



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la  
communication DETEC  
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle  
comunicazioni DATEC

**Bundesamt für Strassen**  
**Office fédéral des routes**  
**Ufficio federale delle Strade**

# **Rétention des polluants des eaux de chaussées selon le système «infiltrations sur les talus». Vérification in situ et optimisation**

**Retention der Schadstoffe des Strassenabwassers  
durch das «über die Schulter Versickerungs-  
System». In situ Verifikation und Optimierung.**

**Road Runoff Pollutant Retention by Infiltration  
through the Roadside Slopes. In Situ Verification  
and Optimization.**

**Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)  
Laboratoire de géologie de l'ingénieur et de l'environnement  
(GEOLEP)  
Prof. Dr A. Parriaux  
Dr P. Piguet  
J. Zigliani**

**Mandat de recherche VSS 2001/203 sur demande de  
l'Association suisse des professionnels de la route et des transports  
(VSS)**

**août 2009**

**1253**

---

# Table des matières

1. Introduction	3
1.1 Etat du problème	3
1.2 Rappel du concept de l'infiltration sur les bas-côtés	3
1.3 Objectifs du projet	3
2. Conception de la station pilote	5
2.1 Critères de choix du site	5
2.1.1 Topographie	5
2.1.2 Géologie	5
2.1.3 Hydrogéologie	5
2.1.4 Pédologie	6
2.1.5 Génie civil	6
2.2 Admissibilité de l'infiltration sur ce site	8
2.2.1 Degré de pollution des eaux de ruissellement	10
2.2.2 Propriétés des sols	10
2.2.3 La zone non-saturée du substrat géologique	10
2.2.4 Secteur ou zone de protection des eaux	10
2.3 Conception de la station	11
2.3.1 Structure générale	11
2.3.2 Concept de mesure de la performance des banquettes	16
2.3.3 Concept de mesure de la performance des talus d'infiltration	16
2.3.4 Concept de mesure de l'effet sur les propriétés techniques de la chaussée	17
2.4 Expérimentation pratique du mode de construction	19
2.5 Contrôles après construction	20
2.5.1 Composition des sols remis en place sur les talus	20
2.5.2 Etat zéro de la pollution des sols	21
2.5.3 Granulométrie des banquettes	23
2.6 Effets induits par l'instrumentation	23
3. Conditions hydrogéologiques de la nappe souterraine	25
3.1 Extension de la nappe souterraine de l'Arnon	25
3.2 Régime d'écoulement, relation entre l'Arnon et la nappe	26
3.3 Résultats des essais hydrogéologiques effectués	30

---

4. Etude expérimentale	33
4.1 Stratégie de suivi	33
4.1.1 Suivi des événements hydrométéorologiques	33
4.1.2 Calcul du bilan hydrique et stratégie des mesures hydrauliques	33
4.1.3 Stratégie d'échantillonnage et de conservation des échantillons	36
4.1.4 Stratégie de suivi géotechnique	36
4.2 Evénements artificiels	36
4.2.1 Essai de pluie artificielle n°1	36
4.2.2 Essai de pluie artificielle n°2	38
4.2.3 Essai de pluie artificielle n°3	44
4.3 Evénements de pluie naturelle	44
4.4 Bilan du comportement hydraulique et chimique	45
4.4.1 Cas d'une pluie ordinaire	45
4.4.2 Autres comportements	47
4.4.3 Cas particulier des conditions hivernales	48
4.5 Localisation des polluants dans les sols	48
4.6 Emission pollutive et comparaison avec les normes	50
5. Résultat du suivi géotechnique de la chaussée	53
6. Synthèse sur le comportement de la station	55
6.1 Réponses aux objectifs fixés par le projet	55
6.2 Recommandations pratiques	56
6.2.1 Construction de la banquette	56
6.2.2 Construction du talus d'infiltration	59
6.3 Discussion des résultats obtenus sur la station expérimentale	60
6.3.1 A propos de l'étanchement par le géotextile bentonite	60
6.3.2 A propos de la banquette gravier – humus	61
6.3.3 A propos de la banquette gravier – argile	61
6.3.4 A propos de la structure du talus d'infiltration	63

---

7. Durabilité du système d'infiltration de 2003 à 2009	65
7.1 Cadre du suivi à long terme	65
7.2 Evolution du talus d'infiltration	65
7.2.1 Effets d'origine biologique	65
7.2.2 Effets liés aux déformations gravifiques du talus	67
7.3 Comportement hydrodynamique de la nappe sous la route	68
7.4 Evolution de la qualité des eaux	70
7.4.1 Emissions à la base du talus	70
7.4.2 Immissions dans la nappe souterraine	70
7.5 Evolution de l'étanchéité des banquettes	74
7.6 Conclusions sur le suivi	76
8. Conclusions	77
8.1 Problématique des banquettes	77
8.2 Problématique du talus d'infiltration	78
8.3 Problématique de géotechnique routière	78
8.4 Problématique de l'évolution du système à plus long terme	78
9. Bibliographie	81

---

Annexe I : Rapport de construction \*

Annexe II : Rapport pédologique \*

Annexe III : Rapport hydrogéologique\*

Annexe IV : Rappel sur les paramètres physico-chimiques \*

Annexe V : Calculs d'erreur \*

Annexe VI : Rapport Lavoc \*

Annexe VII : Evolution du talus d'infiltration

Annexe VIII : Suivi hydrogéologique

Annexe IX : Analyses chimiques

Annexe X : Comportement des banquettes et lysimètres

\* annexes non imprimées disponibles sur le cd-rom joint au présent rapport

# Résumé

## Objectifs

L'Office fédéral de l'environnement (OFEV) recommande, partout où c'est possible, d'infiltrer les eaux de chaussées sur les talus de la structure routière. Ce nouveau concept, qui modifie fondamentalement la philosophie de gestion des eaux des chaussées, devait être vérifié et affiné, afin de le mettre en pratique dans la construction routière. La présente recherche s'est fixée comme objectifs principaux :

- de déterminer comment ce système peut être mis en place dans un chantier routier réel, avec ses servitudes spécifiques
- de tester in situ différents types de banquettes qui assurent que l'eau de la chaussée parvient bien au talus d'infiltration, évitant aussi que trop d'eau ne se perde dans la fondation de la route et mette en péril sa structure
- de vérifier l'efficacité hydraulique et environnementale du talus d'infiltration tel que conçu dans les directives de l'OFEV.

## Méthodologie

Pour répondre aux objectifs fixés, une station expérimentale a été construite à l'échelle 1/1 sur un nouveau tronçon de route cantonale entre Grandson et Champagne. Le tronçon de route a été fractionné en plusieurs segments de 10 ou 20 m de longueur, afin de tester plusieurs sortes de banquettes. Deux lysimètres ont permis de déterminer la qualité des eaux à la base du talus d'infiltration. Un compartiment a été dédié à la quantification des immissions dans la nappe souterraine. Par une instrumentation très complète des compartiments d'essai, il a été possible de mesurer les pertes au travers des banquettes ainsi que les flux d'eau et de polluants dans tous les points stratégiques de la station. Un suivi du système à plus long terme a permis d'observer de 2003 à 2009 comment ont évolué les banquettes, le talus d'infiltration et la nappe souterraine.

## Résultats

La construction de la station a montré que le système est parfaitement implémentable dans un chantier de construction routière. La partie la plus délicate est la mise en place du talus d'infiltration avec ses deux horizons pédologiques. La construction des banquettes n'a pas posé de difficulté.

Parmi les différentes banquettes testées, celle qui assure l'étanchéité par un géotextile bentonite a été de loin la plus performante. Son imperméabilité presque parfaite la démarque nettement des autres banquettes. Elle ne montre pas de signe de vieillissement sur les huit ans d'observation. Sa propriété d'auto-colmatage explique ce résultat sur la durée. Une banquette faite d'un mélange gravier-argile a donné des résultats nettement moins bons, mais malgré tout supérieurs à toutes les autres solutions ; une érosion de sa fraction argileuse a été

constatée avec le temps. Une couverture de l'étanchéité géotextile bentonite par une couche de gravier-argile serait certainement une solution des plus performantes à long terme.

Les eaux collectées à la base du talus d'infiltration (lysimètres) ont bénéficié d'une épuration naturelle très importante. Le concept du talus à double couche montre son efficacité. Ceci se justifie d'autant plus qu'avec les années, les rongeurs ont fortement colonisé l'horizon supérieur (horizon A), faisant passer les écoulements d'une porosité d'interstices à une porosité de chenaux. Grâce à la présence de l'horizon B, la capacité d'épuration du sol n'a pas été significativement péjorée. Une légère reptation du talus a été également mesurée, sans effet majeur sur sa fonctionnalité.

Les immissions sur la nappe souterraine, mesurées par une comparaison entre les piézomètres en amont et en aval de la route, sont indétectables. Ce résultat conforte les observations sur les lysimètres.

### **Conclusion**

Le système d'infiltration sur les talus de la route peut être construit sans difficulté majeure. Il est performant sur les plans hydraulique et environnemental si les conditions hydrogéologiques s'y prêtent (sous-sol perméable, protection des eaux). L'étanchéité de la banquettes faisant la transition entre la chaussée et le talus joue un rôle fondamental sur l'efficacité du système et la stabilité de la fondation de la chaussée.

# Zusammenfassung

## Ziele

Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) empfiehlt, das Strassenwasser direkt auf Strassenböschungen versickern zu lassen, wo die Voraussetzungen dies erlauben ("über die Schulter" Versickerung). Dieses neue Konzept, welches die Philosophie des Managements des Strassenwassers grundlegend ändert, sollte überprüft und angepasst werden, um es anschliessend im Strassenbau umsetzen zu können. Die vorgelegte Studie hat folgende Hauptziele:

- Es soll bestimmt werden, wie dieses Konzept beim Strassenbau praktisch umgesetzt werden kann.
- Es wurden verschiedene in-situ Varianten von Bankette getestet, welche das Strassenwasser direkt auf die Strassenböschung lenken um dort zu versickern und somit zu verhindern, dass Wasser in das Fundament der Strasse eindringt und dieses gefährdet.
- Die Infiltrations-Böschung soll auf hydraulischen Wirksamkeit und Umweltverträglichkeit gemäss Richtlinien des BAFU überprüft werden.

## Methodik

Um die festgelegten Ziele zu erreichen, wurde auf eine neue Strecke der Kantonsstrasse zwischen Grandson und Champagne ein 1:1 Experiment aufgebaut. Der Strassenabschnitt wurde in mehrere 10 bis 20 m lange Segmente eingeteilt um verschiedene Arten von Bankette zu testen. Zwei Lysimeter erlaubten die Wasserqualität an der Basis der Infiltrationsböschung zu bestimmen. Ein Segment wurde installiert, um die Immissionen in den Grundwasserleiter zu quantifizieren. Mithilfe einer umfassenden Instrumentierung der Versuchsstation war es möglich, die Verluste durch die Bankette wie auch den Durchfluss des Wassers und der Schadstoffen in allen strategischen Punkten zu messen. Eine langfristige Weiterverfolgung des Versuches zwischen 2003 und 2009 ermöglichte, die Evolution der Bankette, der Infiltrationsböschung sowie des Grundwasserleiters zu beobachten.

## Ergebnisse

Das Erstellen der Versuchsstation hat gezeigt, dass das Versickerungs-System in einer Strassenbaustelle perfekt umsetzbar ist. Der heikelste Punkt stellt das Errichten der Infiltrationsböschung mit ihren beiden pedologischen Horizonten dar. Die Konstruktion der Bankette zeigte keine Schwierigkeiten. Unter den verschiedenen getesteten Bankette war jenes, welches die Abdichtung mittels Bentonit-Geotextil sicherte, bezüglich ihrer Undurchlässigkeit mit Abstand die leistungsstärkste. Es zeigte keine Alterserscheinungen während der Zeitspanne von acht Jahren. Ihre Eigenschaft der Selbstheilung erklärt ihre Langlebigkeit. Ein anderes Bankett, welches aus einem Kies-Ton-Gemisch besteht, zeigte

generell schlechtere Resultate, jedoch bessere als alle anderen Bankette. Erosion der Tonfraktion mit der Zeit wurde festgestellt. Eine Überdeckung der Bentonit-Geotextil Abdichtung mit einem Kies-Ton-Gemisch wäre langfristig sicherlich eine vorzügliche Lösung. Das gesammelte Wasser an der Basis der Infiltrationsböschung (Lysimeter) bevorzugte eine bedeutende natürliche Abwasserreinigung. Das Konzept der Zwei-Schichten-Böschung zeigte seine Effizienz, vor allem mit den Jahren: Nagetiere haben den A Horizont stark besiedelt und durch Wühlgänge eine sekundäre Porosität erstellt. Dank des B Horizontes wurde die Wirkung des Bodens bezüglich Abwasserbehandlung jedoch nicht wesentlich beeinträchtigt. Ein leichtes Kriechen der Böschung wurde gemessen, jedoch bis jetzt ohne ihre Funktionalität wesentlich zu beeinträchtigen. Es wurden Vergleichsmessungen in Piezometern stromauf- und stromabwärts der Strasse durchgeführt, um mögliche Immissionen in den Grundwasserleiter festzustellen. Es konnte jedoch keine Verunreinigung nachgewiesen werden. Dieses Resultat bestätigt die Lysimeter-Beobachtungen.

### **Schlussfolgerungen**

Das "über die Schulter" Versickerungssystem kann ohne wesentliche Schwierigkeiten konstruiert werden. Es ist hydraulisch und umweltverträglich leistungsstark wenn die hydrogeologische Bedingungen es ermöglichen (durchlässiger Untergrund, Grundwasserschutz). Die Abdichtung des Banketts, welches den Übergang zwischen Fahrbahn und Infiltrationsböschung darstellt, spielt eine wichtige Rolle bezüglich der Effizienz des Systems und der mechanischen Stabilität des Fundamentes der Strasse.

# Summary

## Objectives

The Federal Office for the Environment (FOEN) recommends the infiltration of road runoff water directly on the slope of the structure. This new concept, that modifies a lot the classical management of road runoff, had to be verified and optimized in order to implement it in the practice of road construction. The present research has the following main objectives:

- to determine how this system can be built in the frame of common construction works, taking into account their specificities
- to test in situ different kinds of shoulders which ensure that the main part of the runoff arrives to the infiltration slope and also preventing a too important infiltration of water in the structure (risk of instability)
- to verify the hydraulic and environmental efficiency of the infiltration slope as it is designed in the FOEN recommendation.

## Methodology

To achieve these objectives, an experimental station has been built at the scale 1/1 on a new cantonal road between Grandson and Champagne. This road was divided in several segments of 10 or 20 meters long, in order to test several kinds of shoulders. Two lysimeters have allowed to measure and sample the water after the infiltration through the soils of the slope. Another compartment was devoted to the quantification of immissions in the aquifer below the road. Due to the very complete monitoring, it was possible to measure the losses through the shoulders as well as the water and pollutant fluxes at all the strategic points of the station. An observation on a longer term allowed to check between 2003 and 2009 the evolution of the shoulders, the infiltration slope and the aquifer.

## Results

The construction of this pilot road showed that this infiltration system can be built as a normal road building operation. The finest part was the construction of the infiltration slope with its two soil layers. The building of the shoulders did not lead to difficulties.

Among the various types that were tested, the bentonitic geotextile shoulder obtained the best performance. Its almost perfect impermeability makes an impressive difference with the other shoulders. It does not show any performance reduction during the period 2003 and 2009. Its self-healing property is certainly responsible for this stability. A shoulder made of a gravel - clay mixture gave a much lower efficiency but still better than the other shoulder types. A progressive erosion of the clay fraction was observed. A cover of the bentonitic geotextile by a layer of a gravel-clay mixture would be certainly a very performing design for long term efficiency of the shoulders.

The water that was collected at the base of the slope soil (lysimeter) is much cleaner than the runoff. The natural improvement of the quality is due to the retention and biodegradation of the two layers of the slope. The need of the lower layer (B horizon) is also reinforced by the progressive colonization of rodents of the upper layer (A horizon). The dense galleries in this layer transform the granular porosity into a conduit porosity which is less performing for pollutant retention. Fortunately the cleaning potential of the infiltration slope is not significantly reduced, partially thanks to the B horizon. A slight creeping of the slope has been also measured, however without practical influence up to now.

By comparison between piezometers upstream and downstream of the road, no immission in the aquifer was noticeable. This fact is in agreement with the analyses in the lysimeters.

### **Conclusion**

The system of road runoff infiltration on the slope of the structure can be constructed without major difficulty. It is hydraulically and environmentally efficient if the hydrogeological conditions are favorable (permeable underground, groundwater protection). The impermeability of the shoulder that injures the transition between the pavement and the infiltration slope is a key point for the performance of the system and for the mechanical stability of the road structure.

## Préambule

Le présent rapport de recherche contient essentiellement les résultats du projet VSS 2001/203 déposé sous la forme de rapport provisoire au début 2007 auprès de la commission EK 027. Certaines divergences avec cette commission sur la manière dont a été construite la banquette gravier-argile et sur la longévité de la banquette étanchée à la bentonite ont retardé de deux ans la parution de nos conclusions.

Pendant ce temps, nous avons poursuivi les expérimentations sur le site avec l'appui du Service des routes du canton de Vaud et du Service des eaux, sols et assainissement du même canton, afin d'étudier quels sont les effets du temps sur l'évolution des performances des composants du système (programme "Durabilité" prévu sur 5 ans, soit de 2007 à 2012). Ces observations ont notamment concerné :

- l'étanchéité des banquettes à géotextile bentonite et gravier-argile
- l'évolution pédologique du talus d'infiltration
- les modifications de la perméabilité de ce talus
- le rendement de la rétention des polluants
- les immissions à moyen terme sur la nappe souterraine.

En effet, la durée du projet OFROU était insuffisante pour tester ces aspects de durabilité. Ce rapport contient donc un chapitre supplémentaire traitant spécifiquement de ces résultats récents (chapitre 7).



# 1 Introduction

## 1.1 Etat du problème

Pendant des décennies, on a géré le problème des eaux de chaussées routières en les collectant par des canalisations ou des caniveaux pour les acheminer à un point central où elles étaient souvent décantées et déshuilées, avant d'être envoyées dans les eaux de surface. Ce mode de construire a conduit à des perturbations importantes des cycles de l'eau locaux, à des débits de crue élevés dans les conduits d'eau de surface et finalement à des coûts considérables de construction d'infrastructure.

## 1.2 Rappel du concept général de l'infiltration sur les talus

L'évolution récente dans la gestion environnementale des eaux en contact avec les activités humaines tend au contraire à minimiser l'impact anthropique en recréant des conditions hydrologiques les plus proches possibles des conditions naturelles. Cette politique a été mise en pratique dans le cas des zones d'habitation et des routes où l'on cherche maintenant à faire retourner au sous-sol le plus rapidement possible les eaux pluviales, comme si les ouvrages n'existaient pas. Ce n'est possible bien sûr que si les eaux sont faiblement chargées en substances polluantes et si le substrat géologique permet l'infiltration. L'Office fédéral de l'environnement a édité une directive décrivant la manière de procéder (OFEFP 2002). L'Association suisse des professionnels de la protection des eaux (VSA) a de son côté rédigé un document similaire pour les eaux urbaines (VSA 2002 rév. 2004). Pour le cas des routes à trafic modéré, le système de l'infiltration sur les talus est considéré comme prioritaire.

## 1.3 Objectifs du projet

Bien que le principe du nouveau concept soit bien décrit et largement diffusé, il faut constater qu'il a beaucoup de peine à être mis en pratique. Ceci provient essentiellement de deux causes :

- Le mode de réalisation de l'infrastructure d'infiltration n'est pas encore suffisamment détaillé pour assurer son bon fonctionnement au niveau constructif. En particulier, la jonction entre la partie perméable au bord de la chaussée (banquette ou accotement) et le talus d'infiltration n'est pas encore résolue de manière fiable et pratique.
- La crédibilité du système vis-à-vis des ingénieurs de route n'a pas encore été démontrée de manière vraiment convaincante.

C'est ce double objectif que le présent projet s'est fixé. En d'autres termes, il doit :

- Proposer une ou des banquettes types optimales qui permettent d'assurer que la grande majorité de l'eau atteint le compartiment d'infiltration et ne s'infiltré pas dans la fondation de la chaussée.
- Démontrer que la construction d'un tel système est compatible avec un chantier de construction de route (types de machines, compétence des entreprises, complication minimum par rapport aux routes standard, coût modique etc.).
- Assurer que l'infiltration sur le talus ne péjore pas les performances techniques de la chaussée, de la banquette et du talus (portance, stabilité au glissement etc.).

Il est important de mentionner que cette recherche ne porte pas sur une optimisation du talus d'infiltration tel que prescrit par l'OFEV peu avant le démarrage du projet. Seule l'efficacité du concept est vérifiée par les observations in-situ, que ce soit au niveau des émissions (lysimètres) ou des immissions (nappe alluviale de l'Arnon).

Concernant la durabilité du système, le projet OFROU ne pouvait que l'estimer car cette recherche portait sur 2.5 années d'observation uniquement. C'est la raison pour laquelle le canton de Vaud a décidé de financer une poursuite allégée des observations sur la station de Grandson pendant 5 ans. Un accent particulier va être mis sur les phénomènes d'évolution de l'étanchéité des banquettes, sur la stabilité du talus et l'évolution de la macroporosité dans la couche infiltrante ou de phénomènes de colmatage.

## 2 Description de la station pilote

### 2.1 Critères de choix et conditions du site

Le site de Grandson a été choisi sur la base de plusieurs critères prioritaires exigés par les objectifs à atteindre :

- posséder un haut degré de représentativité afin de pouvoir généraliser le mieux possible les résultats obtenus sur la station (conditions topographiques, climatologiques et géologiques)
- être en présence d'une nappe souterraine dans un substrat géologique suffisamment perméable, pour tester le système au complet, y compris la recharge de l'aquifère
- être dépourvu de pollution routière antécédente (pour être complémentaire avec le projet Burgdorf qui étudie l'effet d'une longue histoire polluive d'origine routière)
- avoir des sols à disposition qui remplissent les critères précis fixés par la recommandation de l'OFEV
- présenter une opportunité d'une mise en place en synergie avec une nouvelle route à construire (partenariat avec le Service des routes vaudois qui a financé la construction de la station).

Le site de Grandson a été le meilleur des sites examinés en remplissant très bien les critères exigés.

Les conditions du site de Grandson sont les suivantes:

#### 2.1.1 Topographie

Le site se trouve sur le plateau bordant le Lac de Neuchâtel, dans une zone assez plane à une altitude de 450 m environ. Il borde la rivière Arnon (fig 2.1b)

#### 2.1.2 Géologie

Cette zone est façonnée dans les moraines du glacier du Rhône (fig 2.1a). A l'extrémité nord, la station est construite sur les alluvions de l'Arnon.

#### 2.1.3 Hydrogéologie

La moraine est riche en particules fines. Elle est ainsi très peu perméable. C'est pourquoi la partie de la station construite sur ces terrains ne donne pas lieu à une véritable infiltration ; deux lysimètres remplacent l'aquifère. Les alluvions de l'Arnon en revanche correspondent à un aquifère dans lequel l'infiltration est testée complètement (voir également annexe III).

### 2.1.4 Pédologie

Les sols dans cette zone morainique sont essentiellement des calcosols à granulométrie étendue. Pour la construction du talus d'infiltration (horizons A et B), c'est ce type de sol qui a été utilisé, prélevé lors de l'élargissement de l'autoroute près de la station. En effet, les analyses de ces sols ont montré qu'ils répondaient aux exigences fixées pour l'infiltration sur le talus (voir § 2.3). Les sols sur la partie alluviale n'ont pas été considérés.

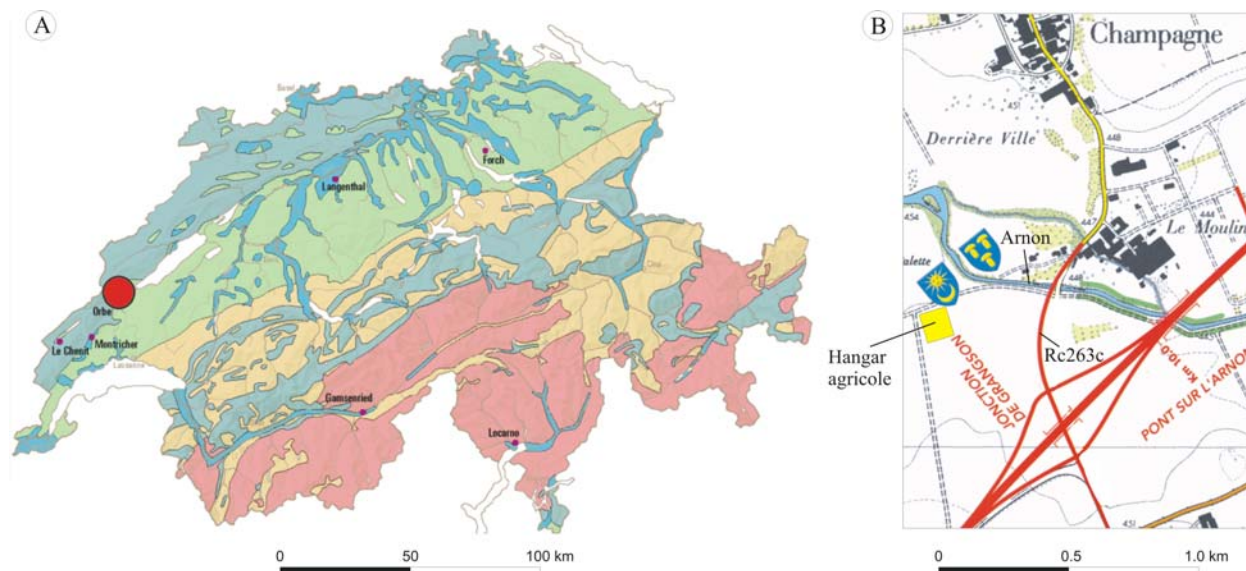


Figure 2.1: (A) Situation générale de la station de Grandson sur fond de la carte des sols de la Suisse : sols de type Jura (bleu), sols de type Plateau (vert), sols de type Préalpin (orange) et sols de type Alpin (rouge). Les sols de Grandson appartiennent au type Plateau, en bordure du Jura.

(B) Localisation de la station sur la RC263, entre la sortie « Champagnes » de l'A5 et l'Arnon. Notez la position du hangar agricole (en jaune) situé en amont du site expérimental. Le positionnement de ce site a une grande importance notamment en ce qui concerne la contamination des piézomètres amont (cf. figure 2.2b et chapitre 4).

### 2.1.5 Génie civil

La station pilote se greffe sur un nouveau tronçon de route cantonale construit en plein champ pour franchir l'Arnon par un nouveau pont (fig. 2.2). La route est ici sous la forme d'une rampe en remblai montant de 1 % vers le pont. Elle présente un léger dévers vers l'est. C'est pourquoi le talus d'infiltration est construit de ce côté du remblai. La route est munie d'une banquette particulièrement large pour construire un trottoir dans le futur. C'est sur cette bande que sont placées les différentes banquettes à étudier. Comme cet accotement doit correspondre à une banquette stabilisée, l'épaisseur des matériaux propres à chaque type est limitée entre 5 et 15 cm selon les cas. Ces couches sommitales reposent sur la grave de fondation. Le trafic est en moyenne de 2000 véhicules par jour depuis la mise en service de la route en août 2003 (fig. 2.3).

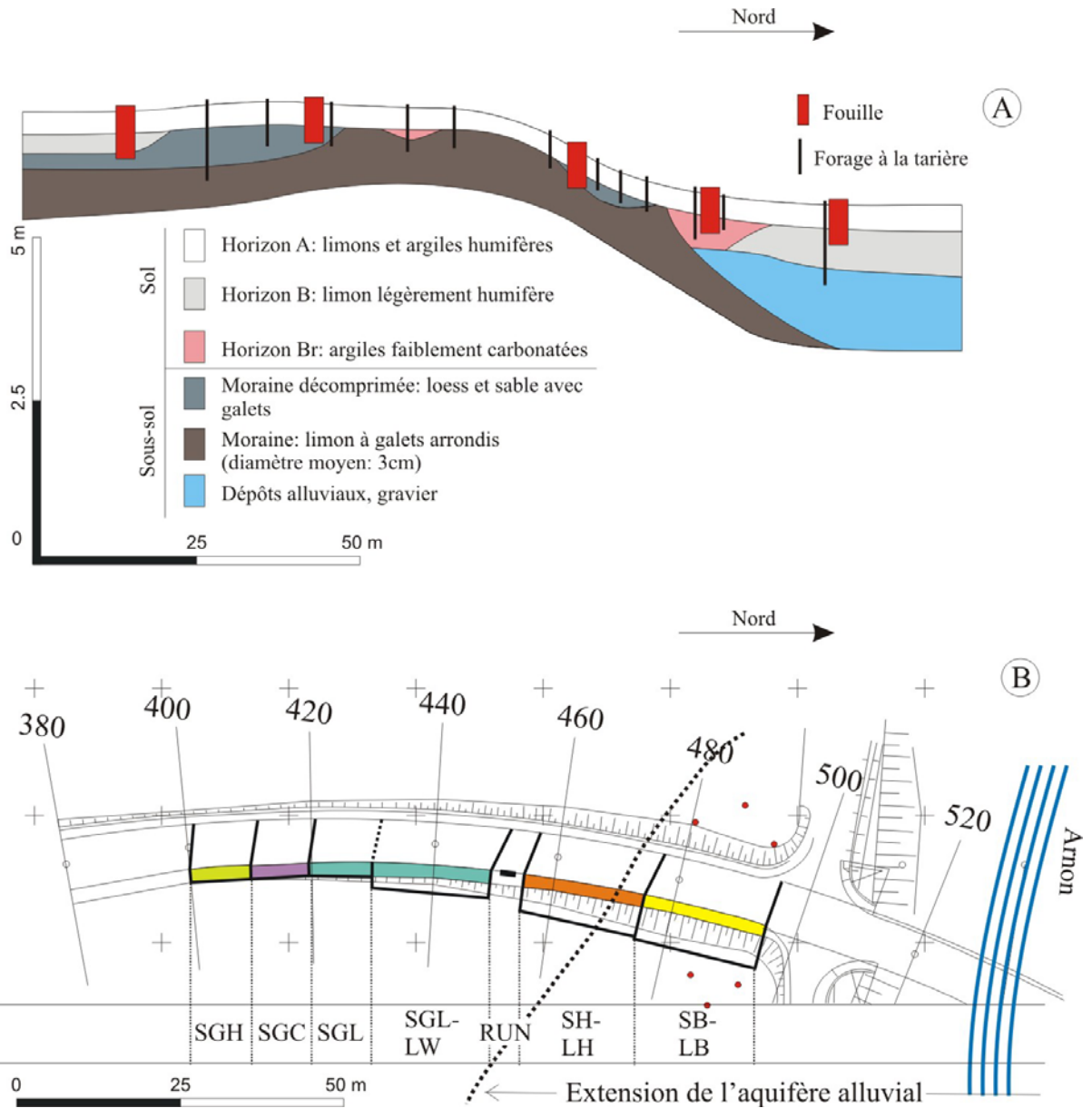


Figure 2.2: (A) Profil géologique longitudinal d'après les fouilles et sondages. L'aquifère alluvial est limité à l'extrémité nord de la station, n'autorisant l'essai d'infiltration complet jusqu'à la nappe que dans un seul tronçon. La moraine de fond est trop imperméable pour permettre une infiltration.

