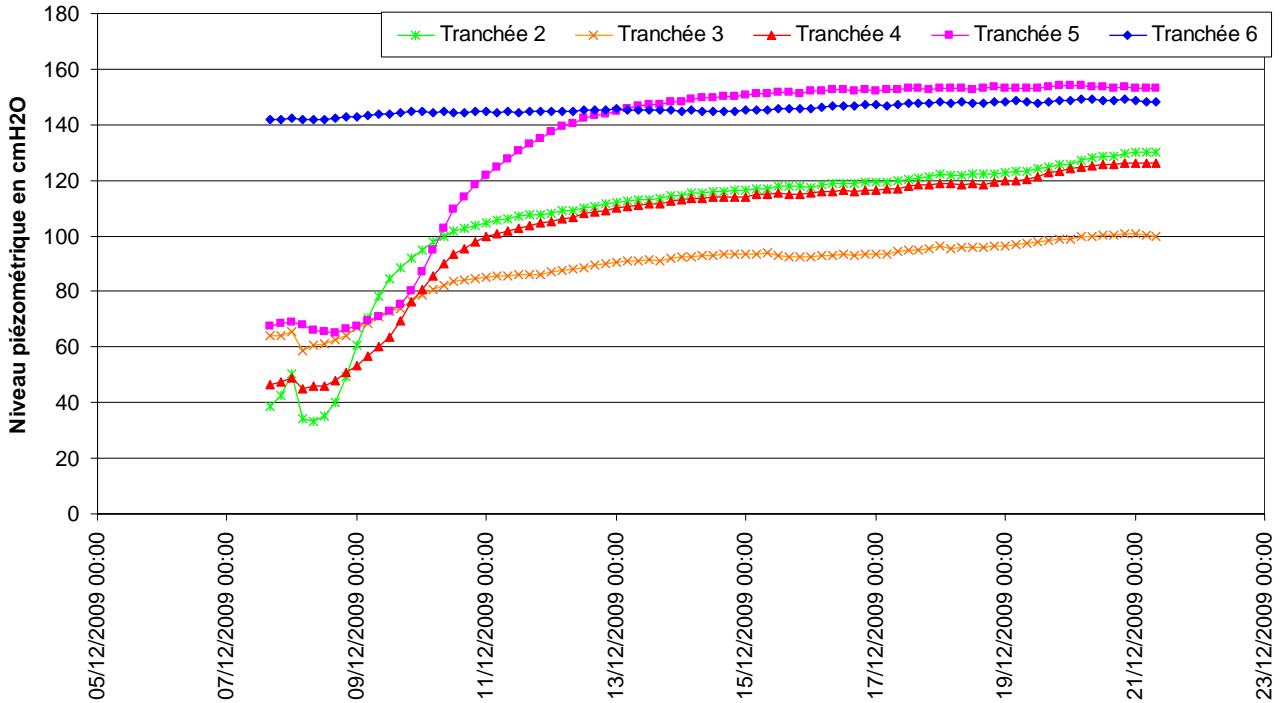


Figure V.4 : Niveaux piézométriques mesurés par les capteurs de pressions et compensés

Grâce à ce système, on obtient un suivi en quasi-continu de la hauteur d'eau pour un piézomètre de chaque tranchée. Le graphique suivant montre l'utilité d'avoir une courbe de mesures à pas de temps fins, permise par le capteur enregistreur plutôt qu'une droite qui relie deux points de mesure manuelle à la sonde piézométrique.