(B) Plan synthétique de la station avec ses segments d'essai en couleur : 3 segments de 20 m et 3 de 10m et la collecte du ruissellement en noir. Pour plus de détail et la signification des codes, voir le texte et la figure 2.4. Les nombres en haut de figure correspondent au repérage de l'axe de la route. La carte montre aussi la rivière Arnon (extrême droite), la limite de son aquifère (ligne pointillée). Les points rouges représentent les piézomètres.

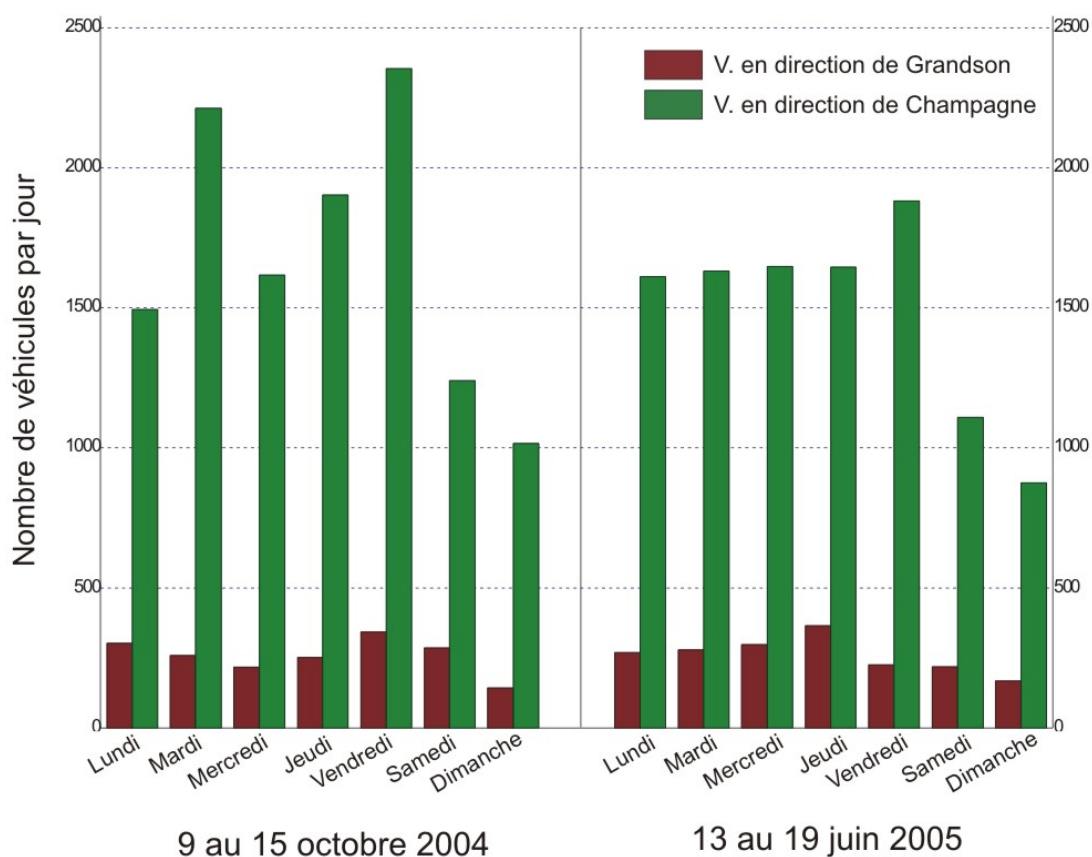
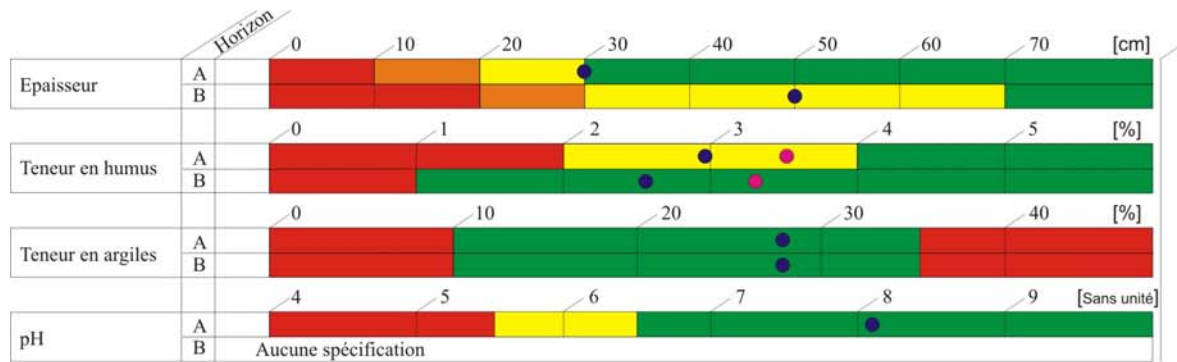


Figure 2.3: Variabilité journalière de la charge de trafic sur une semaine. Exemple d'une semaine en 2004, correspondant à la période de construction intense de l'autoroute avec un important trafic lié au chantier. Une semaine en 2005, soit après ces travaux, ne montre pas de différence quantitative manifeste. Le weekend, le trafic est réduit de quelque 40%. Une caractéristique très particulière de ce tronçon est la forte différence de trafic selon la direction: les 85 à 90% du trafic se fait direction Champagne, donc sur la voie proche des systèmes d'infiltration. Nous verrons plus loin l'effet de cette dissymétrie sur la déformation de la route (voir Ch. 5). Cette dissymétrie de trafic est due à des travaux importants dans les rues du village de Champagne.

## 2.2 Admissibilité de l'infiltration sur ce site

Les directives de l'OFEV basent l'admissibilité de l'infiltration sur le talus sur des critères de trafic (qui induit un degré de pollution des eaux de chaussée), de propriété des sols reconstitués dans le talus et de la zone non-saturée du milieu géologique en place. Ces critères sont résumés ci-dessous ainsi que dans la table 2.2) :



Structure du sol

- Insuffisante (Red)
- Minimale (Orange)
- Moyenne (Yellow)
- Optimale (Green)

Mesure à la construction contrôlé in situ en:

- 2003 (Blue dot)
- 2004 (Pink dot)

La structure du sol est considérée comme moyenne à cause d'un certain manque d'humus dans l'horizon A.

Vulnérabilité des eaux souterraines

Structure du sous-sol non saturé en eau (épaisseur > 1m)	Structure du sol			
	Optimale	Moyenne	Minimale	Insuffisante
zone non saturée de type a.	faible	faible	moyenne	élevée
zone non saturée de type b.	faible	<b>moyenne</b>	élevée	élevée
zone non saturée de type c.	moyenne	élevée	élevée	très élevée

Le site de Grandson est classé sous "autre secteur" de protection des eaux.

La charge de trafic est très basse, seulement 2000 véhicules par jour. Pour de plus amples informations sur le calcul du niveau de pollution, voir la directive 2002 de l'OFEFP.

Infiltration

Protection des eaux : zone / secteur	Vulnérabilité des eaux souterraines	Classe de pollution		
		faible	moyenne	élevée
Autre secteur	faible	admissible	admissible	admissible
	<b>moyenne</b>	<b>ADMISSIBLE</b>	admissible	admissible
	élevée	admissible	avec traitement	avec traitement
	très élevée	avec traitement	avec traitement	avec traitement
Secteur de protection A <sub>u</sub>	faible	admissible	admissible	admissible
	moyenne	admissible	admissible	avec traitement
	élevée	avec traitement	avec traitement	avec traitement
	très élevée	avec traitement	avec traitement	avec traitement
Zone de protection et périmètre		non admissible	non admissible	non admissible

Table 2.1: Logigramme vérifiant l'admissibilité de l'infiltration. Propriétés du sol, types de zone non saturée, niveau de pollution ainsi que la classification de protection des eaux sont exprimés en rapport avec l'admissibilité d'infiltration. Les types de zones non saturées sont : a) aquifère à sol argileux, b) aquifère à sol gréseux, c) aquifère fissuré

### *2.2.1 Degré de pollution des eaux de ruissellement*

Le degré de pollution est calculé d'après l'intensité et le type de trafic, la pente de la route et l'entretien de cette dernière. La transposition est exhaustivement décrite dans la directive OFEV 2002. Avec seulement 2000 véhicules par jour, le degré de pollution théorique est qualifié de faible.

### *2.2.2 Propriétés des sols*

Selon la directive OFEV, l'aptitude du sol dépend de quatre caractéristiques : l'épaisseur des horizons A et B mis en place sur le talus d'infiltration : nous avons choisi lors de la construction les épaisseurs des horizons correspondant à la limite entre l'épaisseur optimum et l'épaisseur moyenne (30 cm pour A et 50 cm pour B), afin de ne pas tester un cas évidemment surdimensionné.

- La matière organique : les sols à disposition contenaient 2.9 % et 2.6 % pour les horizons A, respectivement B lors de la construction (2003). On constate donc que l'horizon A correspond à une teneur moyenne selon les directives. L'horizon B en revanche présente des teneurs très favorables. Nous n'avons pas voulu augmenter artificiellement la teneur de l'horizon A puisque le but de cette recherche est de prouver la compatibilité du système avec des conditions réelles de construction routière. Il est à noter qu'un contrôle ponctuel fait une année après la mise en place a montré des teneurs supérieures.
- La teneur en argile : avec près de 30% d'argile, les deux horizons ont une teneur optimum.
- Le pH : légèrement au-dessus de 8, le pH est idéal.
- L'aptitude du sol utilisé est donc à considérer comme « moyenne » en raison de la matière organique.

### *2.2.3 La zone non saturée du substrat géologique*

Les recommandations prescrivent une épaisseur minimale de la zone non saturée de 1 m sous la base du sol. Ceci étant établi, on distingue ensuite trois types de zone non saturée sur la base de la composition géologique du substrat (terrain meuble, terrain fissuré, terrain karstique). Rappelons que dans la station de Grandson, l'infiltration en nappe n'a lieu qu'au droit du compartiment SB-LB puisque c'est la seule partie de la route qui est construite sur la nappe alluviale. La zone non saturée est constituée de graviers et de sables. On a observé à la construction la présence d'une couche de limons argileux de débordement peu perméables au toit de la zone non saturée. Cette couche a été perforée par neuf puits de gravier qui assurent la connexion avec les sables et graviers sous-jacents et la nappe.

### *2.2.4 Secteur ou zone de protection des eaux souterraines*

Selon le secteur ou la zone où se fait l'infiltration, celle-ci peut être autorisée, autorisée après traitement de l'eau ou interdite. Dans le cas de Grandson, le site est classé en « Autre secteur », c'est-à-dire une région pauvre en ressources en eaux souterraines.

En résumé, les exigences fixées par la recommandation de l'OFEV sont tout à fait remplies (cas le plus favorable), bien que les teneurs en humus de l'horizon A soient inférieures à l'optimum.

## 2.3 Conception de la station

La station est structurée de telle manière que l'on puisse comparer les performances de plusieurs types de banquettes (ou accotements), tester l'épuration de l'eau de ruissellement au travers du talus d'infiltration et l'infiltration dans l'aquifère. Pour ce faire, une structure optimale a été conçue pour permettre toutes ces comparaisons.

### 2.3.1 Structure générale

La station est divisée en tronçons de route (appelés aussi compartiments ou segments, photo 2.1) limités par des bandes hydrocarbonées en relief collées sur le tapis routier. Selon leur longueur, on distingue trois types de tronçons (fig. 2.4) :

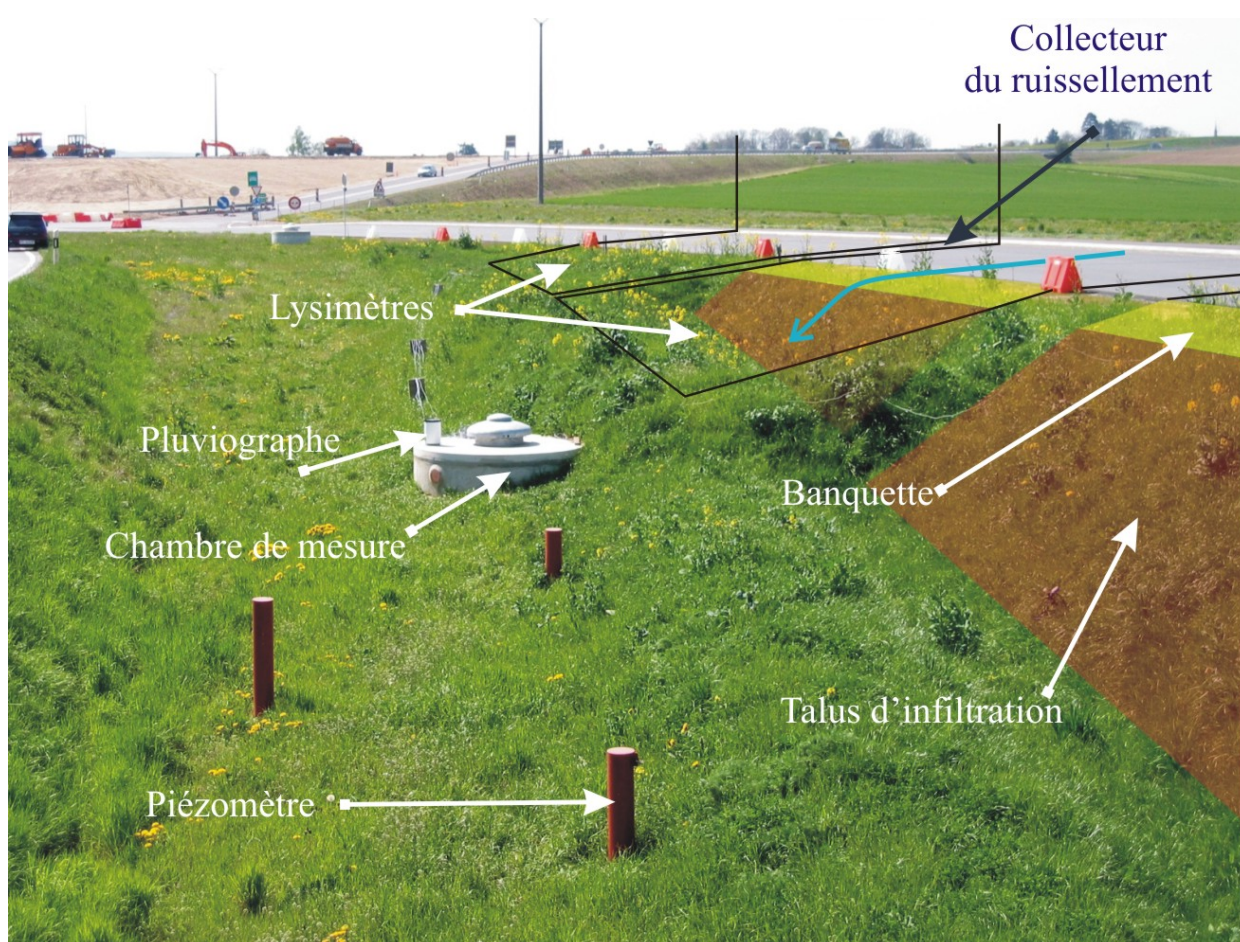


Photo 2.1: Photo de la station en direction du sud avec les limites de compartiments soulignées en traits noirs, les banquettes en jaune et les talus d'infiltration en brun-ocre. Les trois piézomètres avals sont visibles au premier plan, ainsi que la chambre de mesure n°2. La chambre n°1 est visible au loin.

- Tronçons longs (20 m) : ils sont destinés à tester deux systèmes d'étanchéité de la banquette : « HMF prolongé » (code SH) et « bentonite sodique » (code SB) par rapport à la banquette de référence « gazon - gravier » non étanchée (code SGL-LW). Cette dernière banquette est un élément indispensable pour pouvoir comparer l'efficacité des systèmes d'étanchement à une banquette standard. A noter que nous avons utilisé pour l'enrobé

bitumineux l'appellation ancienne HMF, qui correspond à la désignation récente « couche de fondation AC F » dans les normes de la VSS. Chaque segment est équipé d'un talus d'infiltration complet : deux en lysimètres (SH et SGL-LW) et un en contact avec la nappe (SB).

- Tronçons courts (10 m) : ceux-ci sont au nombre de trois. A part leur faible longueur, ils ont en commun le fait qu'ils possèdent tous un système de collecte de l'eau d'infiltration sous la banquette par une géomembrane et un collecteur perforé et qu'ils n'ont pas de talus d'infiltration. Un premier tronçon SGL reprend le système de banquette gazon – gravier du tronçon de référence SGL-REF mais cette fois avec collecteur des eaux d'infiltration, en vue de faire la comparaison entre la structure non drainée de SGL-REF. Deux autres tronçons ont été ajoutés a posteriori à la demande de la commission EK 2.07 de la VSS pour tester d'autres variantes de banquettes non étanchées : ce sont les banquettes « gravier – humus » (code SGH) et « gravier – argile » (code SGC).
- Tronçon de collecte du ruissellement : un segment d'une largeur de 5 m permet de collecter le ruissellement brut.

Rappelons quelques conditions fixées par le Service des routes du canton de Vaud en fonction de la route à construire, conditions qui ont influencé certains choix structurels de la station :

- le remblai à constituer sous la fondation était fait des marins des tunnels issus de l'autoroute en construction. Ce sont des graves d'excellente qualité, non typiques des remblais utilisés d'habitude sur le Plateau suisse.
- les accotements devaient être des banquettes stabilisées, c'est-à-dire supportant la charge d'un véhicule s'arrêtant sur le côté de la route. Cela implique que les couches supérieures de la banquette qui font l'objet du test sont relativement minces sur la grave de fondation.
- la banquette est particulièrement large (2m) puisqu'il est prévu d'y construire un trottoir ultérieurement.
- le matériau granulaire de base pour la constitution des différentes banquettes était la grave I utilisée pour la fondation de la chaussée et présente sur le chantier, issue du traitement des marins des tunnels. Les banquettes gazon – gravier (SGL), gravier – humus (SGH) et gravier – argile (SGC) ont toutes été structurées avec ce matériau. Pour le cas de la banquette gravier – argile, le mélange diffère donc de celui de la norme SN 640 744 pour la couche de roulement argileuse qui préconise une grave de granulométrie plus étendue. La présente norme a été publiée en 2005 et n'existait pas encore lors de la construction de la station. La teneur en argile a par contre été parfaitement respectée.

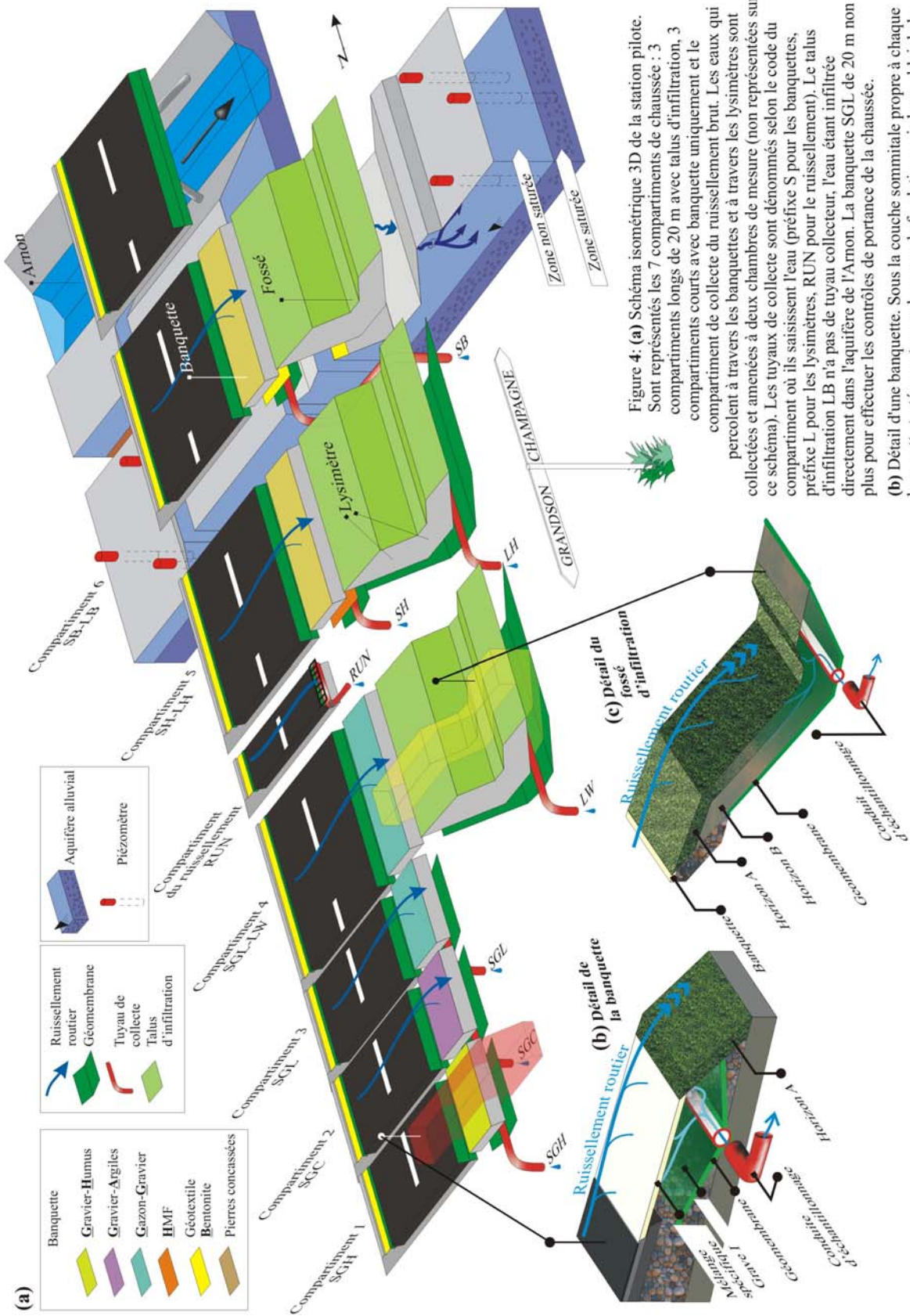


Figure 4: (a) Schéma isométrique 3D de la station pilote. Sont représentés les 7 compartiments de chaussée : 3 compartiments longs de 20 m avec talus d'infiltration, 3 compartiments courts avec banquette uniquement et le compartiment de collecte du ruissellement brut. Les eaux qui percolent à travers les banquettes et à travers les lysimètres sont collectées et amenées à deux chambres de mesure (non représentées sur ce schéma). Les tuyaux de collecte sont dénommés selon le code du compartiment où ils saisissent l'eau (préfixe S pour les banquettes, préfixe L pour les lysimètres, RUN pour le ruissellement). Le talus d'infiltration LB n'a pas de tuyau collecteur, l'eau étant infiltrée directement dans l'aquifère de l'Arnon. La banquette SGL de 20 m non plus pour effectuer les contrôles de portance de la chaussée.

(b) Détail d'une banquette. Sous la couche sommitale propre à chaque banquette testée, on trouve la grave de fondation puis le remblai de la route.

(c) Détail d'un talus d'infiltration équipé comme lysimètre, avec la transition depuis la banquette.

<p><b>Shoulder with Gravel and Lawn</b> (Banquette gazon - gravier)</p>	<p><b>SGL (20m)</b></p>	<p>Schéma sans échelle</p>
<p><b>Shoulder with prolonged HMF</b> (Banquette avec HMF prolongé)</p>	<p><b>SH</b></p>	<p>Schéma sans échelle</p>
<p><b>Shoulder with Bentonitic geotextile</b> (Banquette avec géotextile bentonitique)</p>	<p><b>SB</b></p>	<p>Schéma sans échelle</p>
<p><b>Shoulder with Gravel and Humus</b> (Banquette gravier - humus)</p>	<p><b>SGH</b></p>	<p>Schéma sans échelle</p>
<p><b>Shoulder with Gravel and Clay</b> (Banquette gravier - argile)</p>	<p><b>SGC</b></p>	<p>Schéma sans échelle</p>
<p><b>Shoulder with Gravel and Lawn</b> (Banquette gazon - gravier)</p>	<p><b>SGL (10m)</b></p>	<p>Schéma sans échelle</p>

Figure 2.5: Banquettes : dénomination, schémas et brève description des cinq différents concepts de banquettes. La même dénomination s'applique aussi aux conduites de collecte (la conduite appelée SGL se rapporte à la banquette de 10 m, le segment SGL de 20 m n'en étant pas pourvu). Les banquettes SGL 20m, SH et SB sont connectées à un talus d'infiltration selon la directive OFEFP.

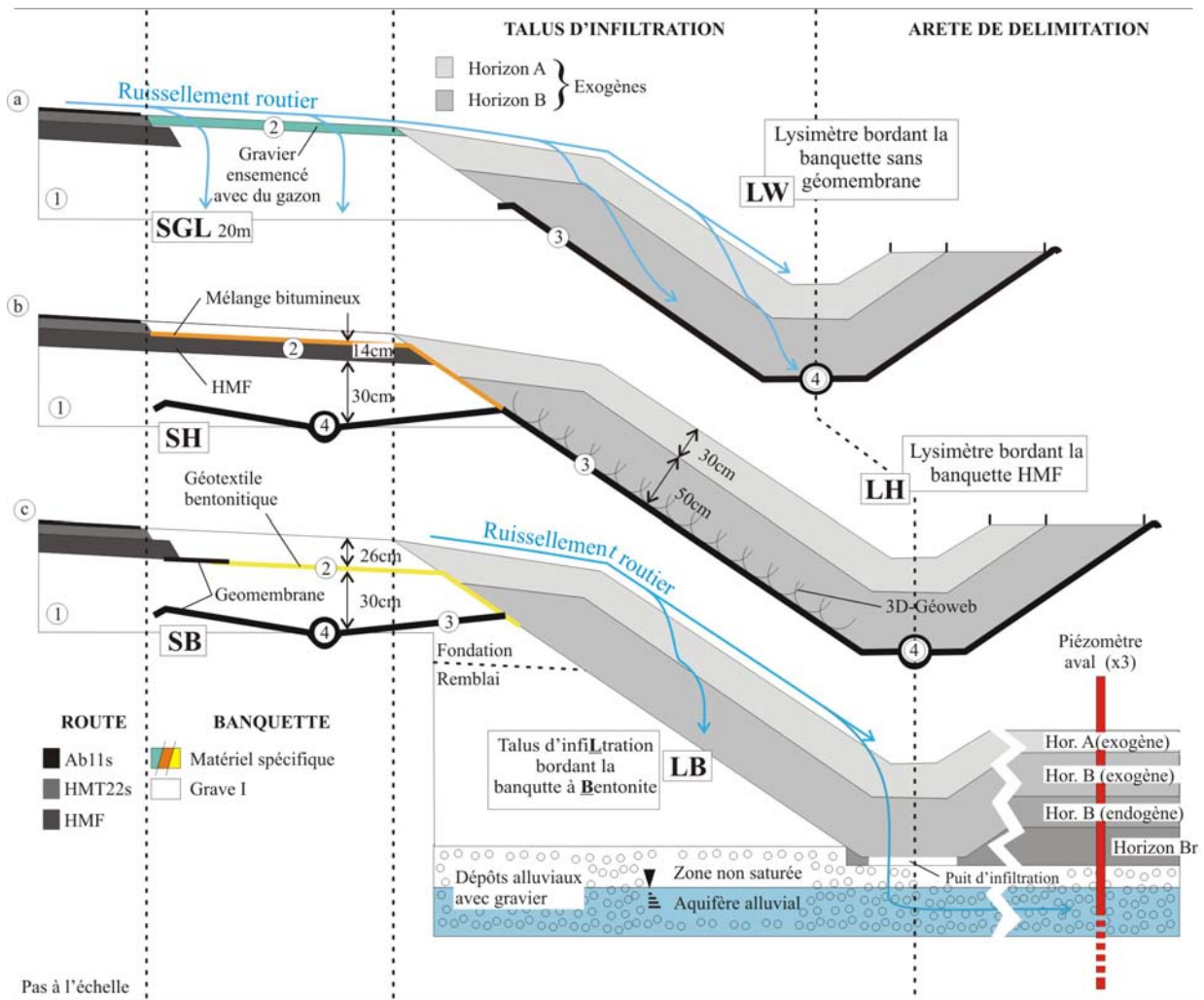


Figure 2.6: Profils schématiques des trois compartiments complets SGL-LW, SH-LH, et SB-LB. Matériaux utilisés : (1) Gravel I; (2) Matériau d'étanchement; (3) Géomembranes; (4) Collecteurs. Les acronymes de dénomination sont en caractères gras.

(a) **SGL** (20m) et lysimètre **LW** couplés. Ce compartiment représente le cas le plus simple où la banquette qui conduit l'eau au talus - lysimètre n'est pas étanchée.

(b) **SH** et lysimètre **LH** couplés. Ce compartiment présente une étanchéité par HMF prolongé et coulis bitumineux pour amener l'eau au talus - lysimètre.

Pour la construction du lysimètre, à cause du risque de glissement sur la géomembrane basale (3), un filet 3D (« Géoweb ») a été placé sur la géomembrane (voir photo 2).

(c) **SB** et talus d'infiltration **LB** couplés. Ce compartiment teste une étanchéité à la bentonite avant d'infiltrer l'eau sur le talus puis dans le substrat géologique. A cause de la présence d'un horizon Br à faible conductivité hydraulique, de petits massifs de gravier ont été mis au travers de la couche pour permettre à l'eau d'atteindre l'aquifère.



Photo 2.2: profil rugueux « GEOWEB » mis en place pour réduire le risque de glissement du talus sur la géomembrane du fond du lysimètre

### *2.3.2 Concept de mesure de la performance des banquettes*

A l'exception de la banquette de référence « gazon - gravier » de 20 m, toutes les banquettes possèdent un système de collecte de l'eau qui les aurait traversées par infiltration. Cette collecte se fait par une géomembrane (lés d'étanchéité) à la base de la fondation, de forme concave, et un tuyau perforé qui achemine les eaux à une chambre de rassemblement pour la mesure du débit et les prélèvements pour analyse. On est ainsi en mesure de contrôler pour chacun des 5 types de banquettes (les deux étanchées et les trois non-étanchées) le débit de percolation et la qualité de l'eau qui a traversé ces banquettes.

### *2.3.3 Concept de mesure de la performance des talus d'infiltration*

Les talus d'infiltration sont testés dans les deux lysimètres identiques couplés aux banquettes « gazon - gravier » et « HMF prolongé ». A la base du lysimètre, sur la géomembrane inférieure, l'eau est collectée par un tuyau perforé qui amène les eaux à la chambre de rassemblement où l'on mesure l'hydrogramme et échantillonne les eaux de percolation à travers les sols reconstitués (horizons A et B).

Le troisième talus infiltrant est lui testé dans une chaîne plus complète au droit du segment « bentonite sodique » puisque l'eau qui a traversé le talus s'infiltré directement dans la zone non saturée de l'alluvion de l'Arnon, puis dans la zone saturée. Ici, ce n'est plus une émission que l'on mesure mais directement une immission sur la nappe de l'Arnon au moyen du réseau

piézométrique. Les tubes en amont de la route permettent en effet de déterminer le différentiel aval – amont.

En résumé, l'instrumentation permet de mesurer en continu les débits traversant les banquettes et les lysimètres (déversoirs et jauges de pression) et de prélever des échantillons à tout moment pour analyse de la qualité de l'eau.

#### *2.3.4 Concept de mesure de l'effet sur les propriétés techniques de la chaussée*

La nouvelle conception d'infiltration sur les côtés est motivée par des considérations hydrologiques et environnementales. Il y a lieu cependant de vérifier qu'il n'y a pas d'impact négatif significatif sur les propriétés techniques de la route. En particulier, on peut craindre a priori que de l'eau chemine depuis la pente d'infiltration dans la fondation de la route ou dans le terrain sous-jacent (remblai ou terrain naturel en déblai). Ce transfert d'eau pourrait se faire en zone non saturée par succion ou en zone saturée par l'apparition de nappes perchées au contact remblai – fondation. Or, on sait qu'une augmentation de teneur en eau sous une chaussée peut causer des pertes de portance se manifestant par des déflexions en surface, voire à des glissements de terrain. La sensibilité au gel s'en trouve également augmentée. Il s'agissait donc dans ce projet expérimental de mesurer si les déflexions mesurées sur la chaussée étaient normales ou si elles étaient augmentées par l'infiltration. La résolution de cette question a été entreprise en collaboration avec le Laboratoire des voies de circulation de l'EPFL (LAVOC) qui a produit un rapport complet sur cette question. Ce rapport est l'objet de l'annexe VI dont nous extrayons ici quelques éléments principaux.

Cette problématique a nécessité une infrastructure de mesure et un monitoring particuliers :

- Déflectomètre LVDT : ancrées à la base du remblai, ces sondes permettent d'enregistrer la variation de la distance entre l'ancrage et la chaussée. Trois sondes ont été placées au droit des trois tronçons longs. Le segment SGL-REF, non équipé de collecte d'eau des banquettes, permet de le comparer aux segments équipés d'une étanchéité (SH et SB). Malheureusement, les sondes installées par le LAVOC n'ont fonctionné que trois mois avant de tomber irrémédiablement en panne.
- Trois campagnes de mesure au « falling weight » : cette technique sismique provoquée permet de mesurer de manière indirecte le module d'élasticité des couches superficielles de la chaussée d'une part, de la fondation et du remblai d'autre part. Le module d'élasticité, corrélé avec la portance de la chaussée, est inversement proportionnel à la déflexion. Les mesures sont faites au droit de la roue droite des véhicules, à 1 m de la banquette. La première campagne correspondait à des conditions plutôt sèches d'automne, la deuxième à des conditions plus humides de printemps et enfin la troisième à des conditions d'arrosage intensif de la chaussée après un essai d'infiltration artificiel.
- Campagnes de nivellement : la déformation altitudinale de la chaussée a été mesurée peu après les campagnes de « falling weight ». Ont été mesurés des points sur la trajectoire de la roue droite, sur la ligne médiane de la route et en face, sur la bordure du trottoir.

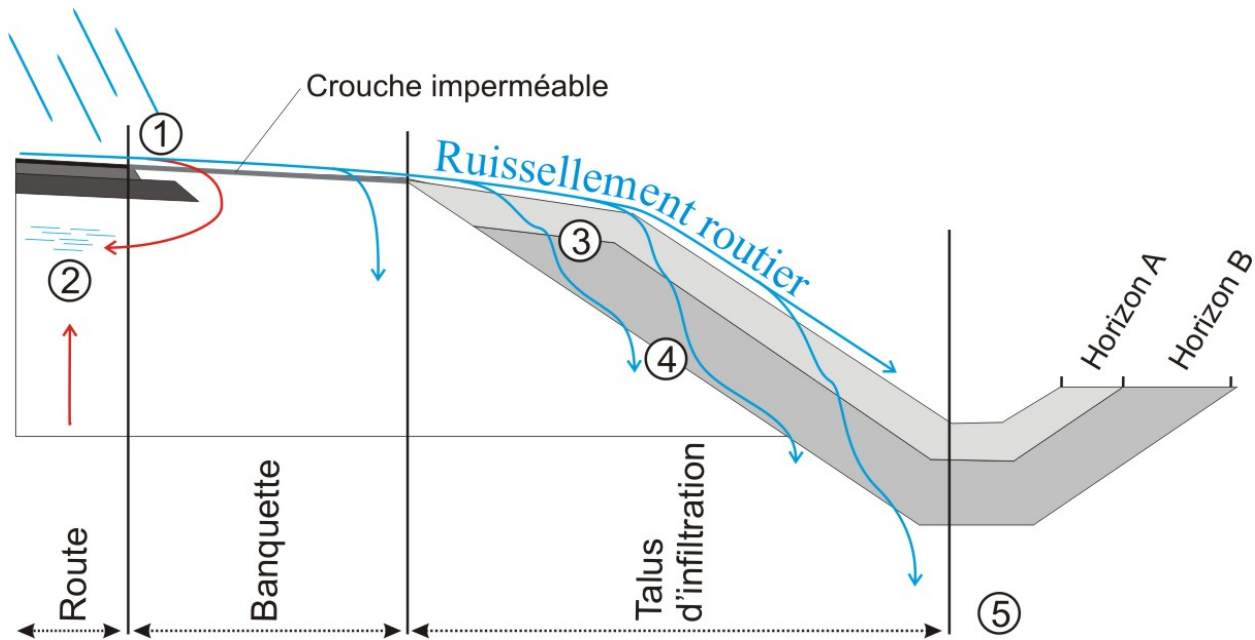


Figure 2.7: Risque géotechnique sur la portance de la fondation de la route créé par l'infiltration d'eau à travers la banquette et le talus. Idéalement, le ruissellement (flèches bleues) doit s'infiltrer dans le talus d'infiltration, franchir les interfaces horizon A – horizon B (3) et horizon B – remblai (4) afin d'être épuré avant d'atteindre l'aquifère (5). La banquette doit ainsi être la plus étanche possible (1) pour éviter une infiltration directe dans la fondation de la route qui pourrait créer une nappe perchée (2). Une montée excessive de la nappe principale (5) pourrait entraîner des montées capillaires dans le remblai et causer des pertes de portance et une diminution de la résistance au glissement des talus.

Un endroit particulièrement délicat est le point triple au contact de la fondation, du remblai et du sol infiltrant du talus (fig. 2.7). C'est à cet endroit névralgique que l'on a généralement un contraste de perméabilité et que de l'eau pourrait provenir de la banquette et du talus. Une nappe temporaire pourrait s'établir dans la base de la fondation. Cette zone a été instrumentée par des tensiomètres afin de déterminer les directions de flux possibles.

Un point particulier est à souligner dans la conception de la station afin d'identifier un éventuel effet géotechnique négatif. Les banquettes sont munies à leur base d'une géomembrane et d'un tuyau de collecte pour mesurer la quantité d'eau qui les traverse (fig. 2.5). Or, ce tuyau perturbe l'observation géotechnique puisqu'il fonctionne également comme un drain, empêchant l'eau de parvenir dans la fondation. C'est pourquoi une des banquettes n'est pas équipée de ce système pour pouvoir mettre en évidence un éventuel effet géotechnique : c'est la banquette « gazon-gravier » de 20 m de longueur.

## 2.4 Expérimentation pratique du mode de construction

La construction de la station a été une expérience en elle-même puisqu'un des objectifs du projet était de déterminer comment le système d'infiltration sur les talus était commode à construire dans le cadre d'un chantier routier conventionnel. La construction a été conduite par l'entreprise JPF, sous l'égide des ingénieurs du Service des Routes du canton de Vaud (SR), et avec la collaboration des collaborateurs du GEOLEP. Deux types d'éléments nouveaux devaient être construits :

- des banquettes étanchées par HMF prolongé (SH) et par géotextile bentonite sodique (SB)
- le talus d'infiltration avec ses horizons pédologiques A et B.

Il faut être attentif au fait que de nombreux éléments ont été construits spécifiquement pour l'expérimentation, mais n'existeront pas dans la phase opérationnelle. C'est le cas des lysimètres (compartiments SH et SGL-LW), des géomembranes de collecte des eaux à la base de la banquette et de leurs tuyaux perforés.

Le détail de la construction a fait l'objet du rapport 1 « Conception, planification, construction de l'installation pilote » Geolep 2004, annexe I, ainsi que d'une présentation au stand de la Suisse au Congrès mondial de la route à Durban. L'expérience a montré que les éléments fondamentaux n'ont pas causé de difficulté majeure. En résumé :

- La pose de l'étanchéité par HMF prolongé est une mesure extrêmement aisée puisqu'il a suffi d'agrandir sur la machine la largeur de la bande de HMF de la chaussée.
- L'étanchéité par le géotextile bentonite, bien qu'utilisée souvent dans le domaine du captage de sources ou les sites contaminés, était peu connue dans le domaine routier. Sa mise en place a été un peu plus longue mais s'est très bien déroulée. Rappelons que l'opération consiste déjà à mettre en place une bande de géomembrane d'environ 50cm de large sur la grave de fondation, en bordure de la chaussée. Le HMF est posé sur le tiers intérieur de cette bande. Puis, le géotextile - bentonite est déroulé contre le bord du HMF, sur les 2/3 externes de la géomembrane puis sur la grave de fondation, couvrant ainsi la banquette et le haut du talus jusqu'au niveau inférieur de la fondation, au contact avec le remblai. Il est à noter que cette construction pourrait être encore nettement facilitée en ayant à disposition des rouleaux de géomembrane et de géotextile directement adaptés à la géométrie de la route, ce qui n'était pas le cas dans la station pilote.
- La mise en place des horizons B puis A au fur et à mesure de la construction du talus d'infiltration s'est révélée assez complexe et délicate. Le respect de l'homogénéité du sol, de la constance de l'épaisseur, de sa compacité n'est pas évident. Les conditions de mise en place ont été suivies par deux experts pédologues (M. Gratier (SESA) et Mme Dupasquier (PODSOL)). A la suite de discussions avec les professionnels du SR (service des routes vaudois), il a été décidé de compacter légèrement l'horizon B, ceci afin de s'assurer de la stabilité du talus. Des illustrations de la mise en place sont présentées en annexe I. L'opération a été surtout compliquée dans le cas des talus sous forme de lysimètres car la géomembrane à la base du système jouait le rôle de plan de glissement.

Nous avons dû superposer à la membrane des profils rugueux (photo 2.2) pour éviter l'instabilité. Cette mesure ne sera pas nécessaire en phase opérationnelle.

## 2.5 Contrôles après construction

Des contrôles ont porté essentiellement sur les sols mis en place sur le talus et sur la granulométrie des banquettes.

### 2.5.1 Composition des sols remis en place sur les talus d'infiltration

Les sols sur moraine utilisés pour le talus d'infiltration ont été analysés d'abord avant leur mise en place, afin de définir leur compatibilité avec le concept d'infiltration (voir § 2.3). Des vérifications et des investigations complémentaires ont été faites en septembre 2003 sur l'un de ces talus d'infiltration (LH) fraîchement construit. Leur analyse par les techniques granulométriques, par infiltrométrie à triple anneau et enfin par rétractométrie permet de dresser une liste complète de leurs caractéristiques en place (table 2.2). Il en ressort :

- que la forte teneur en argile est bien vérifiée avec une variabilité de 25 à 30 % en poids et qu'elle caractérise aussi bien les horizons A que B (12 échantillons)
- que les deux horizons se différencient bien par la fraction supérieure à 2mm : l'horizon B est plus grossier (voir annexe II)
- les conductivités hydrauliques à saturation ont été déterminées par deux techniques. Avec l'infiltromètre à succion, on obtient des conductivités hydrauliques moyennes dans l'horizon A ( $3$  à  $6 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$ ), plus dispersées dans l'horizon B ( $5 \cdot 10^{-7}$  à  $9 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$ ). Avec l'infiltromètre à double anneau, on obtient des valeurs de  $6 \cdot 10^{-6}$  to  $3 \cdot 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$  pour l'horizon A. Rappelons que cette dernière intègre l'effet de la macroporosité au contraire de l'infiltromètre à succion qui ne décrit que la porosité de matrice du sol.
- Les échantillons ont été analysés par rétractométrie. On observe que les sols de la partie basse du talus ont une meilleure stabilité, ce qui doit traduire logiquement une compaction naturelle supérieure.

Des analyses géochimiques ont été menées sur les sols remis en place (table 2.2). On peut notamment remarquer :

- la capacité d'échange cationique ne montre pas de réelle différence entre les deux horizons avec une valeur moyenne de  $5.2 \text{ cmol}^+/\text{kg}$  (logique si l'on se souvient qu'ils ont pratiquement la même teneur en matière organique et en argile)
- la matière organique est bien dégradée (rapport C/N entre 9 et 11).

Des tests en colonnes menés sur le sol du lysimètre du segment SH donnent des renseignements complémentaires sur son fonctionnement dans le talus. Les résultats sont disponibles dans le rapport « Essais en colonne » de M. Docourt, 2004 (GEOLEP, document .pdf sur demande). Les principaux résultats de ce travail sont incorporés dans le présent rapport.

	A-horizon (2003)	A-horizon (2004)	B-horizon (2003)	B-horizon (2004)
Hydraulic conductivity [ $\text{ms}^{-1}$ ]	Suction: $3\text{-}6 \cdot 10^{-6}$ Double-ring: $6 \cdot 10^{-6}$ to $3 \cdot 10^{-4}$	$10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-7}$ to $9 \cdot 10^{-6}$	$10^{-5}$
pH	8.2	7.9	8.25	8
TOC [%]	1.7-2	2-2.2	1.5-1.7	1.9-2.2
OM [%]	2.9-3.5	3.5-3.8	2.6-2.9	3.3-3.8
CEC [ $\text{cmol}^+/\text{kg}$ ]	5.2	5.2	-	-
C/N [no unit]	9-11	9-11	-	-

Table 2.2: Caractéristiques principales du sol. Des différences apparaissent entre 2003 (peu après l'ouverture de la route) et 2004 (vérification un an après). Ces différences concernent notamment la maturation des sols (horizon A et B plus riches en humus et TOC plus élevé).

### 2.5.2 Etat zéro de la pollution des sols

Tous les métaux lourds analysés, à l'exception du cuivre, sont en-dessous de la limite de détection analytique (ICP-AES) (limites de détection: Cd: 0.005mg/L, Cu: 0.005mg/L, Ni: 0.020mg/L, Pb: 0.100mg/L, Zn: 0.010mg/L, Cr: 0.020mg/L). Les résultats concernant le cuivre sont situés entre 0.06 et 0.15 mg/kg de sol ; ces valeurs sont largement inférieures à la valeur indicative de l'Osol, qui est de 40 mg/kg de sol pour le cuivre.

Les teneurs inférieures au seuil de détection sont surprenantes : il est fréquent en Suisse de trouver un fonds géochimique élevé. Une très faible teneur en métaux lourds à l'état initial est une bonne chose dans la mesure où elle permet de maximiser le rapport signal/bruit de l'expérimentation. Il faut toutefois noter les éléments suivants :

- l'analyse étant sous le seuil de détection, le fonds géochimique reste inconnu (on peut simplement l'indiquer comme inférieur à la sensibilité de la mesure) ;
- il convient de calculer si le signal a priori enregistré ultérieurement (c'est-à-dire la charge polluante théoriquement infiltrée après un temps T de fonctionnement du dispositif) sera supérieur ou non à la sensibilité de la mesure ;

### 2.5.3 Granulométrie des banquettes

Afin de lever un doute exprimé par quelques membres de la Commission d'expert EK 2.07 de la VSS sur la composition effective des banquettes, 16 échantillons y ont été prélevés pour analyse granulométrique. Dix échantillons proviennent de la couche superficielle des banquettes SGH, SGC et SGL (0 à 5 cm), six échantillons pris un peu plus profondément (entre 5 et 10 cm). Ils correspondent à la situation après une année de fonctionnement de la route. Pour ne pas compromettre l'intégrité des banquettes, nous avons limité le volume des échantillons à environ 2 l/échantillon. Avec un si faible volume, il faut être conscient qu'il n'est pas possible d'assurer une précision suffisante dans les fractions grossières. C'est la raison pour laquelle nous avons analysé uniquement la fraction fine et que celle-ci est ensuite rapportée au volume total de l'échantillon. Les teneurs obtenues sont donc à considérer comme des ordres de grandeur.

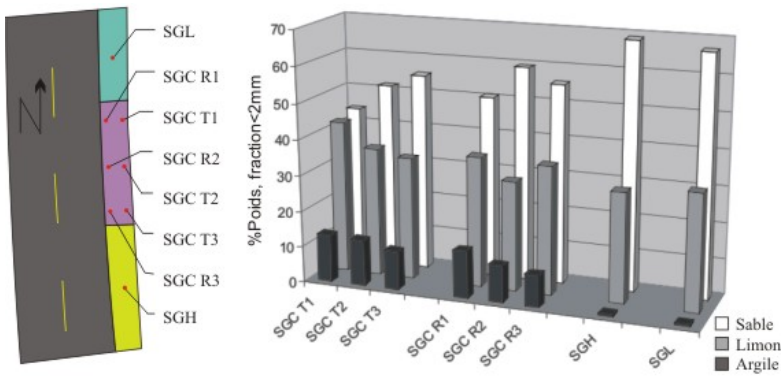


Figure 2.8: Contrôle granulométrique des banquettes de 10m, un an après construction. L'accent est mis sur la banquette SGC (en violet) afin de montrer la migration des argiles. Les prélèvements R sont côté route, T côté talus. La granulométrie de la banquette Gazon - gravier (bleu) et Gravier - humus (jaune) est donnée à titre de comparaison.

Des courbes granulométriques (fig. 2.9), on constate que toutes les banquettes testées respectent leurs caractéristiques fixées à la construction, à l'exception de la banquette gravier - argile (SGC) qui présente une nette diminution de la teneur en fines : au lieu des 6 % d'argile mis en place, on n'a retrouvé que 2.5-3.5 % (fig. 2.8, 2.9). Cet appauvrissement en argile de la banquette provient d'une érosion par les eaux de ruissellement qui ont emporté les plaquettes

d'argile par transport en suspension (fig. 2.8). De l'argile a du reste été trouvée dans le déversoir dans la chambre de mesure et au pied du talus d'infiltration. Des particules argileuses ont certainement migré également par percolation dans la couche de grave I au-dessous de la couche gravier - argile. Il est donc évident que la performance de cette banquette au point de vue de sa perméabilité est aujourd'hui fortement diminuée de ce fait.

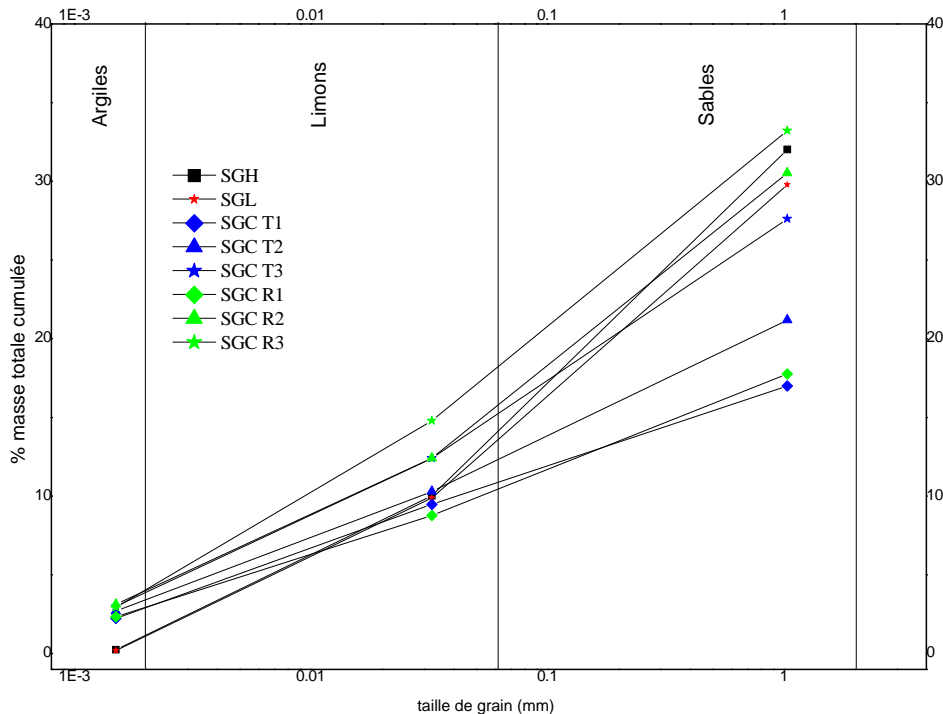


Figure 2.9: Granulométrie de la fraction fine des 3 banquettes de 10m (SGH, SGC et SGL) rapportée en pourcentage de la masse totale. SGH et SGL ne contiennent pratiquement pas d'argile. SGC en contient de 2.5 à 3.5 %. Se référer à la figure 2.7 pour la répartition spatiale sur la banquette.

## 2.6 Effets induits par l'instrumentation

Il convient de rappeler que, de la route au talus d'infiltration, les éléments suivants sont installés uniquement dans un but de suivi expérimental et ne seront pas présents sur une route réelle :

- les bandes de peintures séparant les compartiments
- les tuyaux de collecte sous-banquette et sous-lysimètre et toute la tuyauterie d'évacuation des eaux de ruissellement, y compris les chambres de collecte
- les géomembranes SARNAFIL sous-banquette et sous-lysimètre
- Le GEOWEB stabilisant la pente du talus d'infiltration
- Les puits d'infiltration remplis de gravier sous le talus d'infiltration du compartiment en nappe. Ces derniers ont pour but de favoriser l'infiltration au travers de la zone non saturée très peu perméable. Aucun effet secondaire néfaste n'est attendu.

L'utilisation de ces divers éléments comporte des effets secondaires qu'il est bon de remémorer :

- les bandes de peintures comportent des éléments métalliques et sont soumis, par les véhicules et la météorologie, à une érosion prononcée.
- Les tuyaux de collecte agissent comme des drains, augmentant le gradient de charge et favorisant ainsi la vidange des banquettes et talus (lorsque équipés d'un tuyau). L'effet drainant est néanmoins confiné à la proximité immédiate du tuyau perforé.
- Les géomembranes ont essentiellement pour effet pervers de favoriser les glissements de sol sur les talus d'infiltration, de par leur très faible rugosité. Cet effet a eu pour réponse la pose du GEOWEB. Le GEOWEB perforé peut éventuellement perturber l'écoulement de l'eau le long de la géomembrane. Il est très difficile de dire dans quelle mesure.



### 3 Conditions hydrogéologiques de la nappe souterraine

La station pilote de Grandson présente l'avantage de tester l'infiltration des eaux de routes de manière complète puisque l'un des compartiments achemine les effluents dans une nappe souterraine. La connaissance du régime de cette nappe est aussi importante que le régime de ruissellement pour faire un bilan de l'efficacité du système. C'est la raison pour laquelle les conditions hydrogéologiques de la nappe de l'Arnon ont été investiguées avec tout le soin nécessaire. Leur description est l'objet de l'annexe III du présent rapport. Dans ce chapitre, nous résumons les éléments essentiels pour la compréhension du fonctionnement de l'infiltration.

#### 3.1 Extension de la nappe souterraine de l'Arnon

La carte géologique (fig. 3.1) montre bien l'extension des alluvions récentes de l'Arnon. Il s'agit principalement d'un étroit ruban alluvial qui entoure la rivière tout au long de son cours, sur une largeur de l'ordre d'une centaine de mètres. Un kilomètre en amont du site, la nappe s'élargit en se joignant à des alluvions venant d'un affluent sur sa rive gauche, sous le village de Champagne. C'est ainsi qu'au droit de la station, la largeur de la nappe atteint près d'un demi-kilomètre. C'est cependant sur la bordure sud de cette nappe que se situe la station expérimentale, ce qui a réduit la possibilité d'infiltrer à un seul segment. La rivière est également fortement décentrée contre cette limite méridionale.

L'eau souterraine occupe les pores des épandages alluviaux dans toute cette zone. La nappe est en général libre, atteinte à quelques mètres de profondeur sous le sol. Le plancher de la nappe dans la zone est fait de moraine de fond rhodanienne dont la perméabilité est très faible.

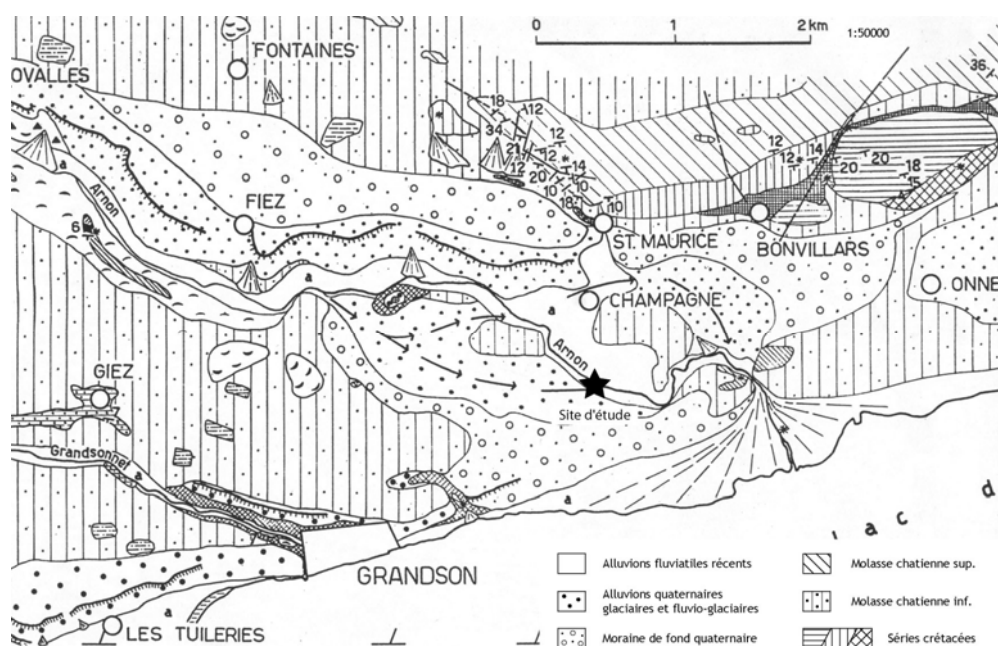


Fig. 3.1 : Carte géologique de la région du site expérimental. D'après Bertschy 1958

### 3.2 Régime d'écoulement, relation entre l'Arnon et la nappe

Dans ce genre d'aquifère, la relation rivière – nappe joue un rôle important, notamment dans le site de la station. C'est pourquoi le site a été équipé de piézomètres, trois à l'amont, trois à l'aval du segment d'infiltration. Le suivi de ces points d'observation nous renseigne sur le régime d'écoulement et sur les relations avec le cours d'eau.

Les niveaux piézométriques (situation, fig. 3.2) de la nappe montrent un battement saisonnier évident. Le niveau descend ainsi d'environ 40 cm de mars à août, de façon uniforme sur l'ensemble de la nappe (fig. 3.3). Lors d'événements pluvieux, les niveaux réagissent fortement et rapidement en hiver, de manière moins prononcée en été (fig. 3.4), à cause principalement d'une évaporation et d'une rétention d'eau plus importantes dans la zone non-saturée. Pour exemple, la période de fortes précipitations du 13-14 mars provoque ainsi une élévation brutale (50 cm) du niveau piézométrique sur l'ensemble du site, montrant son niveau le plus haut 5 jours après l'épisode pluvieux (fig. 3.4). Ensuite, ce niveau reste haut (avec légère tendance décroissante), en raison de nombreux événements pluvieux successifs de moindre importance.

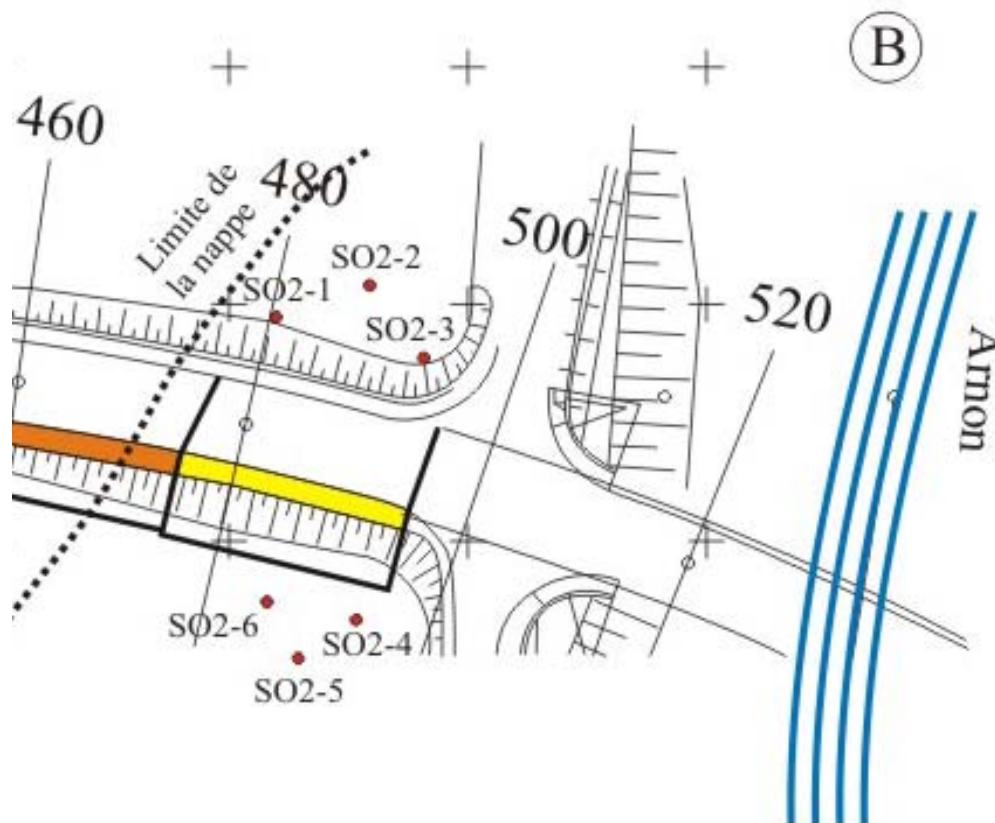


Figure 3.2: situation du tronçon effectuant l'infiltration (SB-LB) en jaune et des piézomètres amont (S02-1 à 3) et aval (S02-4 à 6).

La figure 3.3 montre ainsi clairement la relation entre le cours de l'Arnon et la nappe du site d'étude. Une augmentation du débit de la rivière induisant systématiquement une hausse synchrone du niveau de la nappe (ici représenté au droit du piézomètre S02-4), ce qui montre une relation claire entre la rivière et la nappe. En résumé, les variations de la surface piézométrique sont ainsi dépendantes des précipitations locales (réponse rapide, 1-2 jour – trait plein vert ; fig. 3.4), et du niveau de l'Arnon (réponse retardée, fonction du temps de concentration du bassin versant de l'Arnon – traitillé vert ; fig. 3.4). La fonte des neiges en fin d'hiver sur le Jura provoque régulièrement de fortes crues dans la rivière qui se traduisent par une hausse de la nappe alluviale.