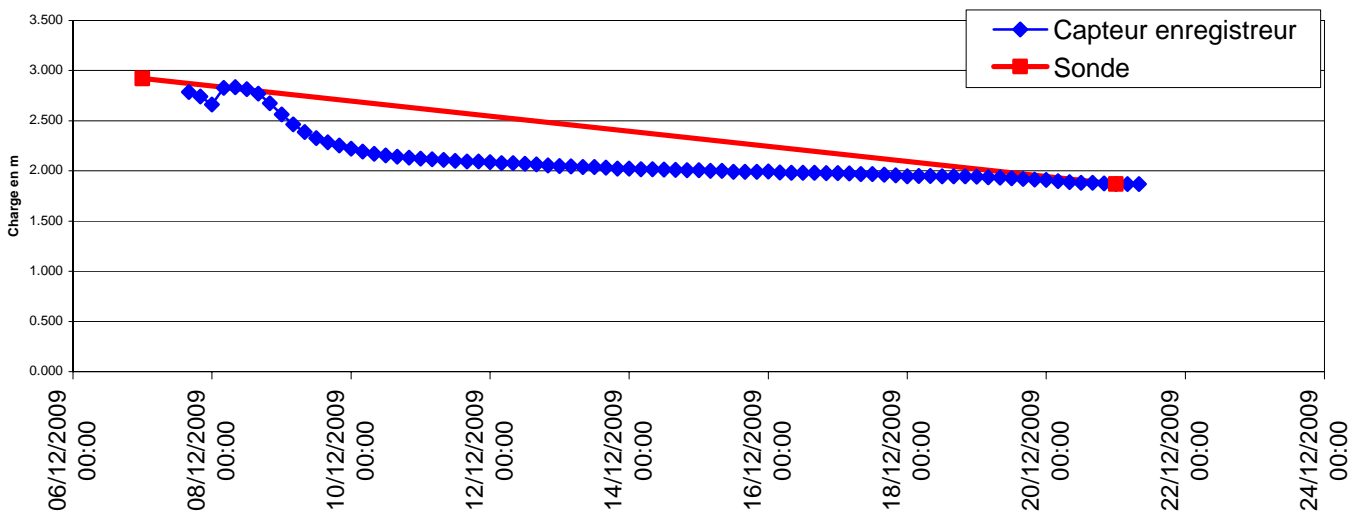


Figure V.5 : Comparaison entre les mesures de P2/5 à la sonde manuelle et celles au capteur-enregistreur

V.3 MISE EN PLACE DE DEBITMETRES AUTOMATIQUES

De même, des débitmètres automatiques vont être installés dans chaque regard afin de disposer d'une mesure des débits en continu.

Après tests concluant sur un prototype au laboratoire, c'est un système à auges basculantes, semblable à celui installé dans les pluviographes, qui a été retenu. Le dispositif comprend deux auges symétriques autour d'un axe, de volume identique connu (cf. croquis ci-dessous). A chaque fois qu'une auge bascule, un signal est envoyé par l'intermédiaire d'aimants à une interface d'acquisition qui enregistre la date et l'heure.

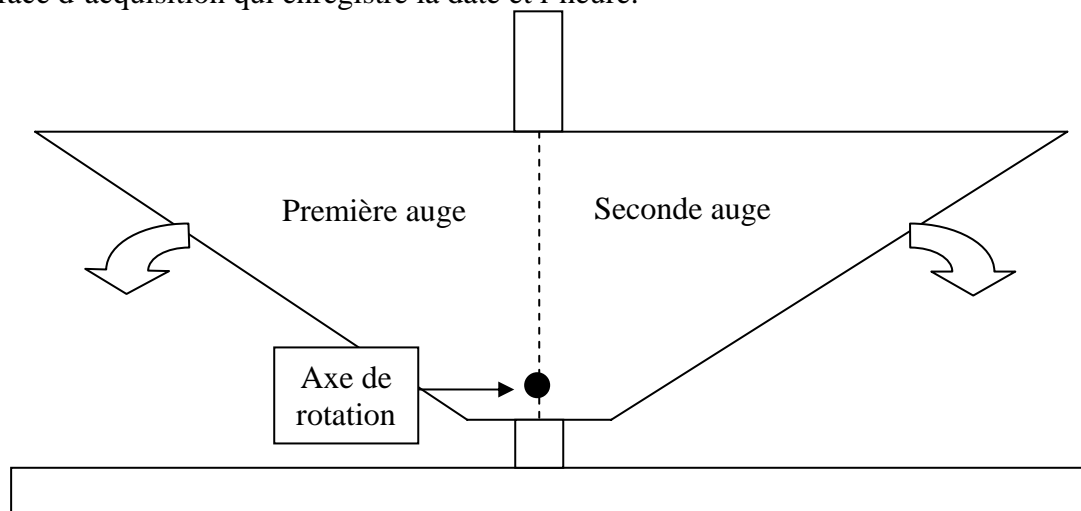


Figure V.6 : Schéma du débitmètre automatique

Lorsque la première auge bascule, elle se vide, et l'eau issue du collecteur du drain s'écoule alors dans la seconde auge qui se remplit à son tour jusqu'à provoquer un basculement dans l'autre sens une fois pleine, et ainsi de suite. A chaque fois que le système bascule, on enregistre un signal avec la date et l'heure. Connaissant les pas de temps de basculement et le volume d'eau des auges, une centrale d'acquisition peut calculer le débit en continu.