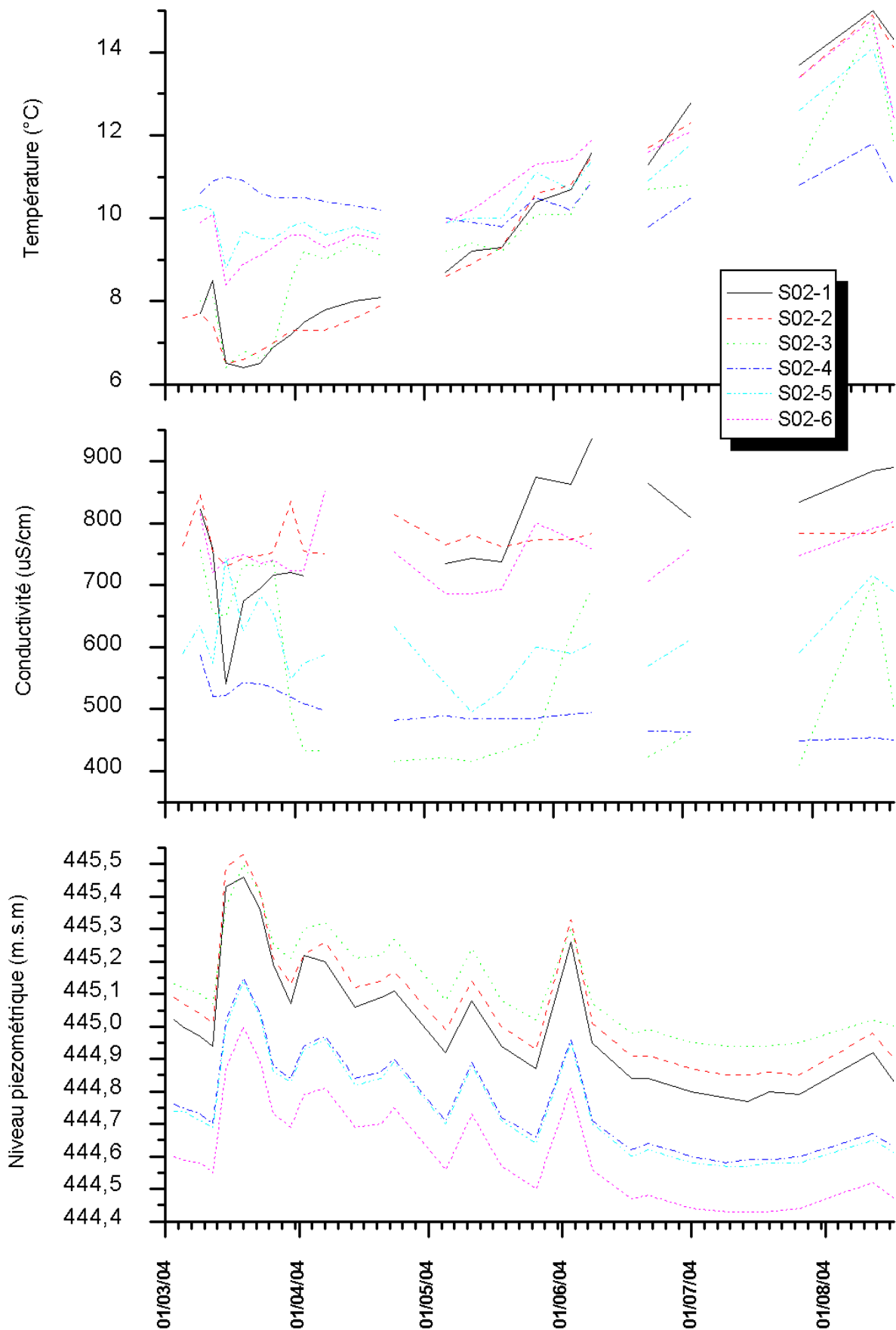


Fig. 3.3: Variations au cours du temps du niveau piézométrique (m.s.m), de la conductivité et de la température, dans les 6 piézomètres de la nappe de l'Arnon (printemps et été 2004).

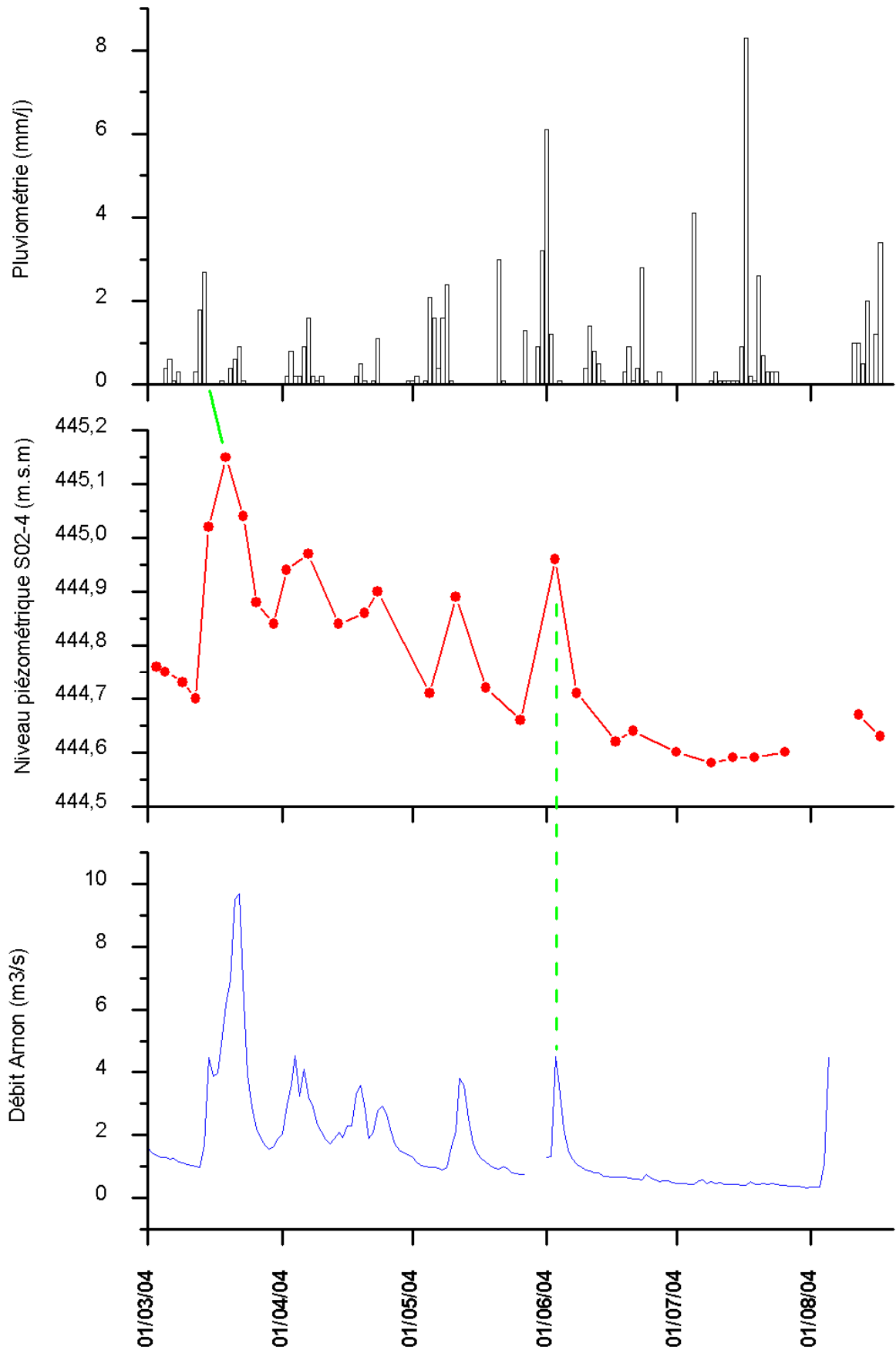


Fig. 3.4: Variation au cours du temps de la pluviométrie mesurée sur le site, du débit de l'Arnon (données SESA) et du niveau piézométrique au sondage S02-4. (mars-août 2004)

### 3.3 Résultat des essais hydrogéologiques effectués

Les tests suivants ont été faits sur la nappe locale, afin de quantifier certains paramètres hydrogéologiques (conductivité hydraulique K, emmagasinement S,...) :

- Essai au sel dans les piézomètres
- Slug test (essais Lefranc)
- Essai de pompage
- Essai de traçage local

Les résultats sont montrés de manière détaillée en annexe III. Un rappel sur les paramètres physico-chimiques et leurs fonctions est donné en annexe IV.

En résumé, la nappe du site de Grandson est un système aquifère de faible volume, directement lié au système fluvial de l'Arnon. L'aquifère est en connexion directe avec le cours d'eau. Ce dernier constitue donc la principale cause des variations du niveau piézométrique et des paramètres physico-chimiques (ici, température et conductivité).

L'alimentation en eau principale de la nappe provient donc de la rivière. Le rapport entre la recharge par le cours d'eau et la recharge par les précipitations est largement dominé par la première – de manière encore plus manifeste en été, quand les sols sont secs et l'évaporation importante, empêchant une partie de l'eau infiltrée d'atteindre la zone saturée lors d'événements pluvieux normaux. L'amplitude des variations dues au changement de niveau de l'Arnon est dès lors beaucoup plus importante que l'amplitude des variations liées aux précipitations.

L'écoulement de l'eau souterraine dans la nappe locale se fait du Nord-Ouest au Sud-Est, selon un gradient de charge de 0,016 (fig. 3.5), donc obliquement par rapport à la chaussée. La vitesse moyenne réelle de l'eau est de 60 m/j environ. Les paramètres physico-chimiques varient eux aussi selon la proximité de la rivière et selon le sens d'écoulement de l'eau souterraine. Les conductivités décroissent en s'approchant des berges du cours d'eau. Les températures croissent – hiver comme été – en s'éloignant de la rivière, le long des lignes d'écoulement souterrain.

Il faut mentionner encore que les piézomètres situés en amont de la station, qui servent de référence de mesure de l'immission polluante routière, sont passablement chargés en substances anthropiques d'origine agricole (nitrates, chlorures, éléments traces minéraux, etc.) et qui ne peuvent être issues de la recharge par la rivière. Cette charge provient probablement en bonne partie du hangar agricole situé une centaine de mètres en amont où des substances de traitement sont stockées et manipulées (voir situation figure 1.1b). Ce fait jouera un rôle non négligeable dans les mesures des immissions d'origine routière (voir chapitre 4).

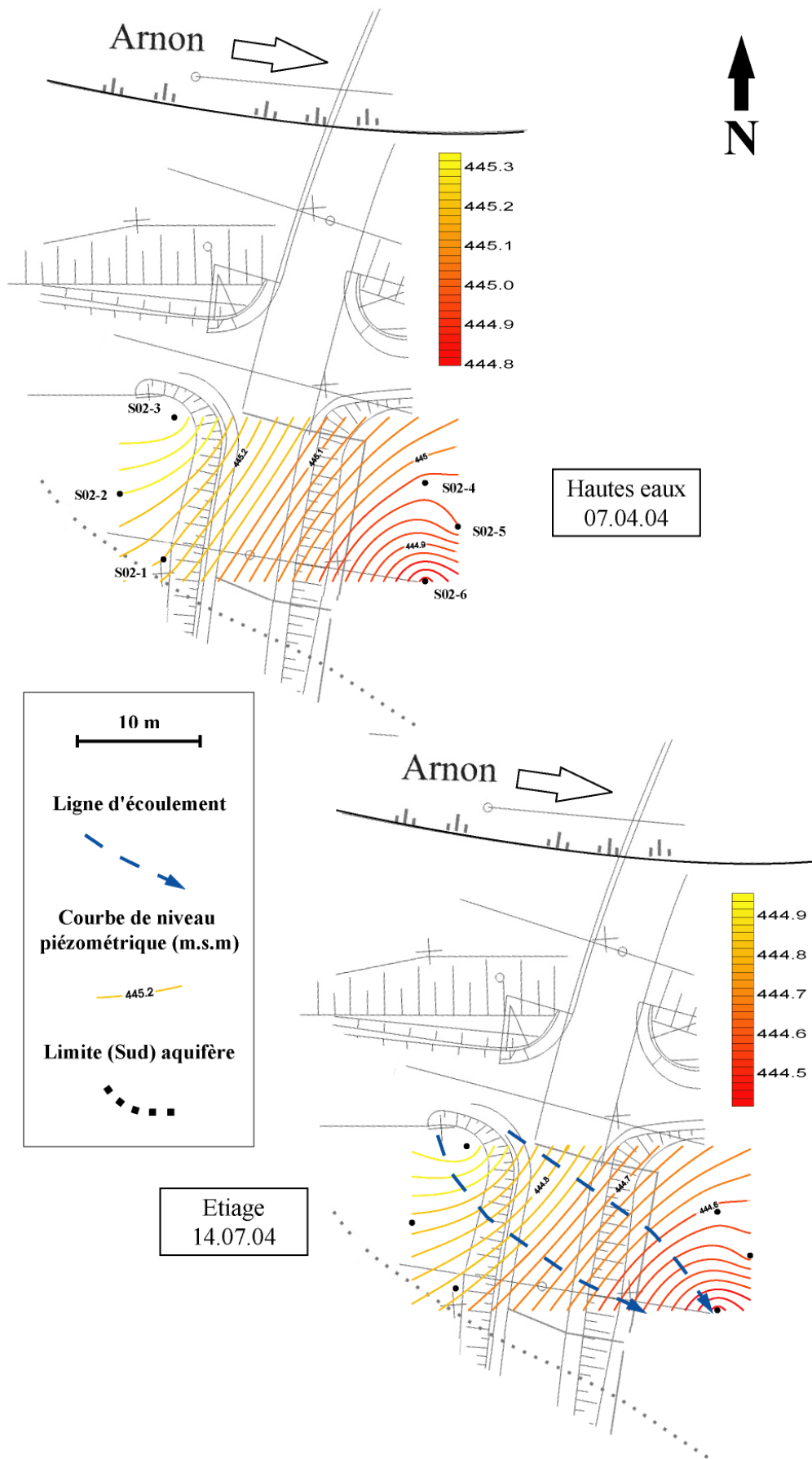


Fig. 3.5: Cartes piézométriques interpolées pour le site de Grandson. Deux cas extrêmes (étiage et période de hautes eaux) sont représentés.



## 4 Etude expérimentale

L'étude expérimentale qui doit répondre aux objectifs fixés a nécessité une stratégie d'essais et d'observations de la station pilote. En effet, le nombre de paramètres mesurés ainsi que le nombre d'événements potentiellement observables sont très importants ce qui nécessite une planification ciblée de la collecte des données.

### 4.1 Stratégie de suivi

Les différents types de données donnent lieu à une stratégie propre.

#### 4.1.1 Suivi des événements hydrométéorologiques

Tous les événements hydrométéorologiques survenus durant la période d'observation ont été enregistrés, tant au niveau des précipitations que des écoulements dans les différents compartiments de la station. Trois essais de pluie artificielle ont été ajoutés à cette collection afin de choisir des scénarios pluviométriques prédéterminés, soit pour tester des conditions d'écoulement particulières soit pour étudier le comportement géotechnique de la chaussée.

#### 4.1.2 Calcul du bilan hydrique et stratégie des mesures hydrauliques

Le bilan hydrique du système chaussée – banquette – talus d'infiltration – nappe souterraine fait appel à des variables dont certaines sont directement mesurées, d'autres sont calculées. L'expression du bilan ci-dessous définit exactement la manière dont le calcul est effectué.

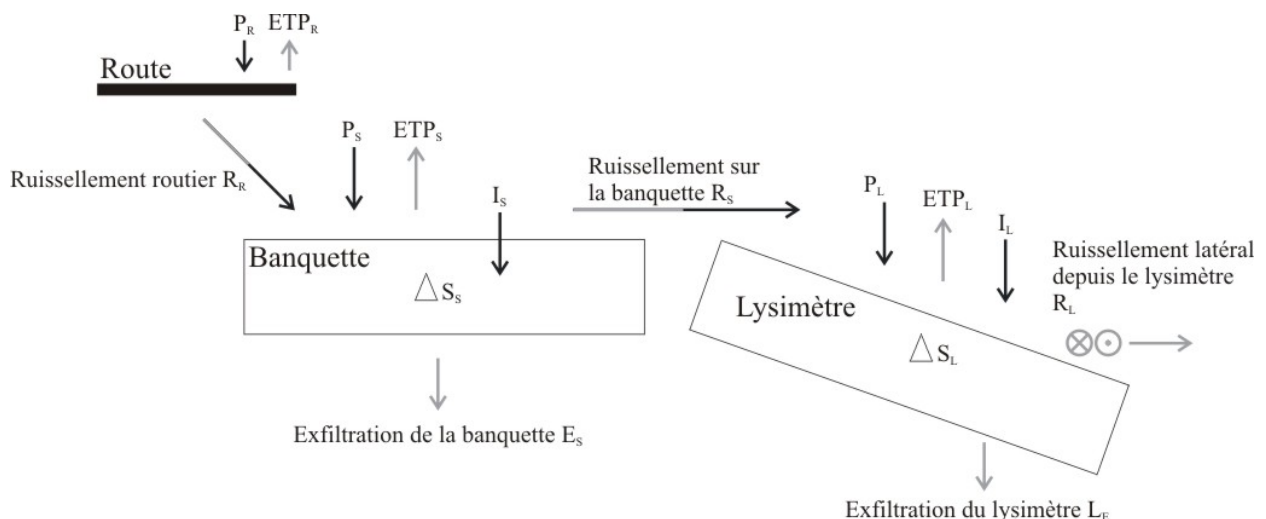


Figure 4.1: Bilan hydraulique des trois compartiments : la route, la banquette et le talus d'infiltration. Les flèches noires représentent le flux d'eau entrant, les flèches grises le flux sortant. Les flèches du ruissellement transmettant l'eau d'un compartiment à l'autre sont à la fois une sortie et une entrée, donc en deux couleurs. Le ruissellement sortant du lysimètre s'écoule perpendiculairement au plan de la figure.

Les mesures de débit en sortie de tuyau sous-banquette et sous-lysimètre permettent de calculer les volumes restitués, stockés et ruisselés. Ainsi, le bilan peut être établi conformément à la loi de conservation de masse. La figure 4.1 montre le bilan global d'un compartiment.

Les équations de conservation de masse sont les suivantes:

$$\text{Route} \quad R_R = P_R - ETP_R \quad (1)$$

*(R<sub>R</sub>=Ruissellement routier; P<sub>R</sub>=Précipitation sur la route; ETP<sub>R</sub>=évaporation sur la route)*

$$\text{Banquette} \quad I_S = E_S \pm \Delta S_S \quad (2.1)$$

$$\text{donc:} \quad R_R + P_S = I_S + R_S + ETP_S \quad (2.2)$$

*(I<sub>S</sub>=infiltration dans la banquette ; ΔS<sub>S</sub>=variation de stock dans la banquette; E<sub>S</sub>=exfiltration sous la banquette; P<sub>S</sub>=précipitation sur la banquette ; R<sub>S</sub>=ruissellement sur la banquette; ETP<sub>S</sub>=évapotranspiration sur la banquette)*

$$\text{Lysimètre} \quad I_L = E_L \pm \Delta S_L \quad (3.1)$$

$$\text{donc:} \quad R_R + P_L = E_L + ETP_L \pm \Delta S_L \pm R_L \quad (3.2)$$

*(I<sub>L</sub>=infiltration dans le lysimètre; E<sub>L</sub>=exfiltration sous le lysimètre; ΔS<sub>L</sub>=variation de stock dans le lysimètre; P<sub>L</sub>=précipitation sur le lysimètre; ETP<sub>L</sub>= évapotranspiration sur le lysimètre; R<sub>L</sub>= débordement latéral depuis le lysimètre, ici égale à 0)*

Les volumes R<sub>R</sub>, E<sub>S</sub> et E<sub>L</sub> sont calculés de la manière suivante :

$$R_R = \int_{T_0}^{T_{end}} Q dt \quad E_S = \int_{T_0}^{T_{end}} Q dt \quad E_L = \int_{T_0}^{T_{end}} Q dt$$

Ainsi, de manière générale, les volumes P<sub>R</sub>, P<sub>S</sub>, P<sub>L</sub>, R<sub>R</sub>, E<sub>S</sub>, E<sub>L</sub> sont mesurés. Les variations de stock S<sub>S</sub> et S<sub>L</sub>, ainsi que le ruissellement de la banquette R<sub>S</sub> sont calculés (dans certains cas bien spécifiques, comme l'essai artificiel n°2, R<sub>S</sub> est mesuré à l'aide d'une gouttière installée en bordure de banquette). Enfin, l'évapotranspiration ETP est calculée par l'équation de Penmann-Monteigh FAO (PM-FAO):

$$IPA = IPA_0 * K + P \quad (\text{PM-FAO})$$

*(IPA: indice de précipitation antécédente [mm]; IPA<sub>0</sub>: IPA du jours j-1 [mm]; K: constante de récession PM-FAO [sans unité]; P: précipitation au jour j [mm])*

Le calcul de débit comporte une incertitude relative due à la méthode de mesure et de calcul. Les débits sont calculés à partir de hauteurs d'eau, elle-même mesurées avec un débitmètre bulle-bulle ISCO 4230 (précision 0.1mm). L'erreur relative sur le débit est fonction de la hauteur d'eau mesurée, comme montré dans la figure 4.2. En ce qui concerne l'erreur sur les volumes totalisés, l'expérience nous a montré qu'elle se situe autour des 10% du volume calculé. Le calcul d'erreur complet est montré en annexe V.

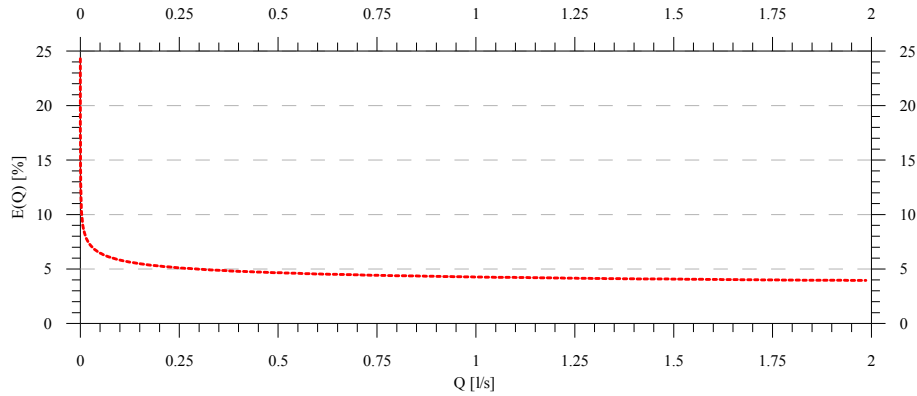


Figure 4.2: Distribution de l'erreur en fonction du débit Q. Plus le débit est faible, plus l'erreur est grande.

#### 4.1.3 Stratégie d'échantillonnage et de conservation des échantillons

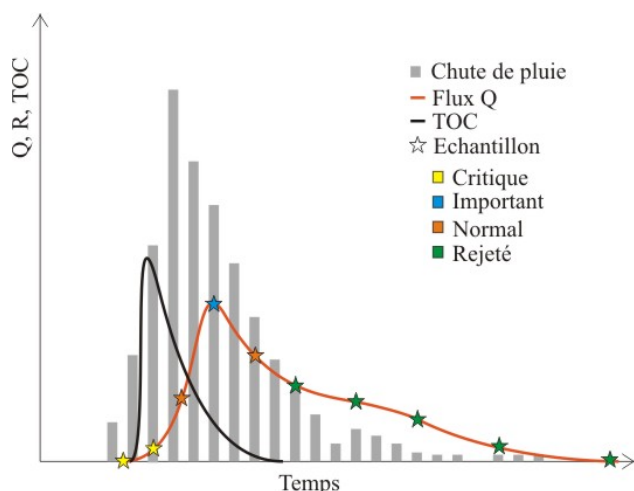
La stratégie d'échantillonnage doit être efficace en optimisant le nombre d'analyse et diminuant les coûts (fig. 4.3). La large gamme de polluants analysés impose l'utilisation de deux types de bouteilles différents : en PE (0.5l) pour les ETM et en verre (1l) pour les polluants organiques. La manière la plus efficace pour échantillonner s'est révélée être à la main, les échantillonneurs automatiques montrant des insuffisances (Les pompes de ceux-ci se désamorçant constamment car le débit d'eau exfiltrée était trop faible). De manière générale, un système permis d'intercepter la première eau parvenant à la sortie des tuyaux de collecte. Ce système consistait en un entonnoir fixé à la sortie du tuyau, faisant office de réducteur de débit. L'entonnoir était relié à un tuyau souple relié à deux bouteilles au moyen d'une bifurcation. Ainsi, le premier litre et demi d'eau, contenant généralement le first flush<sup>1</sup>, était conduit à ces 2 bouteilles, échantillonnant le first flush. Lorsque les bouteilles étaient pleines, le système débordait et l'eau se déversait dans le déversoir.

Le pas de temps utilisé pour l'échantillonnage dépend du type de précipitation considéré. Lors de pluie brèves et intenses (orage), le pas de temps est court (2-5minutes) tandis que lors d'événements long et d'intensité faible à moyenne, le pas de temps se rallonge (5-15 minutes, voire plus). Le pas de temps de l'échantillonnage est rallongé également en fin d'événement.

En général, le nombre d'échantillon pris était largement supérieur au nombre requis afin de s'assurer de ne pas rater d'événements. Une méthode discriminante de choix des échantillons à analyser et ceux à conserver sans analyse fut élaborée. Les critères de choix sont montrés dans la

<sup>1</sup> Le first flush est défini par Bertrand et Krajewski & Chebs, 1995. Ils postulent que 80% des polluants sont présent dans les 30 premiers pourcents du volume d'eau. Cette définition a été préférée à toute autre pour sa simplicité d'utilisation.

figure 4.3. Cette stratégie permet de diminuer les coûts. Afin d'utiliser correctement cette méthode, les échantillons destinés à l'analyse des ETM ont dû être conservés au frais, ce après acidification. Les échantillons destinés aux analyses des polluants organiques furent congelés en bacs aluminium. Les polluants volatiles, ne pouvant être conservés, furent analysés immédiatement.



Echantillon	Analyses
Critique	All MTE Anions PAH BTEX C aliphatique Essence + MTBE PCB
Important	All MTE PAH C aliphatique
Normal	Majeur MTE
Secondaire	Rejeté

Figure 4.3: Principe de gestion des échantillons.  
 Haut: La hiérarchisation des échantillons est basée sur les données de TOC et de conductivité électrique (pas montrée ici). Les essais préliminaires ont montré que TOC était représentatif de la composante organique. La conductivité électrique est liée au contenu des ETM. Sur 10 échantillons, 5 ne sont pas analysés. Le premier échantillon est considéré critique dans tous les événements (first flush). Le second échantillon critique coïncide avec le pic de TOC. L'échantillon important coïncide avec le pic du flux. Ce pic correspond grossièrement avec la fin du first flush Cette méthode de sélection n'est pas rigide et peut être adaptée au cas par cas.  
 Bas: Analyses menées sur les échantillons. Le type d'analyse est fonction de l'importance de l'échantillon. (ETM *element en trace minéral*; Anions: chlorures, sulfates, nitrates; PAH: polycyclic aromatic hydrocarbon; BTEX: série benzene, toluene, ethylene, xylene; Hydrocarbures aliphatiques C<sub>2</sub> to C<sub>22</sub>; Additifs pour l'essence : MTBE et produits à base de brome).

#### 4.1.4 Stratégie de suivi géotechnique

En plus de l'enregistrement en continu des déflexions de la chaussée, trois campagnes de mesures discrètes de falling weight ont été organisées. Les deux premières sont intervenues dans les conditions ordinaires d'exploitation de la route, l'une dans les conditions estivales, l'autre durant l'hiver. La troisième a été réalisée dans des conditions artificielles très humides après un arrosage massif de la chaussée. Trois campagnes de nivellement ont été également réalisées de manière indépendante, en plus de la mesure de référence.

#### 4.2 Evénements artificiels

Afin de mieux appréhender les conditions d'écoulement lors de l'infiltration du ruissellement routier, trois essais de pluie artificielle ont été conduits. Ceux-ci consistent en un arrosage de la route selon un pluviogramme prédéfini, un compartiment après l'autre, ce afin de pouvoir déplacer les instruments de mesure placés aux sorties des tuyaux de collecte.

##### 4.2.1 Essai de pluie artificielle no 1 : essai préliminaire d'arrosage

Le premier essai avait essentiellement pour but d'explorer les processus d'infiltration au travers des diverses banquettes et talus avec une pluie modérée. L'arrosage a été effectué avec l'eau pompée de l'Arnon, à débit constant dans le temps, totalisant environ 3 m<sup>3</sup> pour un

débit variant de 35 à 45 l/min environ (les compartiments éloignés de l'Arnon ont reçu un débit un peu plus faible en raison de la longueur de la conduite). Seules la route et les banquettes ont été arrosées et non les talus d'infiltration. La lame d'eau déversée ( $P_R$ ) équivaut à 40mm, et correspond à une pluie unitaire d'intensité allant de 30 à 40 mm/h, selon le compartiment.

En outre, afin d'explorer le cheminement de polluants en solution, un traceur conservatif (NaCl) a été utilisé ponctuellement de la manière suivante : 1 kg de Na Cl fut mis en solution dans 5 l d'eau puis également réparti sur le bord aval de la route quelques secondes avant le début de l'arrosage (photo 4.1). Ce procédé permet de simuler le « first flush », phénomène très attendu dans le cas du ruissellement routier.

Les données enregistrées à la sortie des tuyaux de collecte sont le débit et la conductivité électrique (préalablement calibrée à 20°C dans un seau de saumure). Les concentrations de NaCl ont été analysées en laboratoire.

Les résultats de cet essai sont exhaustivement présentés dans la thèse (CD ci-joint).



Photo 4.1: Essai no 1 de pluie artificielle. Le procédé d'arrosage sera amélioré pour les essais suivants, permettant une répartition plus homogène sur la route. Arrosage du compartiment conduisant à la banquette gravier-argile, visiblement inondée. Le fût permet de réguliers jaugeages du débit (ici 44.5 l/min).

#### 4.2.2 Essai de pluie artificielle n°2 : simulation d'un orage avec eau de pluie.

Suite aux nombreux événements naturels enregistrés, il est apparu que le cas de l'orage violent et court était le plus à même de mobiliser et transporter les polluants (first flush). Ce test a été conçu afin de préciser le comportement des polluants dans un tel cas, tout en maîtrisant parfaitement les conditions de l'essai.

Afin de rester le plus représentatif possible, de la véritable eau de pluie utilisée pour ce test. Elle fut collectée avant l'essai grâce à des bâches posées sur les toits de bâtiments de l'EPFL (2 m<sup>3</sup>) en prenant soin d'éviter toute contamination chimique. Tout le matériel utilisé était en polyéthylène PE. Le matériel de pompage fut abondamment rincé à l'eau claire puis ensuite à l'eau de pluie en circuit fermé. Le système d'arrosage fut amélioré depuis l'essai artificiel n°1, permettant un arrosage diffus plus homogène, simulant la pluie.

Afin de préciser la part de ruissellement dépassant la banquette, des gouttières hémicylindriques ont été installées en aval des banquettes courtes SGH, SGC et SGL, banquettes non liées à un talus d'infiltration. Ces gouttières en PE sont situées sur le coin de transition banquette - talus et permettent de mesurer le ruissellement sortant  $R_s$  (fig 4.4). Le joint d'imperméabilisation a été fait en bentonite mélangée au matériau sorti lors de la mise en place des gouttières. Cet essai est ainsi le seul où le ruissellement de banquette est mesuré et non calculé, ce qui le rend très important. Les résultats d'essais naturels présentés et interprétés plus loin sont basés sur le calcul par soustraction du stock. On s'attend donc à des résultats de ruissellement de banquette plus fiables pour cet essai artificiel que pour les enregistrements naturels.

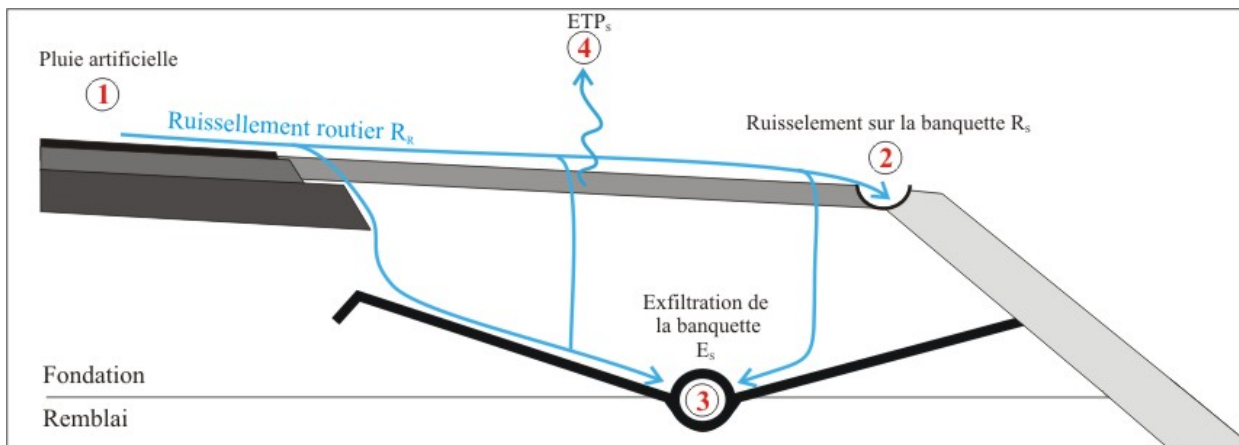


Figure 4.4: ajout des gouttières (2) pour les banquettes courtes SGH, SGC et SGL.

L'essai s'est déroulé sur plusieurs jours en juin 2005. A nouveau, chaque banquette et pente d'infiltration fut testée séparément pour permettre le déplacement des instruments.

La pluie simulée (7mm, environ 300 litres par compartiment) respecte au mieux un pluviogramme préalablement établi (figure 4.5).

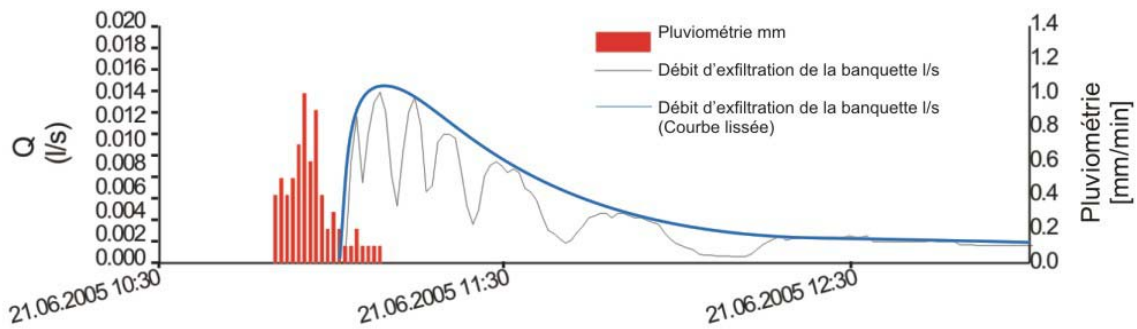


Figure 4.5: pluviogramme d'un événement naturel de type orage (en rouge) utilisé pour dimensionner la pluie artificielle afin de rester le plus proche possible du cas réel. En gris, le débit d'exfiltration de la banquette SGH. Les indentations de la courbe proviennent de la prise des échantillons (1.5 litre à chaque indentation). En corrigeant sur cette fonction cet effet du prélèvement, on obtient la courbe bleue du débit d'exfiltration en fonction du temps. Le volume exfiltré  $E_S$  correspond à l'intégrale de la courbe bleue.

Les mesures des débits aux différents points de la station ainsi que les calculs de bilan ont permis de comparer les rendements hydrauliques des différentes banquettes. La figure 4.6 résume ces différences importantes de comportement hydraulique.

La méthodologie spécifique à cet essai n°2 est la suivante (se référer à 4.1.2 pour la terminologie):

- En ce qui concerne les 3 banquettes non imperméabilisées SGH, SGC et SGL, les variables  $R_R$ ,  $E_S$  et  $R_S$  sont mesurées, l'ETP<sub>S</sub> est calculée (PMFAO) et enfin le stock  $S_S$  est calculé suivant l'équation :  $S_S = R_R - (E_S + R_S + ETP_S)$ .
- Les banquettes SH et SB ne possèdent pas de gouttière pour mesurer  $R_S$ . Ainsi, seuls  $R_R$  et  $E_S$  sont mesurés ; la différenciation entre le stock  $S_S$  et le ruissellement par-dessus la banquette  $R_S$  est faite de la manière suivante: la banquette SGL (Grave Iensemencée, même matériau utilisé pour SH et SB) a conservé environ 75% du volume d'eau arrosé en stock ( $S_S = 0.75 \cdot R_R$ ). A l'aide de cette information, on peut calculer la teneur en eau volumique finale  $\theta_f$  (=Volume d'eau/ volume total  $V_W/V_t$ ) :  $\theta_f = S_S / V_t = 0.06$  [ $m^3 \cdot m^{-3}$ ].
- En extrapolant cette valeur pour les banquettes SH et SB, les valeurs de stock peuvent être obtenues :
  - SH:  $S_S = \theta_f \cdot V_{t,SH} = 0.06 \cdot 5.4 \approx 0.32$  [ $m^3$ ], soit environ 320 litres. Ce résultat tient compte du volume de grave I situé au-dessous du HMF prolongé.
  - SB :  $S_S = 0.06 \cdot 3.9 \approx 0.23$ , soit environ 230 litres. Ce résultat ne tient pas compte du volume de grave I situé au-dessous du géotextile bentonite car ce volume est certainement sec.

Pour rappel, une introduction au calcul d'erreur est présentée au paragraphe 4.1.2; le calcul d'erreur complet est montré en annexe V.

Ces mesures expérimentales in-situ permettent d'apporter les conclusions suivantes sur les avantages et défauts de chaque banquette (fig. 4.6).

- Les trois banquettes non étanchées montrent toutes d'importants stocks d'eau accumulée dans la banquette, avec une valeur un peu moins élevée pour la banquette gravier - argile. Cette eau est présente dans les pores de la partie supérieure de la banquette mais surtout dans la grave de fondation qui est au-dessous. Ce volume poral est donc important. Le stock se constitue par une forte infiltration du ruissellement au franchissement de la banquette. En corollaire, la fraction ruisselée qui parvient au talus est faible, un peu meilleure toutefois pour la banquette gravier – argile. Ces trois banquettes montrent de plus un écoulement gravitaire durant l'événement compris entre 10 et 20%. Ces eaux et les polluants non retenus parviennent donc directement dans l'infrastructure de la chaussée.
- La banquette étanchée par l'enrobé bitumineux (SH) présente un stock un peu moins important (présence de 14cm de HMF avec une porosité très faible !) et une fraction ruisselée nettement meilleure que dans les trois banquettes précédentes. Les mesures de flux à la base de la banquette montrent toutefois un résultat décevant concernant l'étanchéité. En effet, la couche de HMF surmontée par le glacis de bitume laisse tout de même transiter près de 10% de l'écoulement dans la fondation au cours de l'événement pluvieux.
- La banquette bentonite (SB) est totalement imperméable dans cet essai comme dans les autres événements enregistrés. Le stock est faible en raison de l'absence de percolation au-dessous des 26 cm de la banquette. La fraction ruisselée atteint près de 60%.
- Au sujet du devenir des eaux contenues dans le stock poral et des polluants les accompagnants, il y a lieu de distinguer deux cas :
  - Les eaux du stock accumulé dans les banquettes non étanchées (ou mal étanchées) vont soit s'évaporer si la surface de la banquette s'assèche, soit percoler en profondeur dans la fondation si un nouvel événement pluvieux survient. Les polluants vont en partie se fixer dans les pores, en partie percoler dans l'infrastructure de la chaussée. En tous les cas, ils ne vont jamais parvenir au talus d'infiltration construit spécifiquement pour leur rétention et leur dégradation.
  - Les eaux du stock de la banquette bentonite en revanche ne peuvent que s'évaporer ou transiter latéralement vers le talus d'infiltration, en face de l'horizon A. Les eaux (et donc les polluants) ne peuvent donc pas parvenir dans la structure routière, tandis que les polluants seront soit dirigés vers le talus et traités par ce dispositif, soit fixés dans la banquette elle-même.

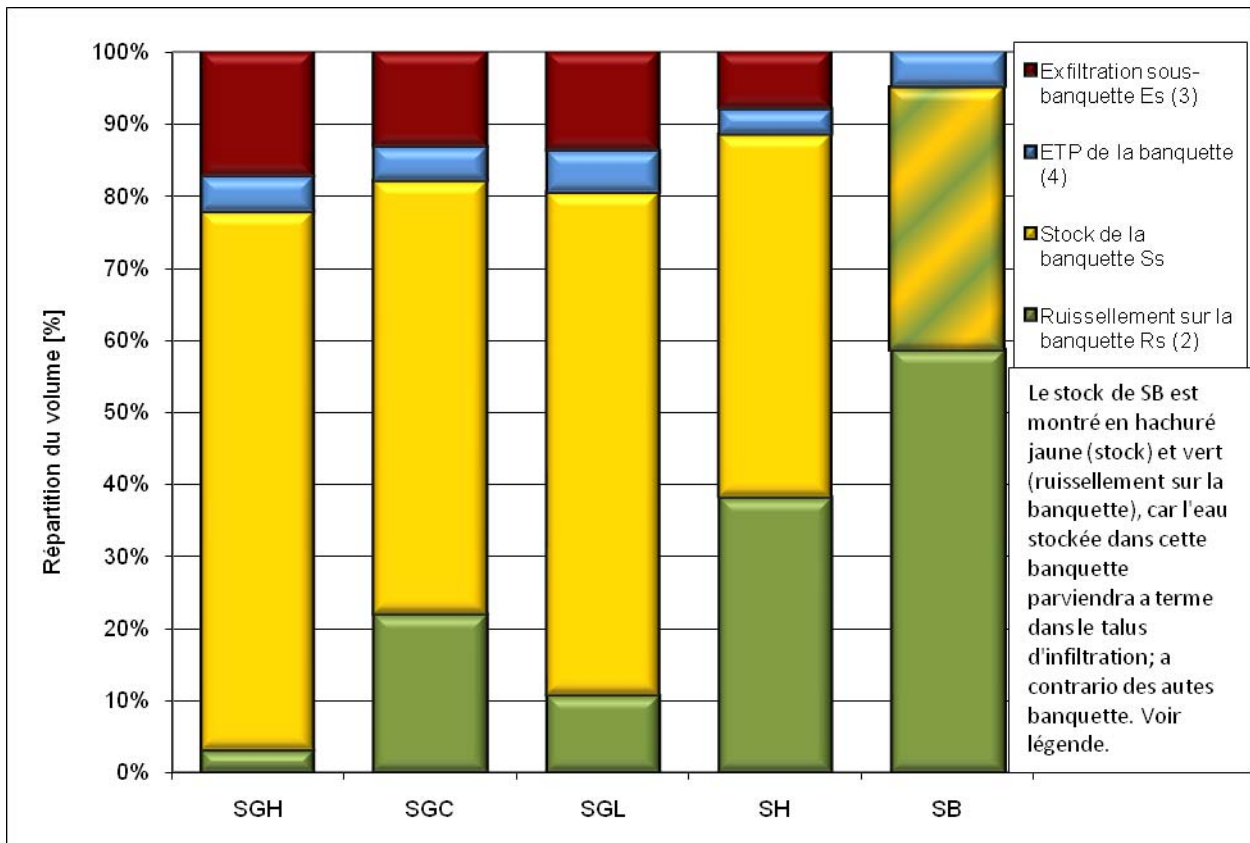


Figure 4.6: bilan hydrique des 5 types de banquettes. La plage bordeaux représente la fraction exfiltrée sous-banquette. La banquette imperméabilisée à la bentonite ne laisse passer aucune eau, tandis que la banquette gravier-humus laisse passer la fraction la plus importante (18%). En ce qui concerne la fraction ruisselée en direction des talus d'infiltration (vert), la banquette avec bentonite conduit près de 60% du ruissellement routier vers le talus, tandis que SGH n'en conduit que 3-4%. Notez que le stock de la banquette SB finira à terme dans le talus d'infiltration. Ceci est dû à la présence du geotextile bentonitique qui empêche l'eau d'aboutir dans la structure routière. Ainsi, le stock de SB est montré en hachuré jaune (stock) et vert (ruissellement sur la banquette), car l'eau stockée dans cette banquette parviendra à terme dans le talus d'infiltration; a contrario des autres banquettes. Voir légende.

Sur la plan qualitatif, parallèlement au débit, les paramètres enregistrés sont la conductivité électrique, le pH, la turbidité, la teneur en O<sub>2</sub>, le TOC et la température. Les prélèvements ont donné lieu à un grand nombre d'analyses de tout le spectre chimique, minéral et organique, qui permettent de connaître pour chaque substance présente dans le ruissellement routier ce qu'elle est devenue au travers des banquettes, des talus d'infiltration et dans la nappe. Le détail par famille de substances est décrit dans la thèse PIGUET (2007, CD ci-joint).

La figure 4.7 résume ces résultats en montrant la diminution réelle du pic de concentration aux différents points de contrôle que sont le ruissellement routier RUN, le fond du lysimètre LH et l'aquifère alluvial (piézomètre aval S02\_5 et amont S02\_2, mesure faite 8 heures après l'arrosage de la route). Elle fait bien apparaître les substances fortement retenues par les sols avec des diminutions de concentration très significatives. Quelques éléments très mobiles, comme le Br, le Ba ou le Mo, sortent du lot. Il doit être noté que les concentrations fortes de ces substances enregistrées dans la nappe en aval de la route sont également présentes, dans les mêmes proportions, en amont du site test. Ainsi, leur provenance ne peut être attribuée à

l'infiltration du ruissellement routier. Les résultats montrent indéniablement que l'effet de la route sur la nappe est négligeable, et cela pour toutes les classes de polluants.

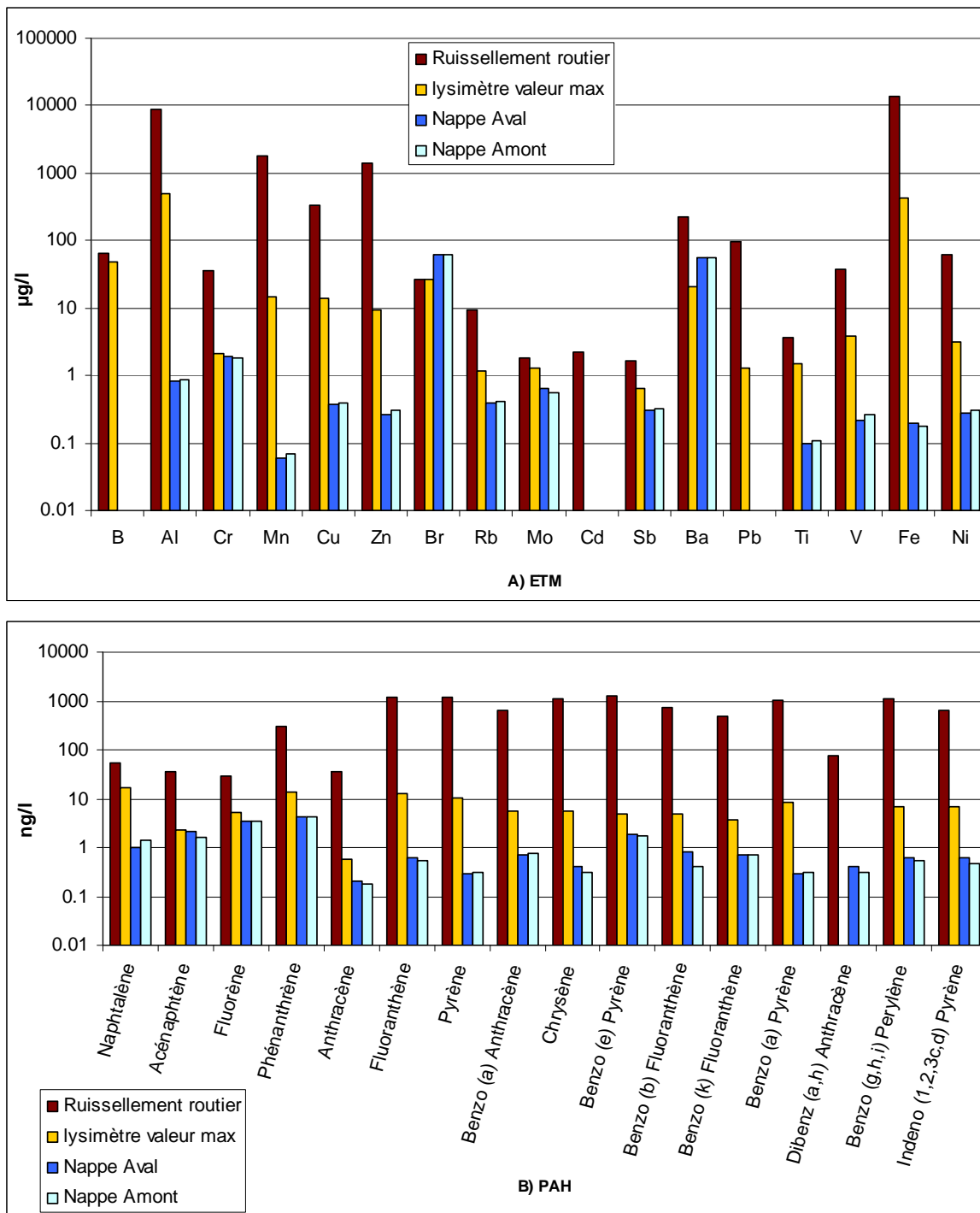


Figure 4.7a: A) Concentration en ETM dans le ruissellement routier, en sortie de lysimètre LH (essai n°2) et dans la nappe, en aval du site test. Noter l'échelle logarithmique. Les concentrations de substance diminuent de un ou plusieurs ordres de grandeur en général, sauf pour celles qui sont très mobiles comme le B, Ba, Br, Mo et Sb. Les valeurs enregistrées dans la nappe sont identiques en amont du site, disculpant ainsi le ruissellement routier comme source de pollution.

B) Concentrations en PAH enregistrées aux mêmes points. A nouveau, les concentrations sont fortement réduites entre le ruissellement routier et la nappe. Les valeurs de concentration dans la nappe sont les mêmes en amont du site. Les PAH légers sont moyennement mobiles : naphtalène, acénaphthène et fluorène.

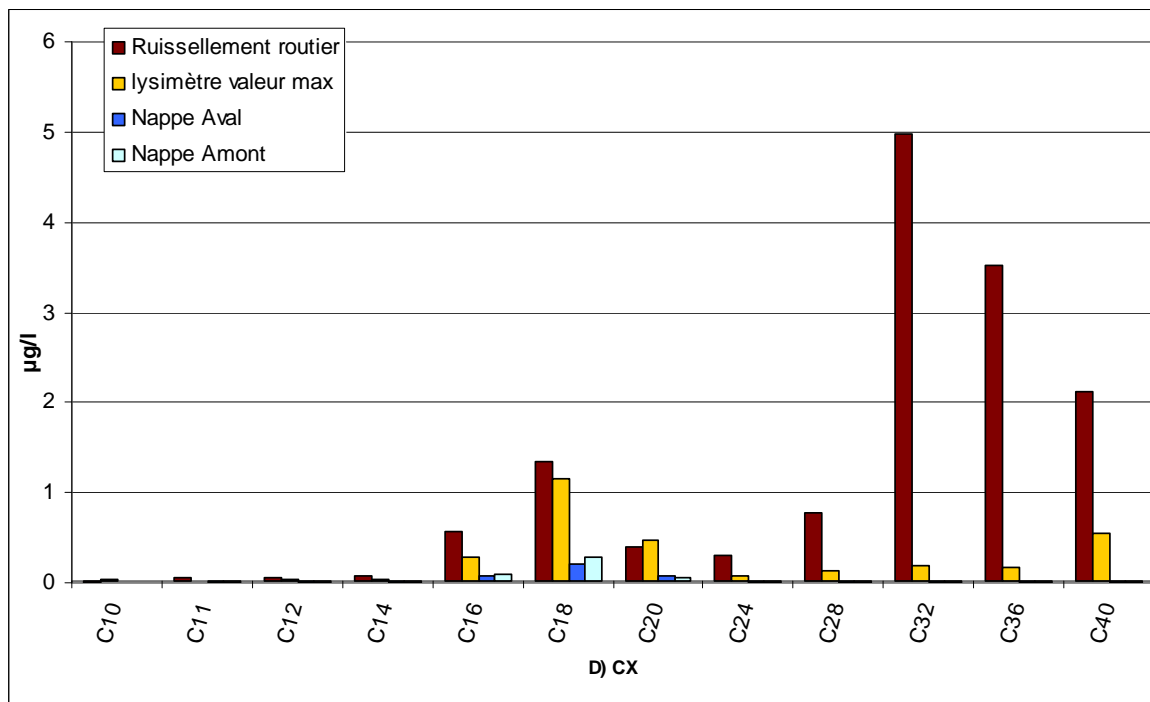
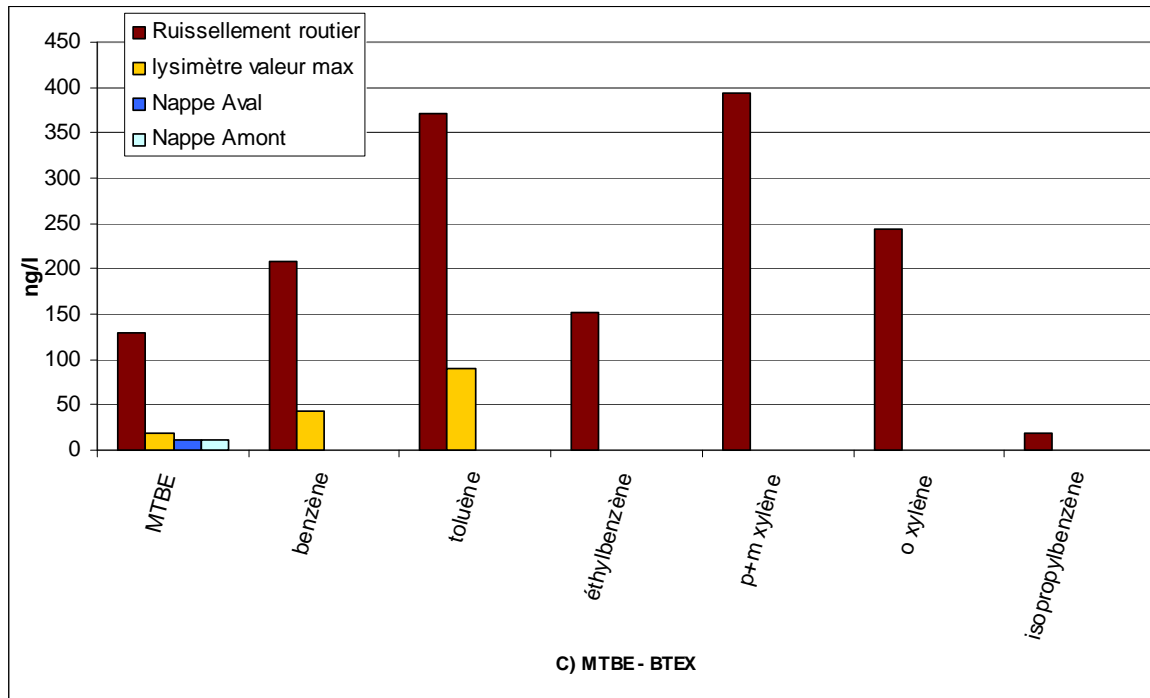


Figure 4.7b: C) Concentration en MTBE et BTEX dans le ruissellement routier, en sortie de lysimètre LH (essai n°2) et dans la nappe, en aval du site. L'échelle est linéaire. Excepté le MTBE trouvé en faible quantité dans la nappe (à nouveau aussi bien en aval qu'en amont), les autres polluants sont complètement retenus.

D) Concentration en C<sub>x</sub> enregistrée aux mêmes points. L'échelle est linéaire. Le C<sub>18</sub> très mobile est retrouvé en faible quantité dans la nappe (aussi bien en amont qu'en aval), accompagné de C<sub>16</sub> et C<sub>20</sub>. Les autres polluants sont retenus.

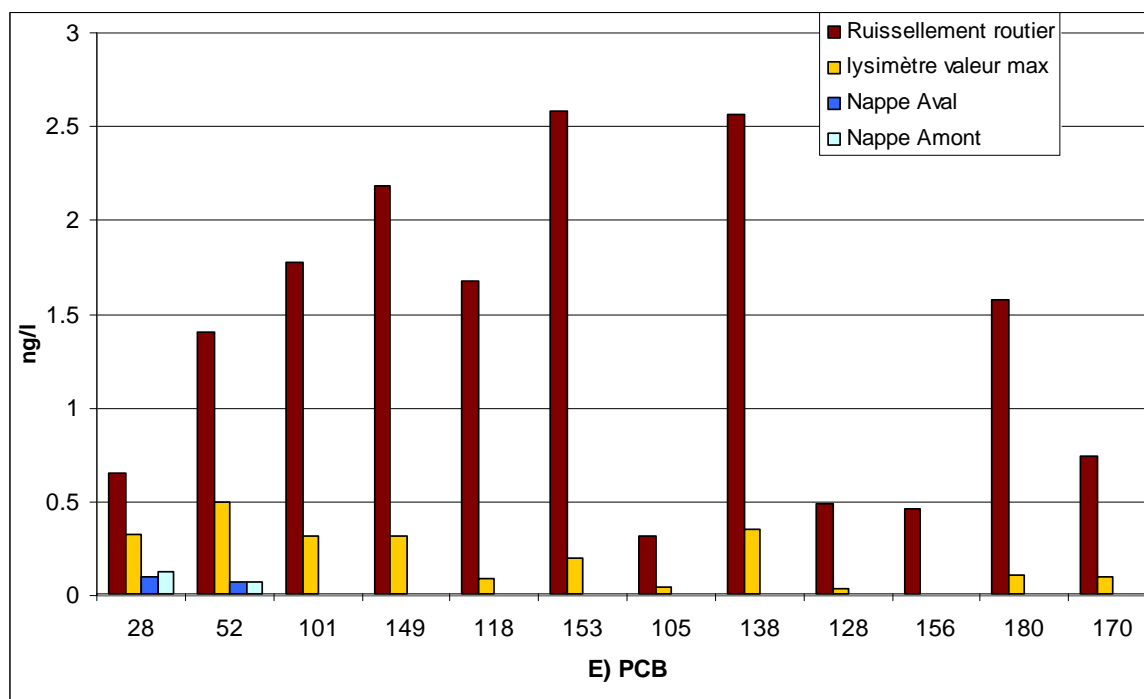


Figure 4.7c: E) Concentration en PCB dans le ruissellement routier, en sortie de lysimètre LH (essai<sup>o</sup>2) et dans la nappe, en aval du site. L'échelle est linéaire. Seules les espèces 28 et 52 sont trouvés dans la nappe, ce aussi bien en amont qu'en aval de la nappe. Les PCB sont en général très bien retenus.

#### 4.2.3 Essai de pluie artificielle n°3 : étude de la stabilité géotechnique

Par cet essai, une pluie de forte intensité a été simulée afin d'observer le comportement de la route soumise à des conditions hydrauliques très défavorables. Ainsi, l'eau de l'Arnon a été pompée au maximum des capacités de la pompe utilisée pour produire une pluie de 30 mm en 25 minutes environ, soit une pluie d'une intensité de 109 mm/h. Le temps de retour de ce genre de pluie est d'environ 3 ans (VSS n°1099).

Aucun phénomène particulier n'a été observé au cours de cet essai. Le dépouillement de l'essai et l'interprétation géotechnique sont donnés au chapitre 5.

### 4.3 Evénements pluviométriques naturels

Le suivi des événements n'a pu commencer qu'en février 2004, alors que la route a été mise en service en août 2003, en raison du temps nécessaire à la mise en place de l'instrumentation.

Depuis le début des observations jusqu'à la fin des mesures régulières sur le site, soit durant 22 mois, ce sont 116 événements qui ont été observés dans toutes sortes de conditions hydrométéorologiques. Le dépouillement de ces événements est une opération complexe qui a été l'objet du doctorat de M. Pascal Piguet (voir CD ci-joint).

Nous avons synthétisé cette variabilité sous la forme de 4 types d'événement principaux:

- cas d'une pluie de faible intensité, de courte durée et avec une petite lame d'eau précipitée, n'induisant pas d'exfiltration au travers des banquettes
- cas d'orage avec une forte intensité de pluie pendant un temps bref, similaire à l'essai n°2 (§4.2.2)
- cas d'une pluie hivernal longue mais d'intensité faible.
- cas d'une pluie ayant une faible lame d'eau précipitée mais ayant tout de même traversé les banquettes.

L'analyse de ces cas types, tant sur le plan hydraulique que chimique, est décrite en détail dans la thèse de doctorat (CD). Il en ressort que dans le cas de pluie de longue durée, les banquettes SGH et SGC ont un comportement un peu moins défavorable. La lame d'eau ruisselée par-dessus la banquette est légèrement plus importante. Néanmoins, l'analyse comportementale du transport des polluants a montré que la majeure partie de ceux-ci est mobilisée durant les orages. Ainsi, le comportement hydraulique des banquettes pendant l'orage revêt une plus grande importance que pendant les longues pluies.

La banquette SGL, quant à elle, ne montre pas de différence de comportement significative en fonction du régime des précipitations.

#### **4.4 Bilan du comportement hydraulique et chimique**

Les événements décrits dans ce rapport et ses annexes, qu'ils soient naturels ou artificiels, permettent de connaître le comportement de l'infiltration sur les bas-côtés dans les conditions hydrométéorologiques variables qu'a vécu et qu'est appelée à vivre la station de Grandson. Résumons ce comportement d'abord pour une précipitation moyenne ordinaire puis nous verrons comment se différencie ce comportement pour des pluies plus faibles ou plus fortes. Finalement, nous verrons ce qui peut se passer dans le cas de pluies hivernales et de fonte de neige.

##### *4.4.1 Cas d'une pluie ordinaire de moyenne durée et d'intensité moyenne*

###### **(A) Ruissellement routier**

La pluie commence par lessiver les particules sur la chaussée. Ce lessivage comporte déjà un emportement mécanique des particules qui va donner lieu à un premier écoulement fortement chargé en particules en suspension. Il est suivi de près par un écoulement de matières à l'état colloïdal puis par une eau fortement chargée de polluants en solution. Cet ensemble constitue le « first flush » (au sens large) qui arrive sur la banquette. La concentration en polluants provenant de la chaussée diminue ensuite avec la durée de l'événement. Toutefois, nous avons constaté que dans la plupart des cas, une deuxième « vague » pollutive arrive au cours de la décrue, provenant probablement d'un zonage pollutif sur la route lié aux deux voies de circulation. L'effet « first-flush » est plus important lors d'orages.

### (B) Ruissellement sur la banquette

D'une manière générale, si la banquette est désaturée avant la précipitation, on observe qu'elle n'infiltré que très peu d'eau dans un premier temps, en raison de sa relative imperméabilité liée à la présence d'air dans les pores. Cette propriété est bénéfique puisqu'elle permet de conduire les eaux chargées du first flush sur le talus d'infiltration par ruissellement. L'infiltration dans la banquette ne devient significative que plus tard, lorsque le front d'humidification aura suffisamment progressé vers le bas. L'infiltration constitue ainsi un volume d'eau au sein de la porosité de la banquette. Une fois que le front d'humidification a atteint la base de la banquette, l'eau percole dans la fondation de la chaussée. Les mesures montrent en effet qu'il n'y a pas d'effet « barrière capillaire » au contact banquette – grave I de fondation (car c'est le même matériel). Une fois que la percolation a cessé, un stock subsiste dans la banquette correspondant à une saturation inférieure à 10% ( $0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ; mesures effectuées avec une sonde TDR). L'eau de ce stock va être en grande partie évaporée, laissant sur place. L'eau de ce stock va être en grande partie évaporée, laissant sur place les polluants infiltrés, à disposition pour être lessivés lors d'un nouvel événement de percolation.