Ce système sera installé lui aussi à raison d'un par tranchée d'ici la fin février 2010, si les conditions météorologiques le permettent.

CONCLUSION GENERALE

Après quelque 16 années de service et la reprise des mesures en 2008, le site expérimental des tranchées drainantes de Roissard apparaît en excellent état de marche et a été amélioré grâce à la phase I (2009) du projet DrainAgeing soutenu par le Pôle Grenoblois des Risques Naturels et le Projet National ERINOH. L'assainissement obtenu sur le site montre l'efficacité d'un système drainant dans ces terrains argileux.

Cependant, l'analyse des mesures sur la période 2008-2009 montre des différences avec les résultats du suivi de 1993 à 1999. En effet, la tranchée 2, qui avait le débit le plus fort de 1993 à 1999, est aujourd'hui dépassée par la tranchée 3, ainsi que par les tranchées 5 et 6 au moins au cours de l'hiver 2009. L'ouverture partielle des tranchées et les essais prévus sur les différents sols et géosynthétiques dans le cadre de la phase II du projet DrainAgeing permettront de diagnostiquer de manière approfondie l'état des ouvrages et de caractériser d'éventuels phénomènes de colmatage.

L'inspection télévisuelle de fin juin 2009 des drains autoroutiers en fond nous a fourni les précieux éléments de repérage pour élaborer un protocole d'ouverture centré sur les portions les plus actives des tranchées.

Le présent rapport conclut à un montant d'opération de phase II du projet DrainAgeing de **70 000 €HT**, correspondant essentiellement aux coûts d'entreprise de travaux publics et des essais sur sols et géosynthétiques et n'englobant pas les coûts de personnels permanents recherche. C'est sur la base de ce montant que des subventions et des soutiens extérieurs sont recherchés.

Le planning de la phase II du projet DrainAgeing sera fixé au premier semestre 2010 en fonction des perspectives de financement.

BIBLIOGRAPHIE

ASTM D 5101-90

‘ASTM D 5101’ pages 89 à 95

ASTM D 5567-94

‘ASTM D 5567’ pages 141 à 148

BENAHMED Nadia et BONELLI Stéphane (2008)

‘Procédure de l’essai d’érosion interne HET et sa méthode d’interprétation, version 1’
Cemagref Aix-en-Provence. Aix-en-Provence. Avril 2008, 5 p.

BOLEVE Alexandre (2009)

‘Localisation et quantification des zones de fuites dans les digues et les barrages par la méthode du potentiel spontané’
Thèse de doctorat. Université de Savoie. Bourget-du-Lac. Mars 2009, 213 p.

BONNIOT Max (2009)

‘Réouverture des tranchées drainantes du site expérimental de ROISSARD’
Rapport de stage de fin de deuxième année de l’IUT génie civil de Grenoble. Grenoble. 10 p.

DEGOUTTE Gérard (ENGREF), ALONSO Emmanuel (Cemagref), BECUE Jean-Pierre (SAFEGE), BOLLE Gérard (Expert), BRODIN Jean-Luc (CACG), BRUNEL Patrice (CARA), CASSARD Alain (DDAF 67), DORE Michel (MECASOL), LAUTRIN Danièle (Cemagref), LEFEBVRE Jean (Ingénieur Conseil), MICHEL Georges (SCP), ROYET Paul (Cemagref) et TRATAPEL Georges (CNR) (2002)

‘Petits barrages recommandations pour la conception la réalisation et le suivi’, Comité français des grands barrages, édition cemagref, 119 p

FARKOUH Bassam (1994)

‘Le filtre géosynthétique dans les ouvrages de drainage. Essais de laboratoire et observations in situ’.
Thèse de doctorat. Université Joseph Fourier de Grenoble. Grenoble. Novembre 1994, 368 p.

LEROY Jocelyne (1993)

‘Tranchées drainantes expérimentales dans les argiles litées du Trièves’.
Rapport de fin d’études. ISTG. Grenoble. Septembre 1993, 130 p.