Selon le type de banquette, ce comportement général va beaucoup varier, notamment la part d'eau conduite à l'endroit où elle doit aller : le talus d'infiltration. Or, le problème clé de la répartition ruissellement – infiltration au niveau de la banquette dépend de nombreux facteurs :

- matériau (gravier): le matériau conditionne de nombreux paramètres essentiellement liés à la porosité, l'agrégation et à la structure du sol. Il conditionne notamment la conductivité hydraulique verticale. La présence de matériau gonflant influe sur la porosité et l'organisation de cette dernière.
  - agrégation : surtout lié à la présence d'argile et, en général, de matériau gonflant, l'agrégation et la floculation jouent un rôle prépondérant dans la distribution de la porosité et de la tortuosité.
  - porosité : l'effet de la porosité, notamment de la macroporosité, est prépondérant. Une macroporosité peu développée donne lieu à une infiltration lente ainsi qu'à une vidange lente du stock d'eau dans les pores. La différence de taille en macro et micro porosité influe fortement sur l'hystérèse de la fonction de succion-saturation. La porosité joue également un grand rôle dans le stockage.
- battage : les gouttes de pluie frappant le sol de la banquette le rendent plus dur, formant une croûte peu perméable. Le phénomène sera d'autant plus fort que le sol est nu et est contenant des fines.
- humidité et saturation : une banquette déjà humide ou saturée offre une résistance minimale à l'infiltration. En effet, la conductivité hydraulique verticale  $k$  augmente avec l'humidité, atteignant son maximum  $k_s$  à saturation.
  - saturation en air : lors de longue périodes sèches, la teneur en eau du sol diminue rapidement au début, laissant place à de large vide. La saturation en air peut offrir une forte résistance à l'infiltration en créant une véritable barrière capillaire. En outre, la propagation du front d'humidification se fera de manière plus lente en cas de sol sec et ce, par capillarité. Le phénomène d'humidification sera accéléré en cas de macroporosité développée.

- ETP : une évapotranspiration forte lutte efficacement contre l'écoulement gravitaire et la capillarité mais peut, en cas de présence d'argile, créer des fissures.
- Végétation: la végétation pompe l'eau dans les premier cm de sol, à plus forte raison s'il ne s'agit que d'herbe (racines courtes). La végétation peut ainsi capter pour sa consommation de grandes quantités d'eau.
  - une végétation bien développée crée de nombreux passages d'infiltration préférentielle le long de ses racines. Elle augmente ainsi la perméabilité.
  - les feuilles diminuent considérablement le phénomène de battage, permettant aux gouttes de pluie d'atteindre le sol le long des feuilles et tiges.
  - La végétation ralentit le ruissellement horizontal et augmente ainsi le temps de transit de l'eau de la route au talus d'infiltration, offrant plus de temps à l'eau pour s'infiltrer.
- Pente de la banquettes : à l'instar de la végétation, une pente de la banquettes faible ou tout autre paramètre augmentant le temps de transit du ruissellement sur la banquettes favorise l'infiltration. Inversement, les paramètres réduisant le temps de transit améliorent le rendement du ruissellement de surface.

Dans les banquettes testées sur la station de Grandson, la banquettes Gravier – humus présente la plus faible efficacité puisque la presque totalité du ruissellement routier s'y infiltre. Le résultat est à peine meilleur pour la banquettes gazon - gravier. La banquettes gravier – argile montre une amélioration mais reste très insuffisante puisque la quantité d'eau qui parvient sur le talus reste inférieure à 50%. Les banquettes construites avec un étanchement montrent un résultat meilleur, surtout pour la banquettes géotextile bentonite qui conduit pratiquement la totalité de l'eau sur le talus. Ainsi, le comportement général des banquettes est semblable au comportement observé lors de l'essai n°2, ce dans toutes les conditions hydrométéorologiques.

#### (C) Infiltration dans le talus

L'eau transmise par les banquettes s'infiltre sans difficulté dans les talus tels que construits sur cette station. Aucune érosion, ni instabilité au glissement n'ont en effet été mises en évidence durant le vécu de la station. Les analyses d'eau à la base des lysimètres prouvent une excellente rétention des polluants, comparés à la chimie du ruissellement brut. L'infiltration sur le talus en contact avec la nappe ne montre pas la moindre immission dans cette dernière. Rappelons que le talus en face de la banquettes HMF prolongé doit présenter un effet de by-pass court-circuitant le cheminement des polluants au travers du sol.

#### 4.4.2 Autres comportements en cas de conditions hydrométéorologiques différentes

##### (A) Modification de l'intensité de la pluie

- Une hausse de l'intensité pluviale entraîne un lessivage particulière accru de la chaussée donc un first flush plus prononcé.
- De manière générale, plus l'intensité est forte, plus le front d'humidification se propage rapidement au travers de la banquettes. Ainsi, l'exfiltration sous la banquettes est accélérée.

- Une intensité plus forte augmente les pertes à travers les banquettes, exception faite de la banquette gravier-argile
- Une forte intensité pluviale peut dépasser la capacité d'infiltration du talus ; l'eau chemine alors dans le petit fossé en pied de talus. Ce cas ne s'est jamais produit dans la station de Grandson.

#### (B) Modification de la hauteur d'eau précipitée

- Plus le volume d'eau à infiltrer augmente, plus les pertes dans les banquettes sont importantes. Ceci est causé par une humectation de la banquette plus importante. Or la conductivité hydraulique (capacité à conduire l'eau) augmente, et la succion (capacité de la banquette à « retenir » l'eau) diminue, lorsque l'humidité de la banquette augmente. De fait, plus le volume de pluie est important, plus la banquette percera.

#### 4.4.3 Cas particulier des conditions hivernales

La station de Grandson n'a pas permis de tester des conditions hivernales drastiques en raison de la faible altitude du site (450 m). Nous n'avons pas observé de gel véritable du talus d'infiltration ni de diminution des performances de ce dernier. Il est probable que le salage hivernal laisse suffisamment de traces de chlorure de sodium dans les pores du terrain pour réduire le risque de gel de la surface d'infiltration. Toutefois, il faut considérer que, dans le cas d'une route à plus haute altitude, le pouvoir infiltrant du talus soit notablement réduit en cas de gel intense. La présence de murs de neige sur la banquette ne pose pas de problème si la banquette est étanche.

### 4.5 Localisation de la rétention des polluants dans les sols

Neuf échantillons ont été pris dans le talus d'infiltration bordant SB (fig. 4.9a). Le choix s'est porté sur ce talus car la très bonne imperméabilité de la banquette (géotextile bentonite) garantissait qu'un maximum de polluant soit dirigé vers le talus. Les concentrations enregistrées dans les sols correspondent donc bien à une pollution maximale.

La figure 4.9b (vert) montre la concentration totale des éléments traces minéraux (plus forte concentration en foncé). Il apparaît que ces éléments traces sont principalement retenus dans l'horizon B, juste au-dessous de l'interface horizon A – horizon B. Cela est dû au pH élevé rencontré dans l'horizon B, lui-même causé par la faible teneur en humus et au taux de carbonate important.

La figure 4.9c (bleu) montre quant à elle la concentration totale de HAP. Ceux-ci sont principalement retenus dans l'horizon A, proche de la surface. Ceci est dû à la forte teneur en humus dans cet horizon qui privilégie la rétention des polluants organiques. La présence de forte concentration de HAP en milieu de pente démontre également que le ruissellement existe en surface.



#### 4.6 Emission polluante et comparaison avec les normes

Selon l'annexe 3.3, Ch. 1 al. 2 de l'OEaux, les eaux polluées des voies de communication font partie des eaux polluées (*lato sensu*) et sont ainsi soumises à des conditions spéciales pour l'infiltration (art. 8 OEaux). On lit notamment dans cet article que "L'autorité peut autoriser l'infiltration (...) si les eaux du sous-sol concernées respectent, après infiltration des eaux polluées, les exigences de qualité des eaux définies dans l'annexe 2 (de l'OEaux, nldr)". Les exigences concernant la qualité des eaux souterraines après immission sont ainsi fixées dans l'annexe 2 de l'OEaux à l'article 22 « Exigences complémentaires pour les eaux du sous-sol utilisées comme eau potable ou destinées à l'être ». Toutes les substances analysées respectent les valeurs de l'OEaux.

Pour préciser le degré de pollution résiduel, il est intéressant de comparer aussi ces concentrations avec d'autres listes plus complètes qui concernent les eaux. Ce sont notamment :

- OSEC : les valeurs dites « tolérées » et les « valeurs limites »
- MSDA : les « valeurs directrices » du Manuel sont intéressantes pour faire la comparaison avec la qualité requise pour les eaux de boisson.

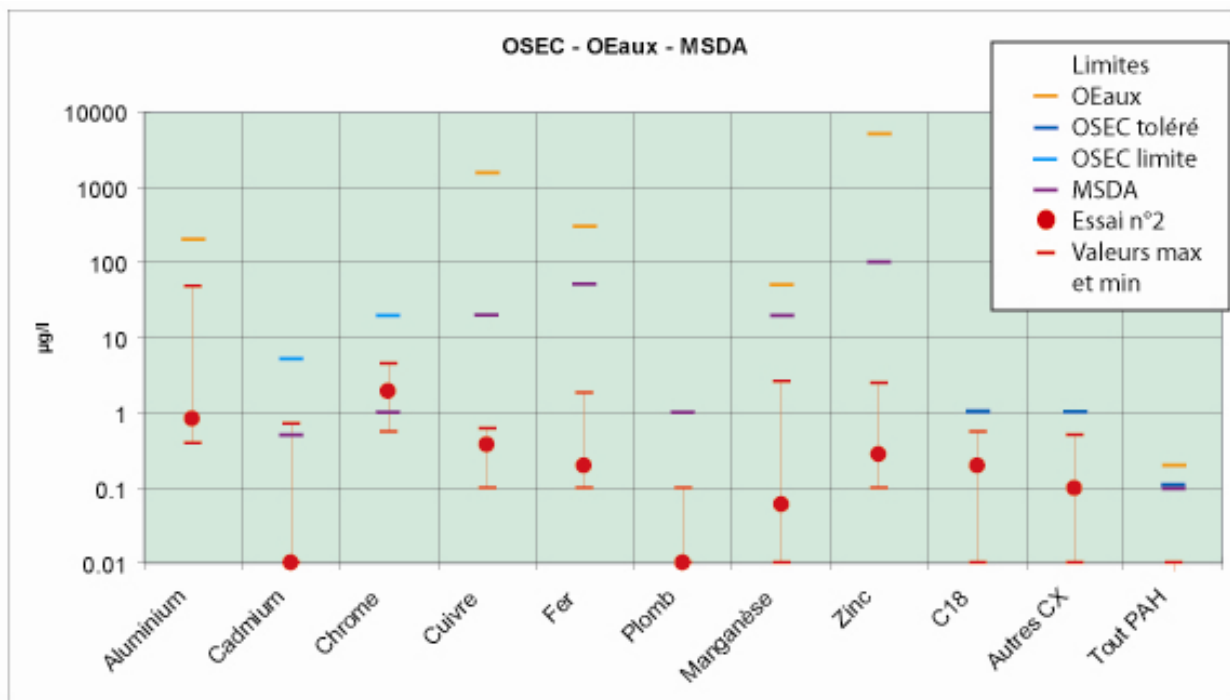


Figure 4.10: Concentrations maximales, minimales et enregistrées durant l'essai n°2 dans la nappe, en aval du site test. Ces concentrations sont comparées aux valeurs limites exigées par les trois normes OEaux (annexe 2, OSEC et MSDA). De manière générale, les concentrations dans la nappe sont inférieures aux limites des normes, exception faite de la norme MSDA pour certains polluants.

Le graphique de la figure 4.10 montre ces comparaisons. Les concentrations choisies pour comparaison proviennent de la sortie du lysimètre LH qui montra les concentrations de pic les

plus hautes (pendant la période d'observation et pendant l'essai artificiel n°2). La période d'observation pour les valeurs maximales et minimales observées est 2005. Ces remarques valent également pour la figure 4.11. On observe en particulier que:

- Toutes les substances analysées respectent les valeurs de l'OEaux.
- Toutes les substances analysées respectent les valeurs de l'OSEC.
- Le cadmium dépasse les valeurs du MSDA. Néanmoins, comme il a été démontré précédemment, cela n'est pas dû à l'infiltration du ruissellement routier. Ces valeurs sont en effet les mêmes en amont et en aval de la route.
- Le chrome total dépasse parfois la limite du chrome (VI) fixée par le MSDA mais pas celle de l'OSEC. Le milieu étant oxydant, il faut considérer par prudence que le chrome total est surtout sous forme 6+. La toxicité du chrome (VI) est élevée.
- Les autres substances, notamment les plus toxiques comme les PAH, restent nettement au-dessous de toutes les valeurs limites.

Le fait que la composition des eaux de la nappe soit très similaire dans les piézomètres en amont et en aval de la route montre que l'infiltration du ruissellement routier sur le talus n'affecte pas significativement la qualité des eaux souterraines. Cependant, on observe qu'il existe certaines substances polluantes (par exemple Cr, V, les PAH, le MTBE et le C<sub>18</sub>) déjà en amont de la route. Leur origine est certainement à chercher dans l'effet de la nébulisation des eaux de la chaussée et la pollution sèche transportée par le vent bien au-delà des talus.

Les percolats des deux lysimètres sous talus d'infiltration permettent de caractériser la pollution résiduelle des eaux routières au sortir du dispositif d'épuration. Les nombreuses analyses effectuées au cours des divers événements, qui sont présentés dans le CD ci-joint, peuvent être comparées à des normes traitant des émissions polluatives. Dans les réglementations fédérales, l'Ordonnance sur les sites contaminés (OSites) donne une liste de valeurs limites d'émission qu'il est intéressant de comparer avec les valeurs d'émissions routières après infiltration au travers du talus. La figure 4.11 ci-après montre les exigences fédérales ainsi que les concentrations rencontrées en sortie des lysimètres. Ces dernières sont toujours très inférieures (ce de plusieurs ordres de grandeur) aux valeurs de l'OSites. Ainsi, les niveaux d'émission du site de Grandson sont jugés très faibles.

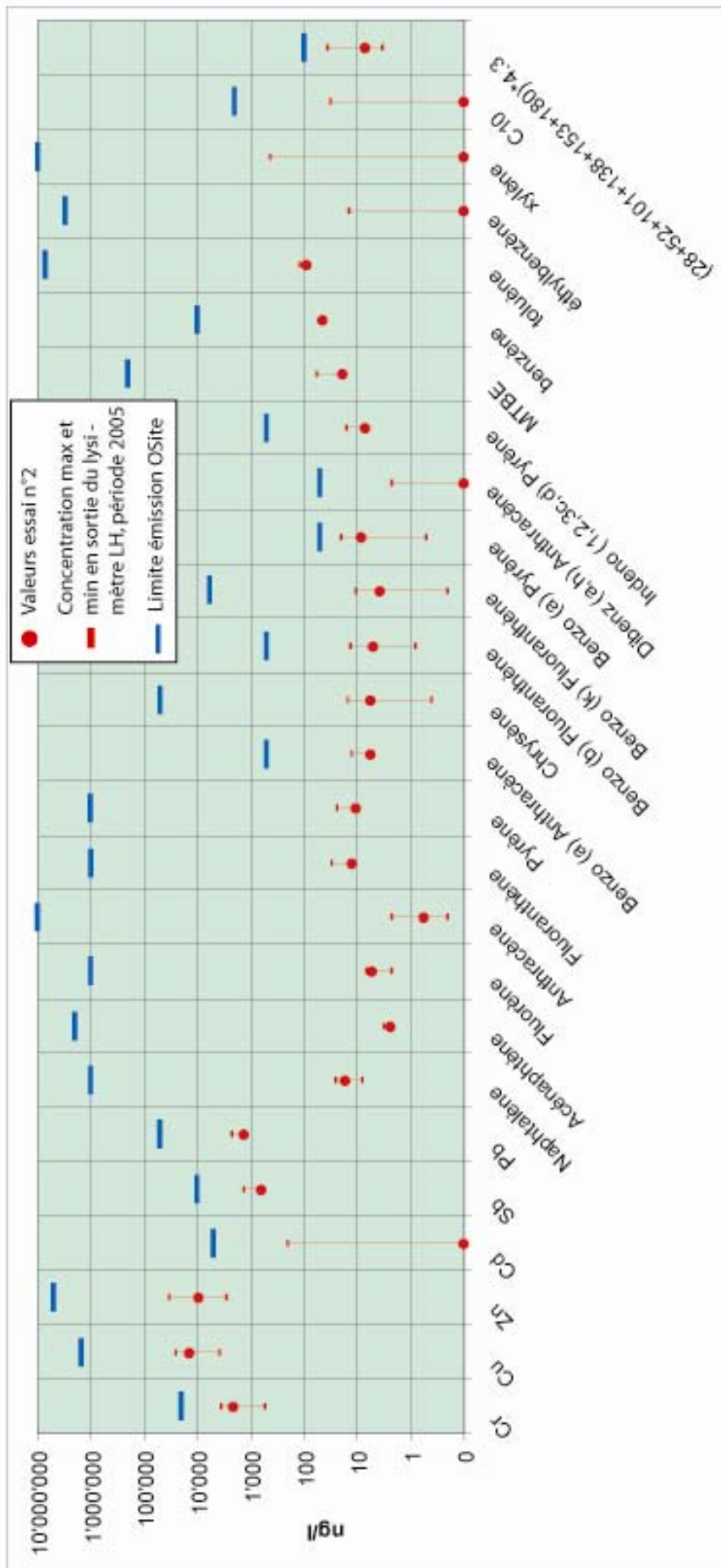


Figure 4.11 : Concentrations maximales, minimales (année 2005) et enregistrées durant l'essai n°2 (rouge) en sortie du lysimètre LH. Ces valeurs d'émission sont comparées aux valeurs limites de l'OSite. En tout point, les valeurs enregistrées sur le site expérimental de Grandson sont largement inférieures aux valeurs de l'OSite, et ce de plusieurs ordres de grandeur.

## 5 Résultats du suivi géotechnique de la chaussée

Le Laboratoire des voies de communication de l'EPFL (LAVOC) a suivi son instrumentation durant la même période d'observation. De nombreux essais ont été réalisés, dans différentes conditions hydrométéorologiques. Le LAVOC a établi un bilan complet de ses résultats qui sont consignés en détail dans son rapport qui figure intégralement en annexe VI. Les données de nivellement sont les plus facilement utilisables pour répondre aux questions principales du projet.

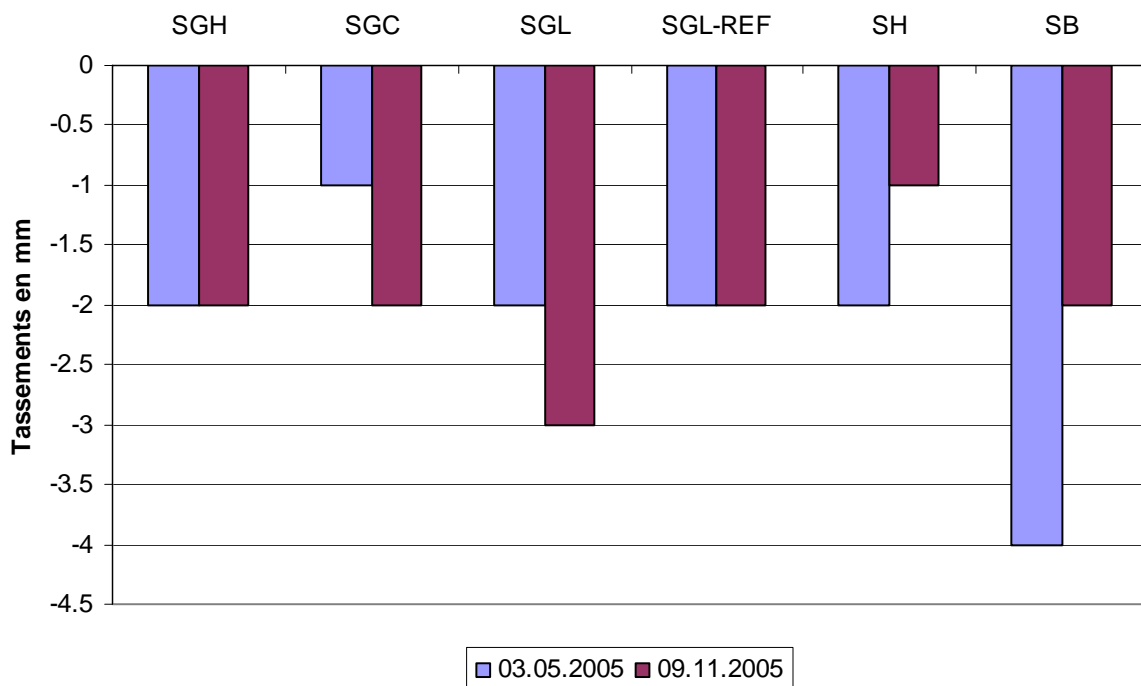


Figure 5.1 : Comparaison des tassements pour les différentes banquettes. La banquette de référence est la banquette gazon - gravier de 20 m (SGL-REF). De manière générale, les tassements ne montrent pas d'évolution.

Les résultats essentiels sont les suivants :

- les mesures de nivellement montrent un tassement de la chaussée côté banquette extrêmement faible, variant entre 2 et 4 mm selon les points (figure 5.1)
- ces tassements apparus à la première mesure par rapport à la situation de départ n'ont pas évolué avec le temps
- le tronçon en face de la banquette gazon – gravier non équipée d'un collecteur d'eau sous banquette (tronçon SGL-REF), donc le tronçon ayant reçu de grandes quantités d'eau dans la fondation, ne montre pas des tassements supérieurs aux autres tronçons. Ceci s'est confirmé également suite à l'arrosage massif correspondant à l'essai de pluie artificielle no 3 (voir Chapitre 4)

- La piste direction Grandson, également mesurée régulièrement, n'a subi aucun tassement ; ceci provient du trafic excessivement faible dans ce sens (10 à 15 % du trafic total)
- Le remblai, important dans la partie NO de la route, a été effectué avec des marins de tunnels en calcaire ; ses qualités géotechniques sont à peu près identiques à la grave I utilisée pour la fondation ; la superstructure de la chaussée est aussi largement dimensionnée. La non-déformation de la chaussée est donc à moduler en fonction de ces conditions particulièrement favorables.

En conclusion, même si aucune déformation spécifique à l'infiltration d'eau n'a été mise en évidence, il est nécessaire de réduire le plus possible les pertes d'eau entre la chaussée et le talus d'infiltration pour le cas où des remblais plus sensibles à l'eau sont utilisés.

## 6 Synthèse sur le comportement de la station pilote et recommandations pratiques

### 6.1 Réponses aux objectifs fixés par le projet

La station expérimentale a apporté les réponses pratiques fixées dans les objectifs du projet. Les voici en fonction de ces objectifs.

#### *Il faut une étanchéité artificielle dans la banquette*

Les diverses banquettes sans couche d'étanchéité ont toutes donné des pertes trop importantes du ruissellement routier, légèrement plus faibles dans la banquette gravier-argile. Il serait inutile de construire un talus d'infiltration sophistiqué si une bonne partie de l'eau n'y parvient jamais.

#### *L'étanchéité par un prolongement du HMF sous la banquette n'est pas efficace*

Même si ce système est a priori plus commode au point de vue construction routière, les débits qui traversent cette couche sont trop importants. Il faut aussi être conscient du fait que si cette couche vient à être percée par la mise en place d'un équipement de bordure de chaussée, la fuite provoquée sera durable.

#### *Le géotextile à bentonite sodique montre une étanchéité quasiment totale*

Ce produit n'a pratiquement jamais laissé passer de l'eau en quantités significatives. De plus, la bentonite lui confère une certaine capacité d'auto-cicatrisation en cas de perforation, avantage notable en ce qui concerne la durabilité de l'installation.

#### *Le talus d'infiltration a bien fonctionné hydrauliquement*

Les trois segments équipés d'un talus d'infiltration ont montré qu'ils étaient capables d'absorber l'eau des événements pluvieux sans créer d'inondation à leur pied, ni glissement de terrain.

#### *L'épuration des eaux au travers des sols du talus a été très performante*

Les analyses des eaux ayant percolé dans les deux lysimètres démontrent la grande efficacité des sols du talus à la rétention d'une grande partie des polluants routiers. Le segment donnant lieu à une infiltration dans la nappe souterraine confirme la bonne performance générale avec des immissions indétectables, même au niveau des traces.

#### *Le système est compatible avec un chantier de construction routière*

Le test pratique de la construction des installations a été mené avec succès. La banquette à bentonite est aisée à mettre en place. Le talus d'infiltration est plus délicat à réaliser pour garantir une constance de la composition des horizons et des épaisseurs. La teneur en eau du sol joue un rôle déterminant.

## 6.2 Recommandations pratiques

Les essais effectués sur la station pilote de Grandson permettent de donner aux ingénieurs de routes des recommandations très utiles pour la mise en pratique du concept d'infiltration sur les talus préconisé par l'OFEV.

### 6.2.1 Construction de la banquette

Les différentes banquettes étudiées dans ce projet ont révélé des comportements très différents. Les résistances à l'infiltration de celles-ci sont en effet qualifiables de « médiocres » à « excellentes ». La banquette doit garantir que le ruissellement routier parviendra bien au talus d'infiltration : une autoépuration biologique et une rétention efficaces n'apparaîtront que dans les sols du talus et non dans les banquettes. Aussi, les banquettes ont un potentiel de relargage de polluants beaucoup plus important. Pour minimiser les risques géotechniques à la chaussée, il est également impératif d'éviter toute percolation massive à travers la banquette.

La banquette avec géotextile à bentonite sodique montre le meilleur comportement. En effet, ce géotextile permet de préserver la fondation de toute amenée d'eau par infiltration. Il possède en outre des caractéristiques très favorables :

- Le fait que la bentonite est prise entre deux nattes de géotextile tissé empêche tout lessivage (a contrario de l'argile mélangée au gravier comme dans la banquette gravier - argile). Le matériau reste en place durablement.
- Sa propriété auto-cicatrisante lui confère une très bonne durée de vie par rapport au risque de perforation et permet la pose de signaux routiers si les diamètres de fonçage ne sont pas trop importants (< 10 cm)
- Le fait que le géotextile se présente sous forme de rouleaux rend la pose par les constructeurs de route facile et rapide. La largeur des rouleaux peut être dimensionnée en usine pour cette application spécifique.
- Le surcoût par rapport au mètre courant de chaussée est dérisoire, que ce soit au niveau du matériel (le mètre carré de géotextile bentonite coûte CHF 14) ou de la pose.

Ainsi, de manière générale, la banquette à géotextile bentonite devra être préférée en raison de son imperméabilité pratiquement totale.

La structure de banquette construite à Grandson contient la natte de bentonite au toit de la fondation. Notamment, elle suit ce contact au début du talus, afin d'éviter tout retour d'eau capillaire dans la fondation (fig. 6.1A). Cette configuration présente toutefois un léger désavantage par rapport à l'écoulement de l'eau dans le sol du talus d'infiltration : les eaux retenues par le géotextile sont acheminées contre l'horizon A et près du toit de l'horizon B ; ceci fait participer relativement peu l'horizon A pour ces eaux du stock qui arrivent dans le talus latéralement. Une autre variante est envisageable pour neutraliser cet effet : la natte serait prolongée jusqu'à l'interface horizon A – horizon B, au toit de ce dernier (fig. 6.1B). Ainsi, les écoulements mettraient beaucoup plus à contribution l'horizon A dans l'infiltration. Cette

variante est en revanche un peu plus risquée par rapport à la stabilité du talus en cas de fortes précipitations.

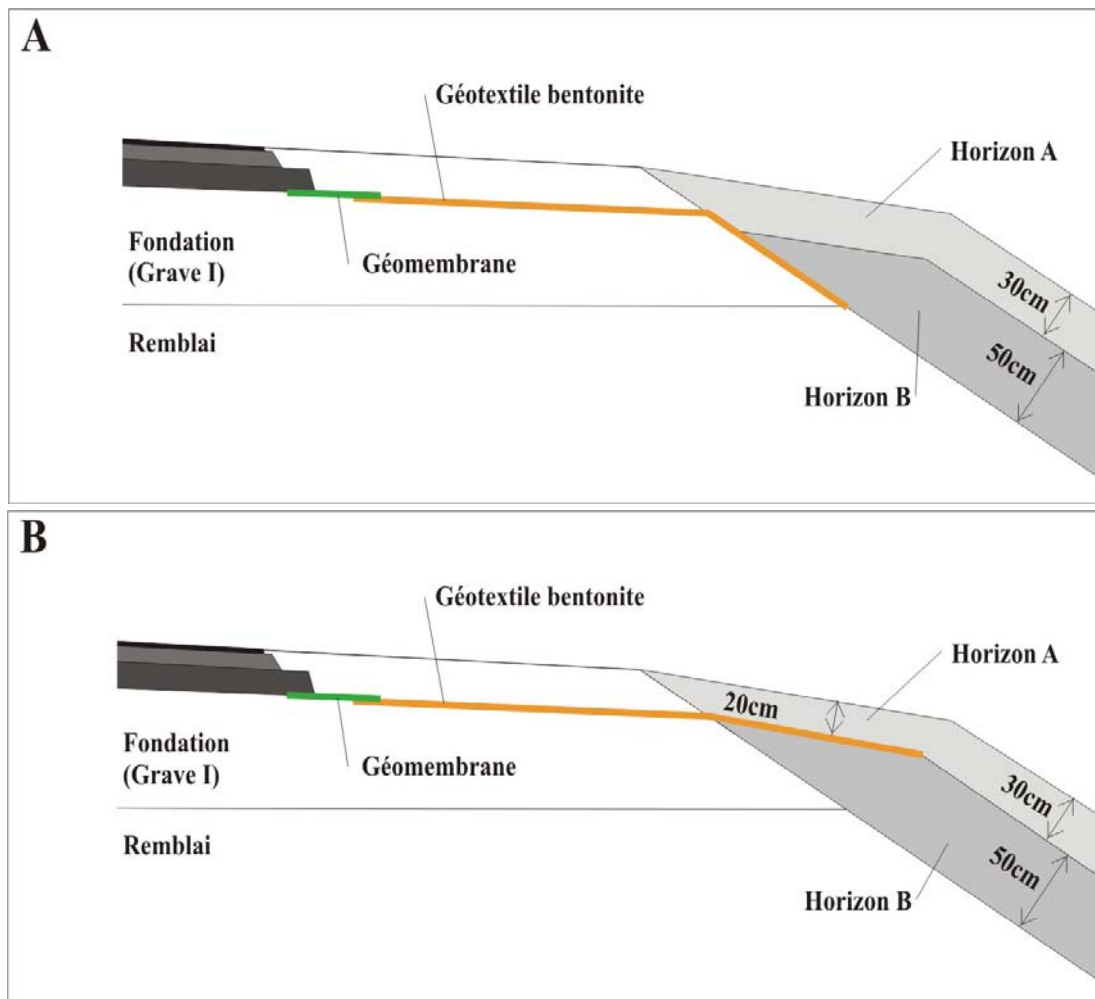


Figure 6.1: Banquette à géotextile bentonite. (A) configuration testée dans le cadre de la station de Grandson. Le géotextile suit le toit de la fondation. (B) Autre variante de configuration destinée à augmenter la participation de l'horizon A à la rétention des polluants. Ce changement de configuration pourrait impliquer, dans le cas de routes à enrobé bitumineux peu épais, un amincissement de l'horizon A dans la partie supérieure du talus d'infiltration.