NFG 38-061 (1993)

Février 1993, 17 p

TESTEMALE J.P. et al. (1999)

‘Filtre géotextile du barrage de Torcy-le-Vieux (Saône-et-Loire) : prélèvements et analyses. Ingénieries EAT’, numéro spécial 1999 « Géosynthétiques – matériaux et applications », pp. 31 à 39.

VAGNER Philippe (1999)

‘Comportement hydraulique de tranchées drainantes avec filtres géotextiles dans les argiles litées’.

Mémoire de DEA Mécanique Conception et Géomécanique. Université Joseph Fourier de Grenoble. Grenoble. 61 p.

SITES INTERNET CONSULTES :

GEOPORTAIL : <http://www.geoportail.fr>

LISTE DES FIGURES

<i>Figure I.1 : Carte de localisation du site, d'après Géoportail</i>	7
<i>Figure I.2 : Carte de localisation rapprochée du site, d'après Géoportail</i>	8
<i>Figure I.3 : Carte de localisation cadastrale du site, d'après Géoportail</i>	8
<i>Figure I.4 : Coupes types des tranchées du site</i>	10
<i>Figure I.5 : Tableau des caractéristiques physiques des géotextiles utilisés</i>	10
<i>Figure I.6 : Plan du site après travaux, d'après LEROY J. (1993)</i>	11
<i>Figure I.7 : Précipitations journalières entre 1993 et 1999</i>	12
<i>Figure I.8 : Précipitations cumulées par 4 semaines</i>	12
<i>Figure I.9 : Relevé topographique, d'après VAGNER P. (1999)</i>	13
<i>Figure I.10 : Schéma d'implantation des piézomètres pour une tranchée, d'après VAGNER P. (1999)</i>	14
<i>Figure I.11 : Plan de situation des piézomètres, d'après FARKOUH B. (1994)</i>	15
<i>Figure I.12 : Niveaux piézométriques à l'amont des tranchées 1 et 2, d'après FARKOUH B. (1994)</i>	16
<i>Figure I.13 : Niveaux piézométriques à l'amont des tranchées 3 et 4, d'après FARKOUH B. (1994)</i>	17
<i>Figure I.14 : Niveaux piézométriques à l'amont des tranchées 5 et 6, d'après FARKOUH B. (1994)</i>	18
<i>Figure I.15 : Schéma de principe d'un tensiomètre, d'après VAGNER P. (1999)</i>	19
<i>Figure I.16 : Exemple de profil de succion – tranchée 4, d'après VAGNER P. (1999)</i>	20
<i>Figure I.17 : Coupe géologique type du site, d'après VAGNER (1999)</i>	20
<i>Figure I.18 : Comparaison des débits des tranchées</i>	21
<i>Figure I.19 : Schéma de principe du système de récupération du sol transporté, d'après FARKOUH B. (1992)</i>	22
<i>Figure I.20 : Photographie du dispositif de récupération du sol transporté</i>	22
<i>Figure I.21 : Courbe granulométrique de mars 1999, d'après VAGNER P. (1999)</i>	23
<i>Figure II.1 : Plan de situation des piézomètres visibles avant remise en état du site</i>	25
<i>Figure II.2 : Plan de situation des piézomètres à la fin des recherches du printemps 2009</i>	26
<i>Figure II.3 : Photographie des bacs de filtration calcifiés</i>	27
<i>Figure II.4 : Photographie du système de récupération du sol transporté après réparation</i>	27
<i>Figure II.5 : Photographie de la station totale SOKKIA SET.6</i>	28
<i>Figure II.6 : Plan topographique du site d'étude</i>	29
<i>Figure II.7 : Relevé piézométrique de la tranchée 2</i>	30
<i>Figure II.8 : Relevé piézométrique de la tranchée 3</i>	31
<i>Figure II.9 : Relevé piézométrique de la tranchée 4</i>	31
<i>Figure II.10 : Relevé piézométrique de la tranchée 5</i>	32
<i>Figure II.11 : Relevé piézométrique de la tranchée 6</i>	32
<i>Figure II.12 : Débits des tranchées de juillet 2008 à décembre 2009 et pluviométrie journalière</i> 33	
<i>Figure II.13 : Débits des tranchées de juillet 2008 à décembre 2009 et pluviométrie cumulée sur une semaine avant la mesure</i>	34
<i>Figure II.14 : Courbe granulométrique du prélèvement d'août 2009</i>	35
<i>Figure II.16 : Plan des tranchées à ausculter</i>	37
<i>Figure II.17 : Photographie du robot utilisé pour l'auscultation télévisuelle des drains</i>	37
<i>Figure II.18 : Photographie de la calcification des crépines de la tranchée 3</i>	38
<i>Figure III.1 : Pluviométrie cumulée sur une semaine, pour une même période d'étude selon les années</i>	39
<i>Figure III.2 : Pluviométrie cumulée sur une semaine, pour une même période selon les années.</i>	40