Dans le cas de réfection de routes existantes, où l'on ne touche pas au revêtement de la route, une nouvelle banquette à géotextile bentonite peut être construite en même temps que l'on met en place le talus d'infiltration. La géomembrane de liaison avec l'enrobé n'est plus nécessaire ; elle est remplacée par de la bentonite pulvérulente qui recouvre le joint entre l'enrobé et le géotextile (fig. 6.2).

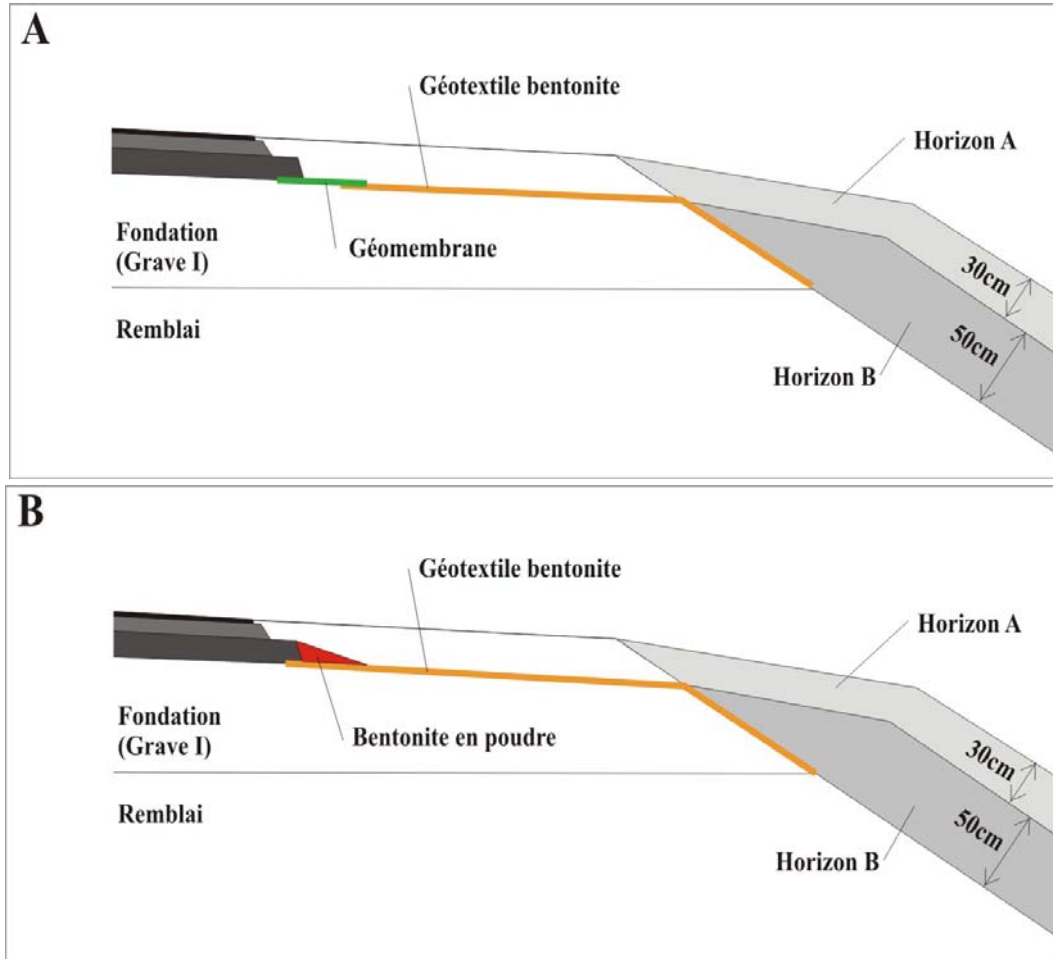


Figure 6.2: (A) Pose de la natte à bentonite dans le cas d'une nouvelle route avec la géomembrane sous l'enrobé bitumineux, comme réalisé sur la station. (B) Dans le cas de la réfection d'une route, sans enlèvement du HMF, la géomembrane de liaison n'est plus nécessaire ; le géotextile est posé contre l'enrobé ; de la bentonite en poudre est répartie sur le joint pour assurer l'étanchéité.

Dans le cas où des glissières de sécurité devraient être posées, il existe un certain risque que la fonction auto-cicatrisante soit insuffisante pour garantir l'étanchéité autour des profilés servant de fondation à la glissière. Il conviendrait alors de placer sur la natte de bentonite une banquette gravier – argile similaire à celle testée à Grandson. Toutefois, on aurait intérêt à améliorer ses caractéristiques d'étanchéité en augmentant légèrement la teneur en argile du mélange (pour prévenir les phénomènes d'empatement des fines constatés à Grandson) et en augmentant également son épaisseur (fig. 6.3). Une optimisation d'une telle banquette, tenant compte de la diminution de portance, devrait être encore étudiée.

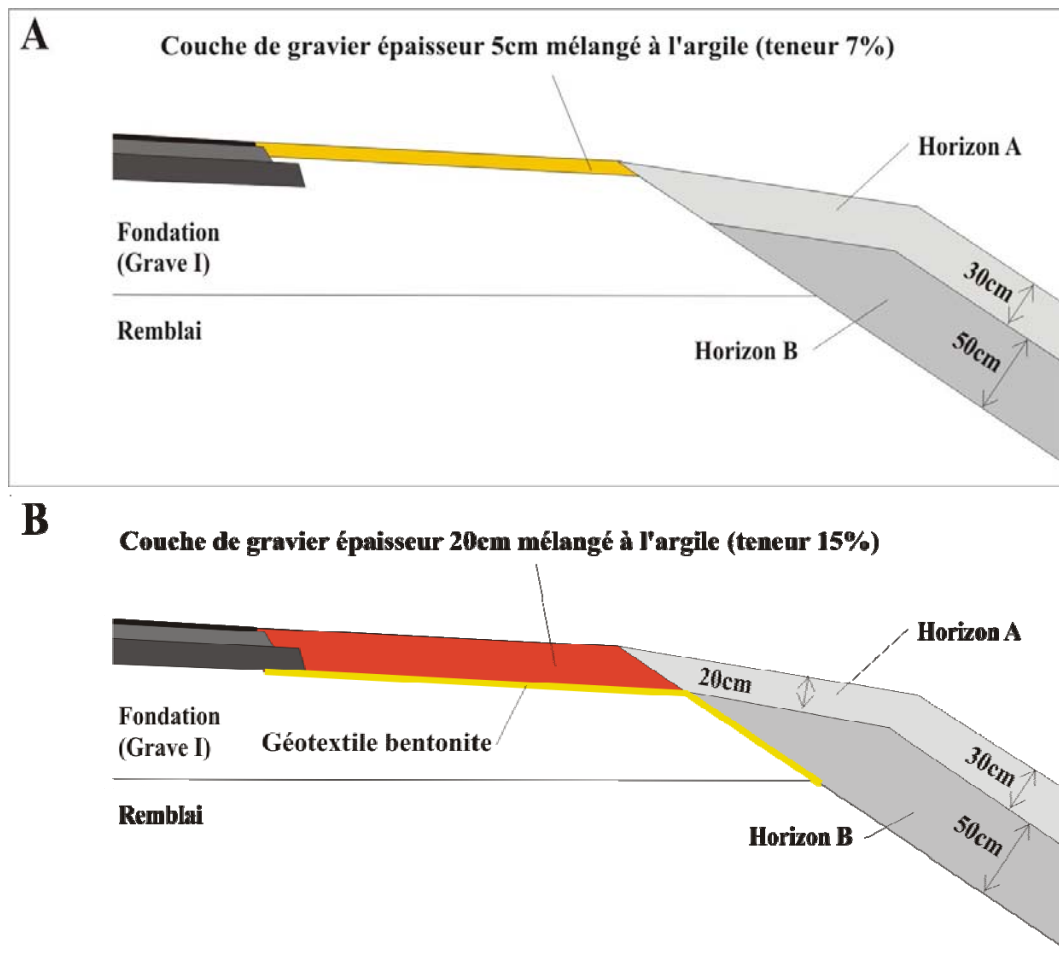


Figure 6.3: Banquette gravier – argile testée à Grandson (A) et variante proposée (B)

### 6.2.2 Construction du talus d'infiltration

En ce qui concerne le talus d'infiltration, les expérimentations faites sur la station de Grandson montrent que le concept préconisé par l'OFEV remplit bien ses missions hydraulique et environnementale (mis à part l'hydrocarbure aliphatique  $C_{18}$ ), ceci malgré une teneur en humus légèrement au-dessous de l'optimum dans notre horizon A. Cependant, nos conclusions quant à la teneur en argile diffèrent de la conception exprimée dans les Instructions de l'OFEV. En effet, dans cette directive, un accent très fort est donné à la teneur en argile, afin d'assurer les

mécanismes de sorption de polluants. Toutefois, il ne faut pas oblitérer des effets pervers issus de hautes teneurs en argile des sols :

- développement de la macroporosité structurale due aux phénomènes de retrait (voir conclusion du rapport LPE annexe II)
- reptation du sol sur le talus par fluage.

En conséquence, nous pensons qu'il serait judicieux d'ouvrir la possibilité d'utiliser des sols à matrice fine mais présentant moins de 10% d'argile (limite inférieure des Instructions de l'OFEV).

### **6.3 Discussion des résultats obtenus sur la station expérimentale**

Les résultats obtenus à Grandson et leur implication dans des recommandations ont fait l'objet de discussions, notamment au sein de la commission EK 2.07 de la VSS. Certains membres de cette commission ont des opinions différentes des recommandations que nous faisons dans ce rapport. Ces points sont discutés ci-dessous.

#### *6.3.1 A propos de l'étanchement par le géotextile bentonite*

Certains membres de la commission pensent que l'étanchement avec un géotextile bentonite présente des risques de ne pas être étanche dans une banquette à 25 cm de profondeur en raison du poinçonnement par des cailloux aigus, du percement par la végétation et qu'il pourrait perdre ses propriétés d'étanchéité en période sèche. En outre, cette étanchéité serait compliquée à mettre en place, donc coûteuse.

Il est vrai que la pose d'un géotextile bentonite doit être effectuée avec soin. Toutefois, si l'on compare cette couche d'étanchéité avec une géomembrane, la propriété d'autocolmatage par l'argile bentonitique rend l'opération beaucoup moins risquée qu'avec une feuille à souder. La pratique du chantier de Grandson a montré que la pose de l'étanchéité n'a pas entraîné le moindre problème, bien que les rouleaux ne fussent pas adaptés à la largeur de la banquette. La pose de la feuille plastique de transition sous le HMF n'a pas montré de difficulté non plus. Les surcoûts issus de la pose d'une étanchéité bentonite sont donc négligeables par rapport à la construction de la banquette et du talus.

Les performances d'étanchéité ont en outre été attestées par des mesures objectives et incontestables : jamais au cours des 2.5ans d'observation, quel que soit le régime des précipitations, la banquette n'a laissé filtrer un débit significatif. De plus, ce test n'est pas un essai de laboratoire où les matériaux sont testés sur de petites surfaces. A Grandson, c'est un segment de 20 m de longueur qui a été testé en conditions réelles de chantier routier. On sait à quel point ce facteur d'échelle est important lorsque l'on teste des géomembranes par exemple. La performance mesurée à Grandson est donc généralisable si les conditions de pose préconisées sont respectées. Les mesures effectuées en 2007 montrent que cette étanchéité est toujours excellente, après 4 années de service. Celle-ci sera encore contrôlée durant les 5 ans à venir à l'occasion de la surveillance allégée de la station instaurée par le canton de Vaud.

Mentionnons enfin que nos expériences avec ce matériau dans d'autres conditions d'utilisation (en particulier pour l'isolation d'eaux polluées) ont toujours été positives. Nous ne sommes pas en mesure de nous prononcer sur les raisons des expériences malheureuses de certains membres de la Commission puisque ces cas ne nous ont pas été référencés.

### 6.3.2 A propos de la banquette gravier – humus

Certains membres de la Commission ne comprennent pas pourquoi la banquette gravier – humus n'a pas été étanchée, par exemple avec une natte bentonite.

Le but de cette banquette demandée par M. Vögt était de montrer quelle performance d'étanchéité elle présentait par rapport à la banquette standard de référence gazon – gravier, grâce à un substrat plus riche en matière organique, donc plus favorable à la création d'une véritable pédogenèse. Il n'aurait servi à rien de la munir d'une étanchéité à la bentonite puisque cette étanchéité était l'objet d'un segment de 20 m instrumenté spécifiquement pour la tester. Les résultats confirment une forte perméabilité de la banquette qui rend celle-ci inutilisable si l'on veut conduire l'eau dans un talus spécialement conçu pour l'infiltration. En revanche, si l'on voulait infiltrer directement dans une banquette, cette solution était théoriquement plus favorable qu'une banquette purement minérale puisqu'elle devait agir plus efficacement à la dégradation des polluants organiques. Or les analyses de polluants faites dans l'exfiltration sous-banquette nous ont démontrés que ce n'était pas le cas, puisque la banquette gravier gazon était plus efficace pour retenir les polluants organiques, et la banquette gravier-argile plus efficace pour retenir les ETM. Rappelons que l'OFEV prescrit l'infiltration sur le talus et non dans les banquettes.

### 6.3.3 A propos de la banquette gravier – argile

La banquette gravier – argile a été abondamment discutée avec la Commission puisque c'est cette solution qu'elle souhaite privilégier dans la norme en projet. Or, les résultats obtenus avec une telle banquette sur la station de Grandson sont peu satisfaisants. En effet, lors du test quantitatif de pluie artificielle de juin 2005 (voir § 4.2.2), une majeure partie de l'eau s'est infiltrée dans le corps de la banquette et une partie s'est même écoulée à la base dans le collecteur sous-banquette. Dans le cas des pluies de longue durée, ce comportement a été meilleur, avec une plus grande quantité d'eau qui a été acheminée au talus d'infiltration. Il est vrai que la banquette gravier – argile testée à Grandson n'était pas dans des conditions les plus optimales possibles, et ceci pour les raisons suivantes :

- Les différentes banquettes testées sont minces (5 cm), condition fixée par le Service des routes du canton de Vaud pour avoir une banquette stabilisée (fourchette inférieure de la norme 640 744).
- Bien que la teneur en argile soit conforme à la norme 640 744 « couche de roulement argileuse », le reste de la granulométrie est différente de celle recommandée dans ce document ; pour des raisons pratiques de chantier, c'est une grave I dont on a enlevé les graviers grossiers (Ø max 20mm) qui a servi pour être mélangée à l'argile. On a donc dans le mélange moins de sable et de limons.

- Les particules argileuses ont subi une forte érosion superficielle et souterraine, ce qui a réduit la fraction argileuse du mélange, la faisant tomber en dessous de 4% après seulement 1 année.

La faible épaisseur constitue un certain handicap en rendant le corps de la banquette globalement plus perméable que si l'épaisseur totale de la banquette était faite d'un tel mélange. L'effet de l'érosion superficielle est aussi aggravant dans le cas d'une banquette mince. En revanche, la différence des fractions grossières du mélange entre la norme 640 744 et la préparation qui a été faite sur le site n'a pas une influence majeure. C'est surtout la teneur en argile qui contrôle la perméabilité du mélange. On peut donc penser qu'une banquette gravier – argile plus épaisse, avec une teneur en argile supérieure pour prévenir la migration des fines, puisse offrir de meilleures performances que cette testée à Grandson. Toutefois, il ne faut pas perdre de vue deux défauts qui auront tendance à demeurer:

- la quantité d'eau qui pénètre dans les pores restera importante, y compris les polluants qu'elle contient. Or ces polluants n'arriveront jamais au talus d'infiltration conçu spécifiquement pour une infiltration environnementalement efficace.
- Il restera une quantité d'eau non négligeable qui pénètre dans la fondation et qui peut fragiliser la structure routière. Il n'y a pas d'effet « barrière capillaire » au contraire de ce qu'invoque un membre de la Commission, comme le montrent les mesures dans le collecteur sous-banquette.

Ainsi, à notre avis, une banquette gravier – argile est certainement le mélange le plus adéquat pour une banquette mais celle-ci doit de toute façon être étanchée à sa base par un géotextile bentonite. Le phénomène de la barrière capillaire qui est sensé se produire lors du contact d'un sol fin sur un sol grossier sans fines est dans les faits un phénomène très fragile. Il suffit que des particules fines migrent par érosion souterraine vers la couche grossière pour que cette « barrière » soit inopérante.

Un système couplé banquette gravier – argile avec géotextile bentonite à la base serait également très performant dans le cas de banquettes qui doivent être abondamment percées sur de gros diamètres et où les capacités d'auto-colmatage de la bentonite pourraient être insuffisantes, par exemple pour des glissières de sécurité.

#### *6.3.4 A propos de la structure du talus d'infiltration*

Certains membres de la Commission ont regretté que l'on ne remette pas en cause la partie « talus d'infiltration », notamment la nécessité d'un horizon B. Lors du dépôt du projet à l'OFROU, les recommandations de l'OFEV venaient de paraître. Le talus tel que recommandé n'avait pas été testé en pratique. Il était logique de profiter de la station expérimentale de Grandson pour vérifier sa faisabilité pratique lors de la construction puis son efficacité hydraulique et environnementale. Il n'aurait pas été judicieux à notre avis de changer ce système fraîchement conçu avant de le tester.

Les essais de Grandson ont montré que le talus tel que recommandé par l'OFEV est très efficace sur tous les plans. Nous avons toutefois fait une recommandation tendant à diminuer la teneur en argile des horizons afin d'éviter l'apparition de macropores de retrait par dessiccation mais aussi des fractures de traction issus de la reptation du talus. Ce suivi de la stabilité du talus et de l'évolution de la macroporosité est du reste un des points importants du suivi allégé de la station qui va durer jusqu'en 2012 (voir chapitre 7).



## 7 Durabilité du système d'infiltration de 2003 à 2009

### 7.1 Cadre du suivi à long terme

Avec la collaboration du Service des routes et du Service des eaux, sols est assainissement du canton de Vaud, nous avons pu poursuivre les expérimentations sur ce site, prévues jusqu'en 2012. Celles-ci se sont concentrées sur les banquettes les moins perméables (SB et SGC), les autres étant abandonnées en raison des fortes pertes d'eau dans la fondation de la chaussée. Les émissions ont continué à être suivies dans le lysimètre LW. Les immissions sur la nappe souterraine de l'Arnon ont été mesurées sur le réseau piézométrique par comparaison amont et aval. Un réseau géométrique a aussi été implanté dans le talus d'infiltration en aval de la banquette SB afin de détecter d'éventuels tassements ou glissements de terrain. Cet examen du talus a aussi porté sur l'éventuelle apparition de macroporosités (niches d'arrachement, trous de rongeurs, fissures de dessiccation etc.).

Au stade du printemps 2009, nous sommes en mesure d'apporter les résultats ci-dessous.

### 7.2 Evolution du talus d'infiltration

Parmi les raisons possibles de l'apparition d'une macroporosité, aucune fissuration notable liée au phénomène de retrait par dessiccation n'a été détectée. En revanche, les deux autres raisons ont donné lieu à des résultats intéressants pour la durabilité du système.

#### 7.2.1 Effets d'origine biologique

Une des craintes quant à l'évolution du talus résidait dans le passage d'une infiltration de micro-pores à une infiltration de macro-pores résultant de processus biologiques. Ceci s'est révélé fondé puisque depuis 2006, de nombreux trous de rongeurs sont apparus sur le talus, créant des by-pass à l'infiltration à travers le sol. La photo 7.1 montre une partie du talus avec des terriers de rongeurs entourés.



Photo 7.1: Terriers de rongeurs affectant le talus d'infiltration du compartiment SB

Une étude quantitative a été menée sur cette nouvelle porosité par le biais d'une mesure systématique du nombre de terriers par segment de talus ainsi que leur profondeur (annexe VII). L'analyse statistique des profondeurs des terriers (fig 7.1) montre que les conduits formés par les terriers, dont l'orientation est normale à sub-normale à la pente du talus, ont une profondeur moyenne d'environ 16 cm. Si certaines profondeurs frisent les 30 cm, correspondant à l'épaisseur de l'horizon A du sol, seules deux mesures dépassent cette limite : l'une est de 38 cm, l'autre est de 81 cm. Ce dernier terrier doit donc avoir complètement by-passé les horizons A et B (compartiment M, en rouge, annexe VII). La profondeur modale est comprise entre 6 et 10 cm. Le 85 % des terriers ne dépassent pas la moitié de l'épaisseur de l'horizon A.

Le principal risque engendré par cette porosité réside dans la fonction filtrante du talus qui s'en trouve amoindrie. Un by-pass de la couverture pédologique mise en place sur le talus réduit forcément l'efficacité environnementale du système. Les fonctions épuratives de la microporosité (contact intime eau - squelette minéral), de la dégradation biologique liée à la matière organique et le temps de séjour dans le sol deviennent moins actives pour ces eaux qui pénètrent dans les macropores. Ce phénomène est d'autant plus handicapant que les terriers sont profonds. Mentionnons ici le rôle fondamental de l'horizon B qui résiste à la majorité des perforations. Cet élément est à prendre en compte par ceux qui préconisent d'infiltrer par un simple horizon A plaqué sur le remblai.

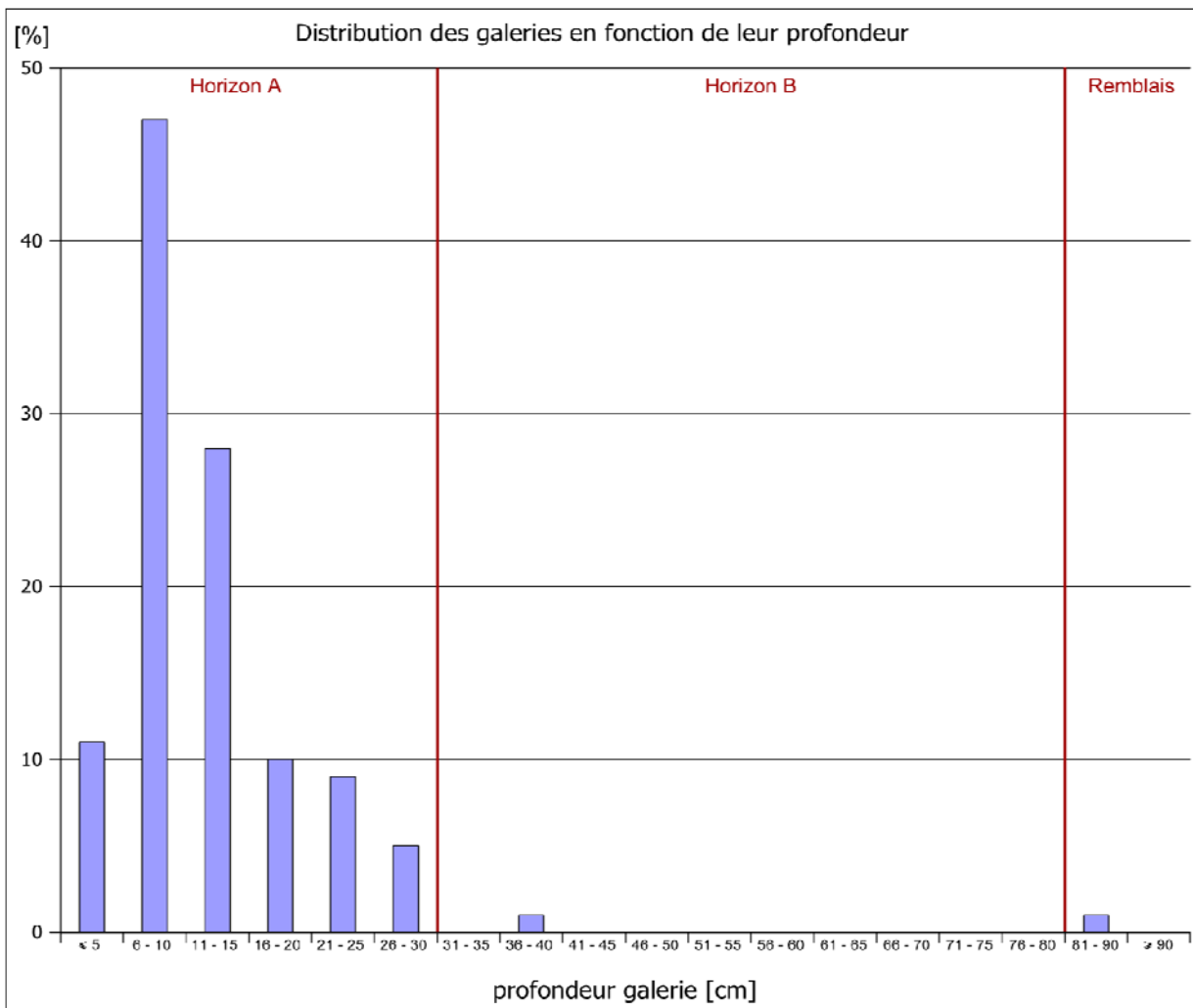
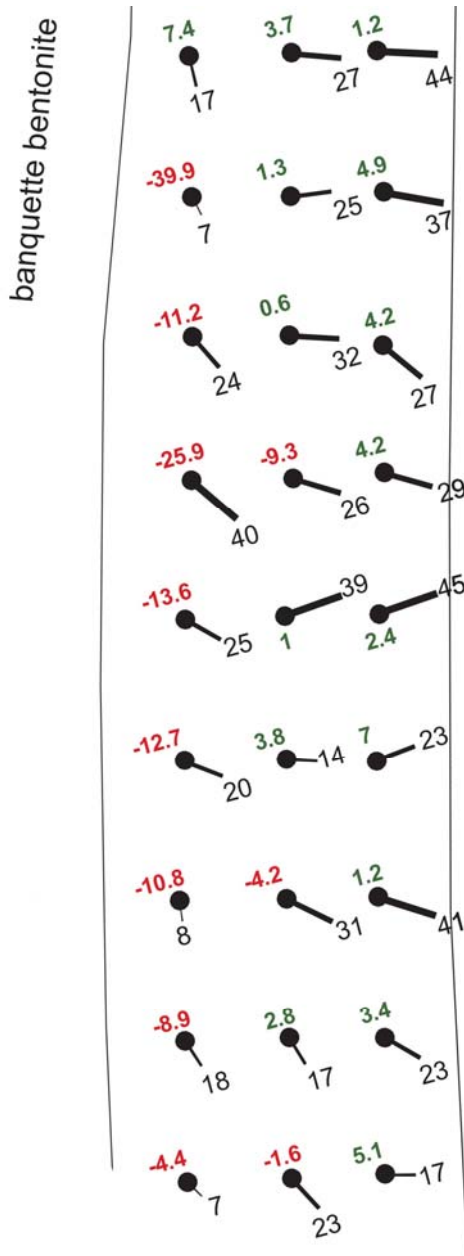


Figure 7.1: Histogramme de distribution des profondeurs des galeries.

7.2.2 Effets liés aux déformations gravifiques du talus

La viabilité du talus est liée également à sa stabilité mécanique. D'une part, il n'est pas évident que la pose d'un sol stratifié à deux couches sur le talus n'entraîne pas un glissement généralisé du sol, surtout si l'on prend en compte le fait que les forces de percolation issues du mouvement de l'eau d'infiltration tendent à accroître les forces motrices et à réduire le coefficient de sécurité du talus. D'autre part, des mouvements de reptation peuvent donner lieu à des fissures de traction dans la partie supérieure du talus, fissures qui agissent aussi comme macropores et comme by-pass de la porosité d'interstice du sol.



Pour mesurer les déformations effectives et leur évolution au cours du temps, un réseau de nivellement très dense fait de points ancrés dans le talus a été mis en place, en collaboration avec le Laboratoire de géomatique de l'EPFL (TOPO). Ce réseau est mesuré de manière annuelle ou bisannuelle. Ces résultats sont représentés sur des cartes figurant en annexe VII. La carte des déplacements entre 2008 et 2009 met en évidence de manière tout à fait nette un phénomène de reptation. Les déplacements annuels horizontaux atteignent par place en pied de talus plusieurs dizaines de mm. Verticalement, on y observe un tassement (de 4 à près de 40 mm) en sommet de talus, qui s'annule à mi-hauteur puis qui passe à un rehaussement dans la zone d'accumulation au pied du talus. Ce phénomène, relativement habituel pour des talus de cette inclinaison, est probablement accentué par la forte teneur en argile dans le sol imposée par les directives de l'OFEV.

Le mouvement de reptation identifié par les mesures géométriques ne donne pas lieu à une véritable niche d'arrachement qui aurait joué un rôle majeur sur la macroporosité. Le mouvement est ici plus diffus, sans rupture nette. L'effet de traction doit tout de même augmenter la perméabilité du haut du talus, mais de manière plus modeste.

Figure 7.2: Extrait de la carte des tassements 2008-09 (annexe VII)

### 7.3 Comportement hydrodynamique de la nappe sous la route

L'installation de six sondes piézométriques avec datalogger et une sonde sur la rivière permet désormais une meilleure compréhension du fonctionnement hydrogéologique de la nappe alluviale de l'Arnon et ainsi de se prononcer sur les déplacements des polluants au sein de la nappe (graphe piézométrique fig. 7.3 et en annexe VIII). Ainsi, plusieurs nouvelles cartes d'isopièzes ont été produites (annexe VIII). Il s'agit d'évènements en période de hautes eaux et de basses eaux.

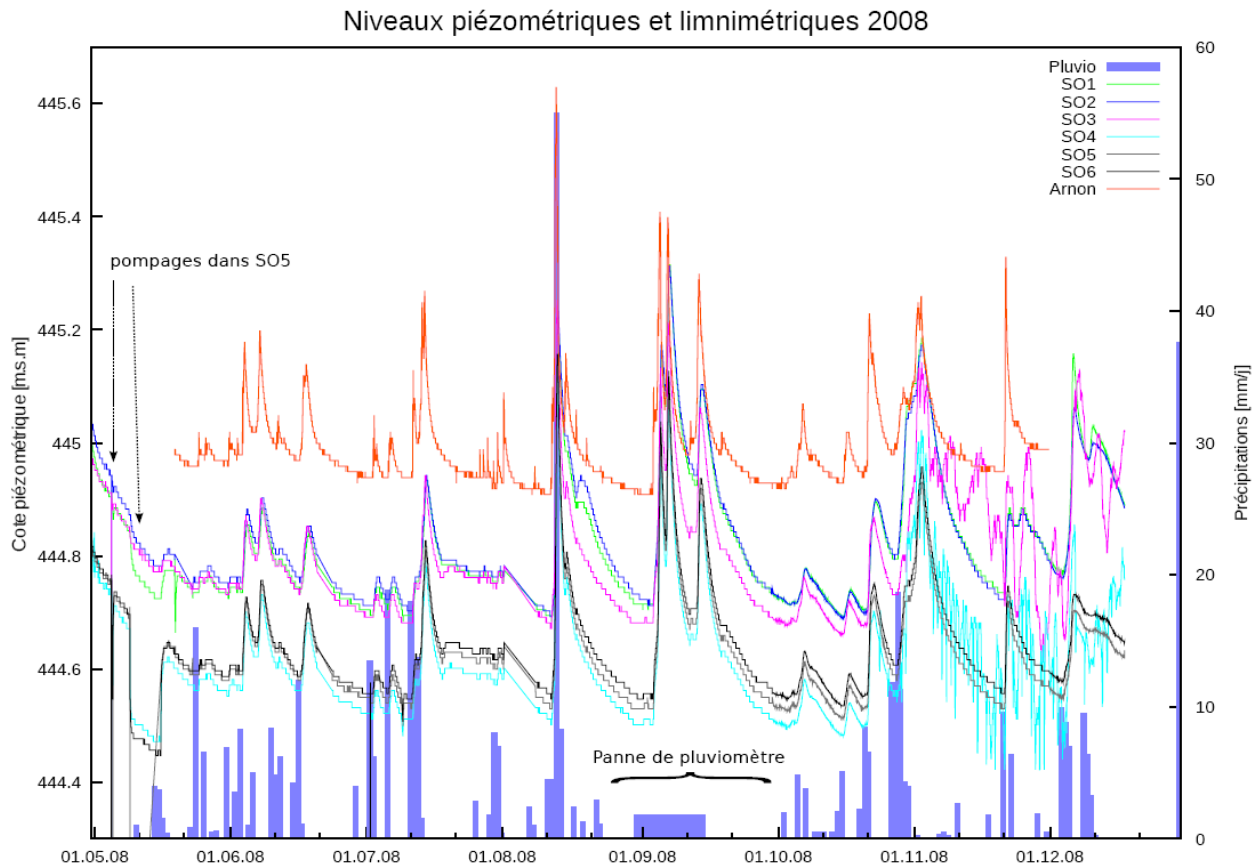


Figure 7.3: Graphe des niveaux piézométriques et du niveau de l'Arnon, en 2008 (annexe VIII). Les précipitations (Pluvio) sont mesurées à la station Yverdon de Météosuisse.