<i>Figure III.3 : Mesures des débits d'octobre 1993 à juin 1999</i>	41
<i>Figure III.4 : Mesures des débits de juillet 2008 à décembre 2009</i>	42
<i>Figure III.5 : Débits moyens des tranchées sur les deux périodes d'étude</i>	43
<i>Figure III.6 : Tableaux résumés des débits moyens de juillet à juillet de chaque année</i>	43
<i>Figure III.7 : Débits moyens de juillet à juillet de chaque année</i>	44
<i>Figure III.8 : Relevé piézométrique de la tranchée 2, pour la période 1993 à 1999, d'après VAGNER P. (1999)</i>	45
<i>Figure III.9 : Relevé piézométrique de la tranchée 2, pour la période de mai 2009 à décembre 2009</i>	45
<i>Figure III.10 : Relevé piézométrique de la tranchée 3, pour la période 1993 à 1999, d'après VAGNER P. (1999)</i>	46
<i>Figure III.11 : Relevé piézométrique de la tranchée 3, pour la période de mai 2009 à décembre 2009</i>	46
<i>Figure III.12 : Relevé piézométrique de la tranchée 4, pour la période 1993 à 1999, d'après VAGNER P. (1999)</i>	47
<i>Figure III.13 : Relevé piézométrique de la tranchée 4, pour la période de mai 2009 à décembre 2009</i>	47
<i>Figure III.14 : Relevé piézométrique de la tranchée 5, pour la période 1993 à 1999, d'après VAGNER P. (1999)</i>	48
<i>Figure III.15 : Relevé piézométrique de la tranchée 5, pour la période de mai 2009 à décembre 2009</i>	48
<i>Figure III.16 : Relevé piézométrique de la tranchée 6, pour la période 1993 à 1999, d'après VAGNER P. (1999)</i>	49
<i>Figure III.17 : Relevé piézométrique de la tranchée 6, pour la période de mai 2009 à novembre 2009</i>	49
<i>Figure IV.1 : Dispositif drainant d'un barrage argileux homogène, d'après DEGOUTTE G. et al (2002)</i>	52
<i>Figure IV.2 : d_{85} de la fraction fine d'un sol à granulométrie discontinue, d'après NF G 38-061(1993)</i>	53
<i>Figure IV.3 : Tableau de caractérisation du coefficient C_2, d'après NF G 38-061 (1993)</i>	53
<i>Figure IV.4 : Schéma explicatif de la méthode CARRON</i>	55
<i>Figure IV.5 : Un blindage de type léger, d'après BONNIOT M. (2009)</i>	56
<i>Figure IV.6 : Schéma de réalisation de la fouille et pose du blindage, d'après BONNIOT M. (2009)</i>	56
<i>Figure IV.7 : Schéma explicatif de la technique par pose de palplanches, d'après BONNIOT M. (2009)</i>	57
<i>Figure IV.8 : Photographie du dispositif de Hole Erosion Test, d'après BENHAMED N. et BONELLI S. (2008)</i>	59
<i>Figure IV.9 : Schéma du dispositif d'essai de filtration sur colonne avec suivi des gradients.</i>	60
<i>Figure IV.10 : Schéma en coupe transversale, du dispositif d'essai d'érosion transversale avec écoulement horizontal</i>	61
<i>Figures V.1 : Photographies des fossés</i>	62
<i>Figure V.2 : Plan de situation des fossés</i>	63
<i>Figure V.3 : Plan de repérage des capteurs enregistreurs de pression</i>	64
<i>Figure V.4 : Schéma des capteurs enregistreurs de pressions</i>	64
<i>Figure V.4 : Niveaux piézométriques mesurés par les capteurs de pressions et compensés</i>	65
<i>Figure V.5 : Comparaison entre les mesures à la sonde et les mesures au capteur de P2/5</i>	65
<i>Figure V.6 : Schéma du débitmètre automatique</i>	66