Le pas de temps des mesures étant de 2 minutes, les relations entre l'Arnon et la nappe peuvent désormais être précisées. En ce qui concerne la période 2008, les observations ont permis de mettre en évidence certains points :

- En période d'étiage, l'Arnon se trouve toujours 20 à 30 cm au-dessus des piézomètres amont (SO1-2-3) et environ 40 cm au-dessus des piézomètres aval (SO4-5-6)
- Les réponses des hydrogrammes de crue sont quasiment synchrones, avec toutefois une légère avance du pic de l'Arnon suivi des piézomètres amont puis aval ; ceci illustre le lien entre l'Arnon et la nappe phréatique, la rivière rechargeant constamment cette dernière.
- En période de crues, le gradient rivière - nappe diminue et peut même, en cas de très fortes précipitations, tendre vers zéro. Au pic de la crue, l'Arnon a toutefois toujours une cote supérieure au niveau phréatique, mais l'inertie de la redescente du niveau piézométrique en phase de décrue fait qu'il peut se produire que les piézomètres SO1 et SO2 aient une cote plus élevée que l'Arnon, inversant localement et momentanément les directions d'écoulement (voir annexe VIII).

Dès le mois de novembre 2008, des cycles journaliers avec des variations piézométriques de l'ordre d'une vingtaine de cm sont apparus dans les piézomètres les plus proches de l'Arnon, SO3 et SO4. Après investigation, il s'agit certainement d'une influence de deux puits de pompage d'eau industrielle au lieu dit « Le Moulin » (fig. 7.4). Ces pompes sont encore actifs aujourd'hui.

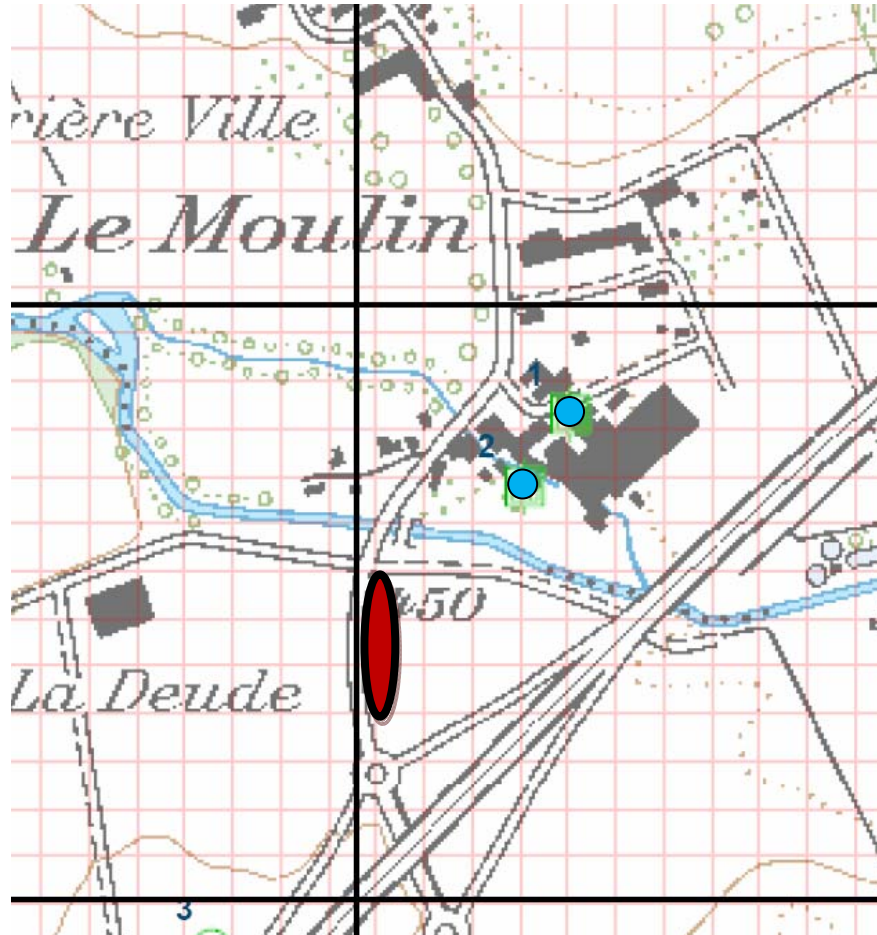


Figure 7.4: Emplacement des deux puits de pompage d'eau industrielle (cercles bleus) par rapport à la station expérimentale (ellipse rouge)

## 7.4 Evolution de la qualité des eaux

Les ions majeurs sont analysés mensuellement et les éléments traces (métaux lourds) trimestriellement afin de déterminer les émissions et le potentiel de rétention dans le lysimètre LW ainsi que les immissions dans la nappe phréatique.

### 7.4.1 Emissions à la base du talus

Le suivi de la performance du talus au sens environnemental est mesurable en premier lieu dans le lysimètre LW construit au droit de la banquette gazon – gravier (SGL). Il s'agit notamment de vérifier si cette performance est diminuée en raison de l'apparition des macropores d'origine biologique (voir § 7.2.1). Le talus du lysimètre LW est aussi densément perforé que le talus du casier SB. Les analyses des traces sont données à l'annexe IX. Les métaux lourds (à part Fe et Al) restent tous au-dessous de 50 µg/l avec en tête Br, Ba, B et Zn et ne montrent ainsi pas de différence notable avec les analyses faites jusqu'en 2004.

On constate donc que l'apparition de la macroporosité introduite par les rongeurs ne produit pas de réduction significative du pouvoir épurateur du sol. Ceci s'explique par le fait que la grande majorité des terriers ne dépasse pas la moitié de l'épaisseur de l'horizon A et que l'horizon B offre une seconde sécurité.

### 7.4.2 Immissions dans la nappe souterraine

Les échantillons de la nappe sont prélevés par pompage dans la partie crépinée du tube piézométrique à un débit d'une centaine de litres par minute. La durée du pompage dépend de l'emplacement échantillonné, le but étant de pomper l'équivalent de trois fois le volume du tube au niveau de la crépine, soit 60 litres.

#### Ions majeurs

Rappelons que l'eau de la nappe est fortement marquée par la pollution d'origine agricole. Ceci est bien visible dans le piézomètre amont SO1, le plus éloigné du front de réalimentation de l'Arnon (nitrates, chlorures et partiellement sulfates).

Une série de cartes hydrodynamiques et géochimiques interpolées soigneusement à la main ont été produites pour trois situations de 2008, à savoir en septembre, octobre et décembre (annexe IX). Quel que soit l'élément majeur représenté, les conclusions suivantes s'appliquent. Les paires de piézomètres SO3 – SO4, SO2 – SO5, SO1 – SO6, qui forment des segments parallèles à l'écoulement de l'Arnon, et plus grossièrement aux écoulements souterrains, présentent des teneurs semblables. Ceci confirme que l'aquifère est continu entre les piézomètres amont et aval. De plus, ces valeurs augmentent en direction du sud, c'est-à-dire, en s'éloignant de l'Arnon et en se rapprochant de la limite méridionale de l'aquifère qui se situe à proximité de SO1. Cela illustre un phénomène de dilution des eaux de la nappe par un apport constant d'eau de l'Arnon moins minéralisée.

Les graphiques de variation temporelle 2008-2009 des anions majeurs et de la conductivité sont groupés à l'annexe IX. Les variations les plus grandes sont visibles sur les piézomètres les plus éloignés du front d'alimentation de l'Arnon. Lorsque l'on se rapproche de la rivière, ces variations deviennent lissées par l'effet de dilution. Les sondages SO1 et SO6 sont donc les plus utiles pour détecter des variations de paramètre liés à la nappe souterraine proprement dite. Un éventuel effet de l'infiltration au pied du talus SB doit donc être visible par le différentiel géochimique entre SO6 (aval) et SO1 (amont). Nous observons globalement que le comportement est similaire des deux cotés de la route. On note cependant un léger décalage de la variation en sulfates, retardée à l'aval de la chaussée. Les sulfates, fortement présents dans la nappe, sont ici la résultante d'un marquage géogène (marnes à gypse du Chattien) et d'une

pollution agricole. Les chlorures, d'origine agricole car déjà abondants en amont de la route, sont un peu plus marqués à l'aval par le salage hivernal. La baisse observée en amont de la chaussée dès décembre 2008 est compensée à l'aval par l'infiltration des eaux de la route. Les nitrates, souvent au-dessus de la limite de 40 mg/l confirment l'importance du marquage agricole.

Dans les six piézomètres, ainsi que dans l'Arnon, les carbonates fluctuent passablement en fonction des précipitations. On observe en effet ici à nouveau le phénomène de dilution, souligné par l'apport d'eaux de la rivière dont la signature est principalement karstique.

#### **Métaux lourds**

Pour les métaux lourds, nous basons aussi notre analyse sur la comparaison le plus loin possible de l'effet dilutif de l'Arnon, sur le couple SO1 (amont) et SO6 (aval). Les métaux lourds, dosés sur échantillons non filtrés avant acidification, sont très peu présents à part quelques éléments qui se détachent du groupe. Si l'on fait abstraction du fer et du manganèse (assez abondants dans les eaux souterraines lorsque l'eau se réduit par oxydation de la matière organique) ainsi que de l'aluminium (fortement influencés par les colloïdes d'argile), on observe en amont (SO1) de l'infiltration le spectre par ordre d'abondance : Br, Ba, B et Zn. Le baryum est d'origine géogène. En aval (SO6), le spectre est similaire avec toutefois le B qui dépasse le baryum. Les autres piézomètres ont sensiblement la même signature, avec une dilution plus marquée par les eaux de l'Arnon. Du plomb a été détecté une fois dans SO3 à des concentrations un peu plus élevées (env. 10 ppb) qu'habituellement. Cette dernière possède aussi le même spectre avec toutefois des concentrations beaucoup plus basses que la nappe alluviale. Le comportement des traces dans les piézomètres est très discontinu dans le temps. Globalement, les concentrations sont un peu plus élevées à l'amont qu'à l'aval en raison de l'effet de dilution de la rivière qui est plus important au SO6 qu'au SO1. Mais à l'évidence, aucun marquage routier n'est visible dans cette catégorie d'éléments. Ceci est lié à la faible mobilité des métaux lourds dans le sous-sol.

Ce constat est corroboré par les analyses du lysimètre LW (voir § 7.4.1).

## Concentration en ions majeurs du 01.03.08 au 30.01.09

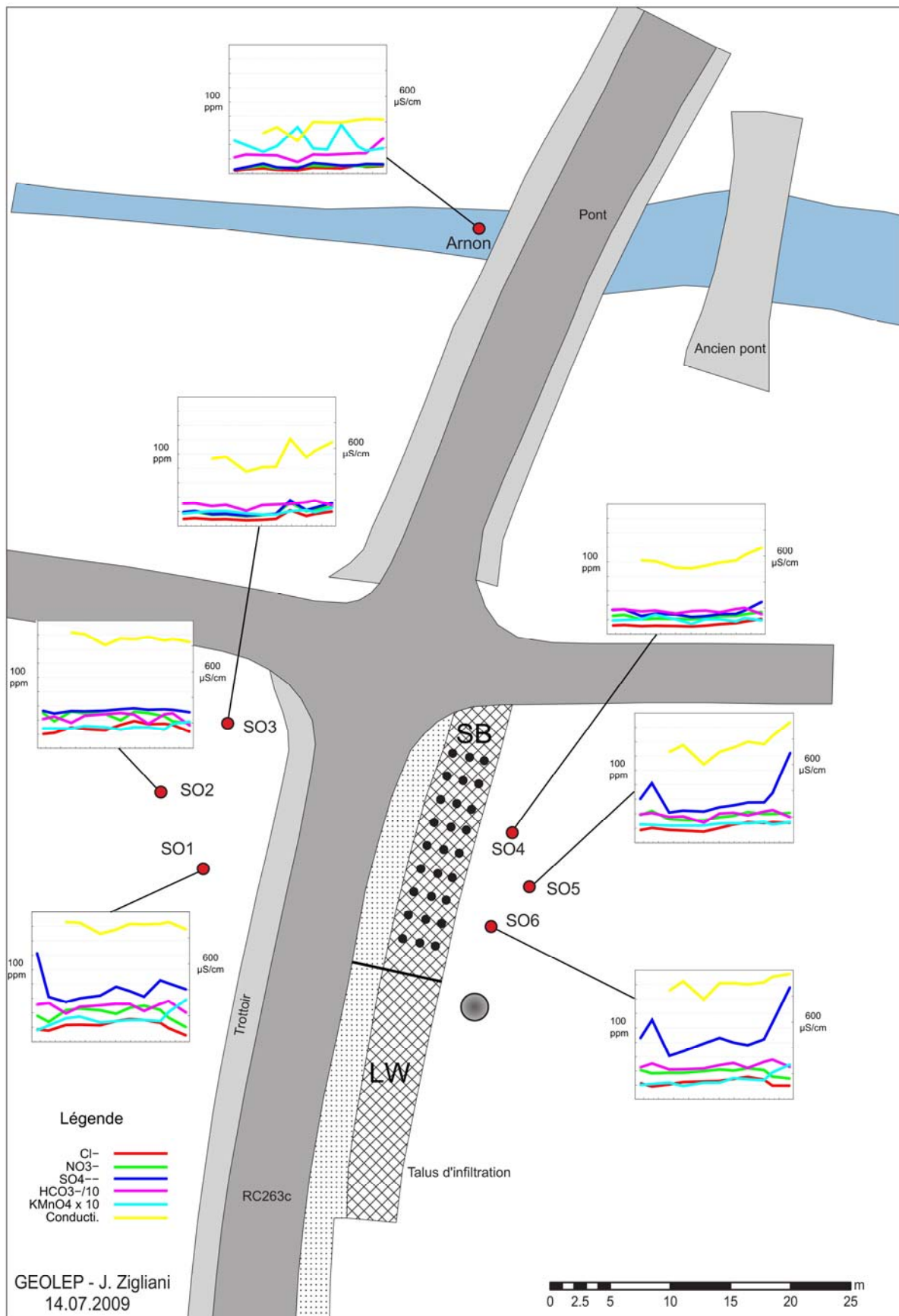


Figure 7.5: Carte de la station expérimentale avec graphes synthétiques des ions majeurs et de la conductivité en 2008 pour la nappe et l'Arnon

Concentration en métaux lourds du 01.03.08 au 30.01.09

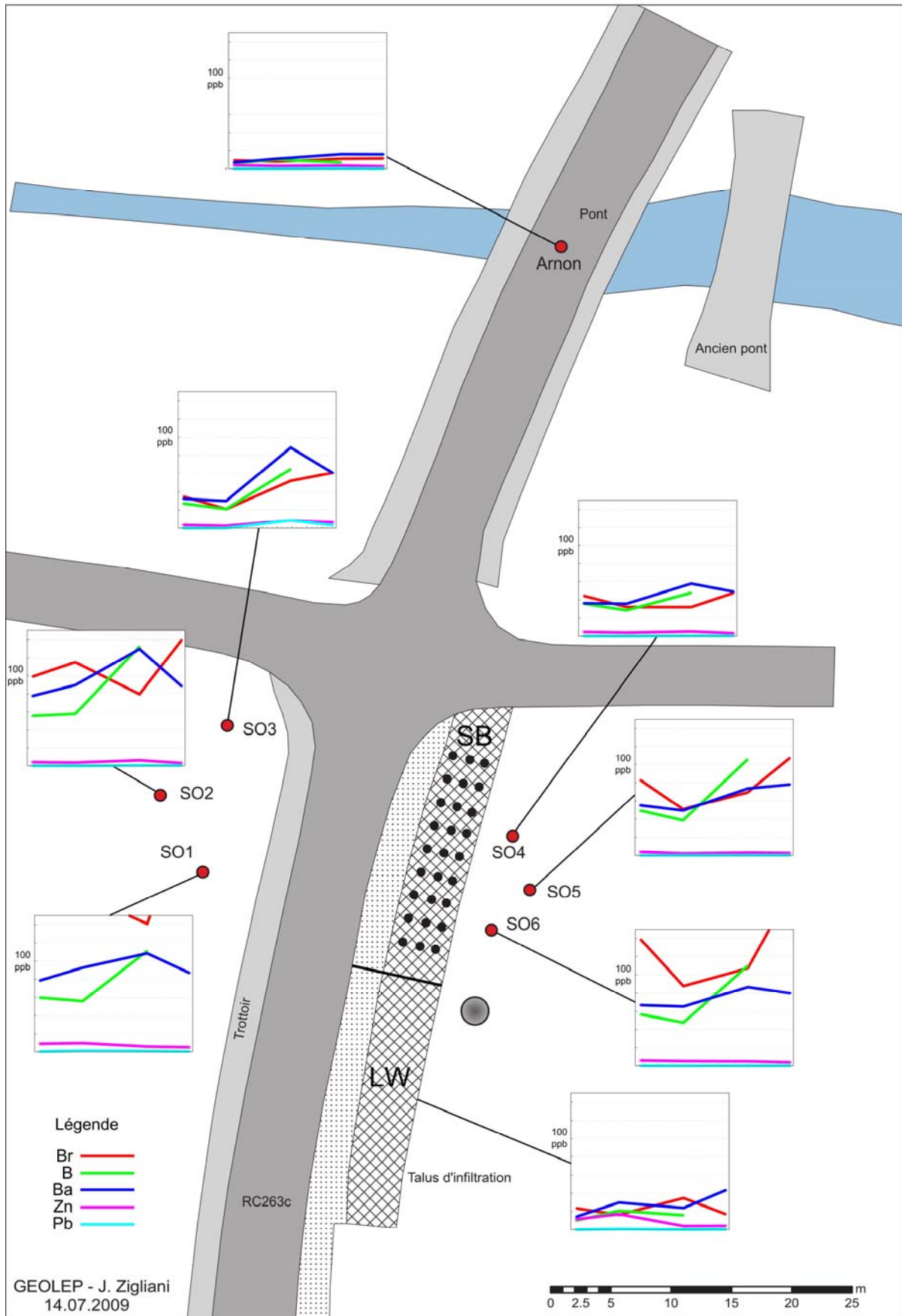


Figure 7.6: Carte de la station expérimentale avec graphes synthétiques des métaux lourds dans la nappe, l'Arnon et le lysimètre en 2008

### 7.5 Evolution de l'étanchéité des banquettes

Les débits exfiltrés sous les banquettes géotextiles bentonite et gravier-argile, appelées plus loin respectivement SB et SGC, sont mesurés à un pas de temps de 2 minutes dès le début de la phase de suivi allégé de la station. Ces deux banquettes ont été retenues car ce sont les seules à avoir montré une certaine étanchéité, la banquette SGC se montrant néanmoins nettement plus perméable que la banquette SB. Rappelons que la durabilité de l'étanchement de la banquette SB avait été fortement mise en doute par la commission EK 027.

Toutefois, les analyses quantitatives poussées sur les données de la période s'écoulant du 1.08.2008 au 29.10.2008 ont montré que l'étanchement de la banquette SGC résiste nettement moins bien aux effets du temps que SB. La période étudiée présente en effet 29 évènements pluviométriques montrant des réponses importantes au niveau du ruissellement routier (RUN). Tous ces cas ont engendré l'exfiltration d'un débit sous la banquette SGC. Sur ces 29 évènements, seuls quatre (24 %) ont également provoqué un léger débit à travers la banquette SB (fig. 7.7).

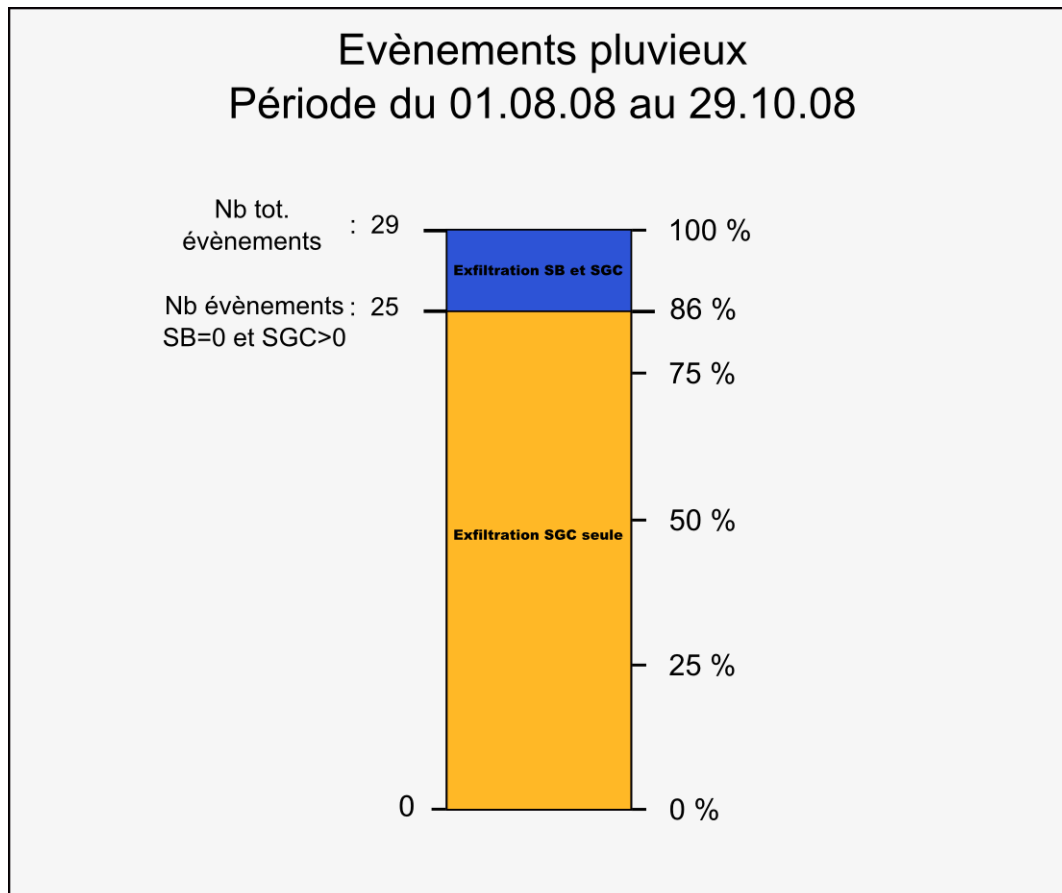


Figure 7.7: Comparatif évènements pluvieux sur banquette géotextile bentonite (SB) et banquette gravier-argile (SGC) (annexe VIII)

Afin d'avoir une approche quantitative, une étude a été menée sur les quatre évènements montrant une réponse à la fois sur SB et SGC. Il s'agissait d'intégrer les débits instantanés sur la durée d'un évènement pluvieux pour les compartiments RUN (ruissellement routier = input), SB et SGC et de les rapporter à la surface collectant l'eau, celle-ci variant suivant le compartiment, par exemple : SB=199.4 m<sup>2</sup>, SGC=101.5 m<sup>2</sup>. Ce faisant, les valeurs comparées sont exprimées en l/m<sup>2</sup>, soit en mm et peuvent directement être comparés à une lame d'eau. Les résultats présentés en annexe X montrent des perméabilités en moyenne 15 à 40 fois supérieures pour la banquette SGC que pour la banquette SB. Sur les évènements étudiés, les maximums d'exfiltration observés sont de 82 % du stock entrant pour SGC contre 8 % pour SB.

La même démarche a été appliquée sur l'entier de la période étudiée, et ce, afin d'avoir une intégration des débits liée à toutes les pluies et non seulement celles étant suffisamment importantes pour entraîner un débit à travers les deux banquettes. On y constate alors que le volume d'eau accroît à chaque pluie pour SGC alors que durant les événements de faible intensité, SB garde toute son étanchéité. La figure 7.8 montre en effet que sur la période du 1.08.2008 au 29.10.2008, 207 mm d'eau (83 % de l'input) ont traversé la banquette SGC contre seulement 5.7 mm pour la banquette SB (2 % de l'input).

Les doutes quant à la durabilité de l'étanchement de la banquette SB semblent par conséquent pour l'instant infondés. A contrario, les réserves émises quant à la faible résistance à l'érosion de la banquette SGC s'avèrent cohérentes puisque les débits exfiltrés sont plus de deux fois supérieurs à ceux mesurés il y a trois ans pour des événements comparables. L'explication principale de phénomène réside dans le fait que la fraction fine (argiles limoneuses) a peu à peu quitté le système SGC, laissant place à des matériaux beaucoup plus perméables. En revanche, les argiles bentonitiques étant prises entre deux couches tissées sont très difficilement mobilisables, ce qui explique la grande durabilité observée de cette banquette.

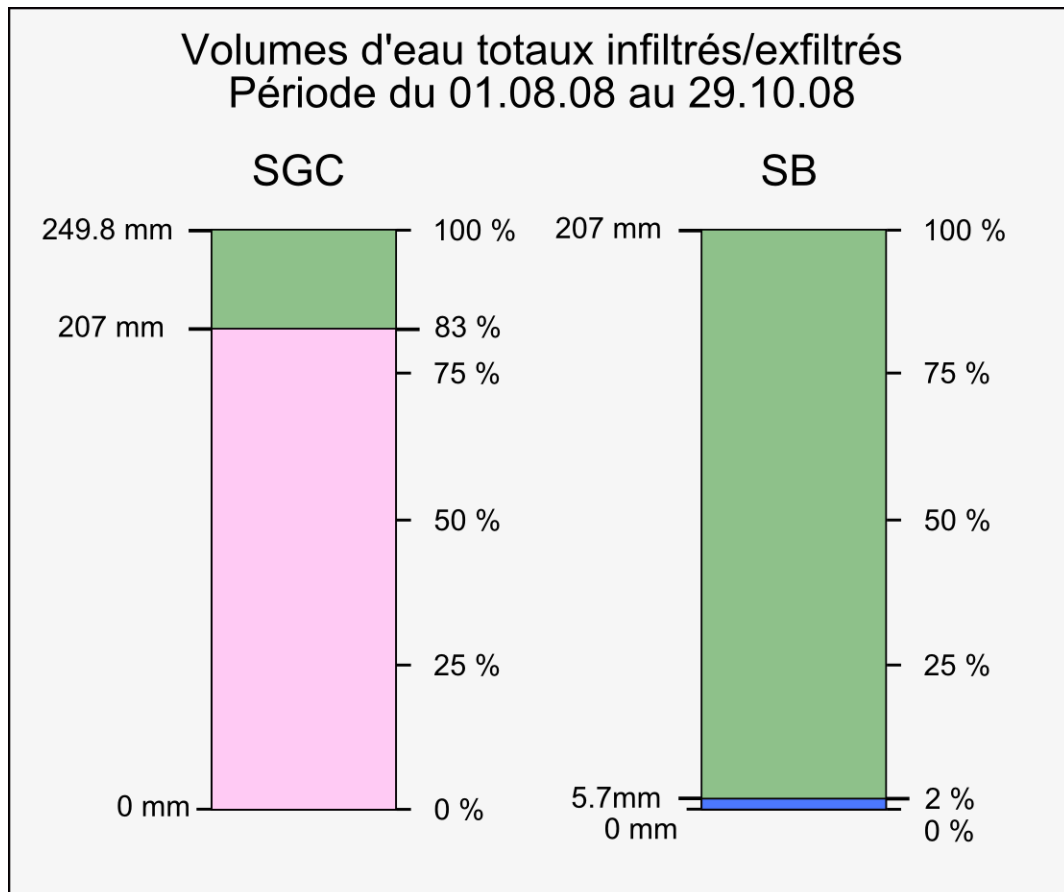


Figure 7.8: Comparatif de volumes exfiltrés entre banquette géotextile bentonite (SB) et banquette gravier-argile (SGC) (annexe VIII)

## 7.6 Conclusion sur le suivi 2003-2009

Le suivi à long terme entrepris avec le soutien du canton de Vaud après la fin du projet OFROU permet d'apporter des éléments factuels importants sur la durabilité du système d'infiltration sur les talus. Les conclusions majeures sont celles-ci :

- Avec les années, le talus d'infiltration a été colonisé par des rongeurs qui ont créé de nombreux macropores qui by-passent la porosité d'interstices du sol
- Les macropores se développent en majorité dans la moitié supérieure de l'horizon A, moins fréquemment jusqu'à sa base, rarement jusqu'à la base de l'horizon B.
- Le talus est l'objet d'une nette déformation par reptation (quelques centimètres par an), sans que cela ne donne lieu à une macroporosité
- Le pouvoir épurateur du talus mesuré sur l'émission à la base du lysimètre n'est pas affecté jusqu'à maintenant, malgré la macroporosité.
- L'étanchéité de la banquette bentonite reste excellente avec les ans et sa performance reste bien supérieure à la banquette gravier-argile
- L'infiltration ne donne pas d'immission mesurable dans la nappe souterraine, mis à part une légère influence sur les chlorures.

En résumé, le système de l'infiltration sur les talus (avec horizons A et B) et de l'étanchéification de la banquette par une natte de géotextile bentonite continuent à donner satisfaction en régime d'exploitation réel durant 7 années. Ces observations vont encore se poursuivre jusqu'en 2012.

## 8 Conclusions

La conception, la construction et l'étude de la station expérimentale de Grandson se sont déroulées de manière très probante.

Les différentes difficultés techniques liées au caractère expérimental de la station ont pu être surmontées, notamment celles concernant la phase de construction, grâce à une excellente collaboration avec les ingénieurs du SR vaudois et de l'entreprise JPF, chargée de sa réalisation. En outre, les rencontres avec les membres de la commission de surveillance VSS EK2.07 ont permis de diversifier les expérimentations initialement prévues.

### *Problématique des banquettes*

Ce travail a permis de :

- Définir le type de banquettes ayant les caractéristiques optimales, c'est-à-dire ayant la meilleure capacité de transmettre le ruissellement routier au talus d'infiltration (banquette avec géotextile bentonite) et cela dans une large gamme de conditions hydrométéorologiques. Une étude des méthodes de construction et des surcoûts induits a montré que la construction de telles banquettes est aisément réalisable et doit être préférée à d'autres systèmes.
- Rejeter des variantes de banquettes qui se révèlent inefficaces : les banquettes gravier – humus, gazon - gravier et les banquettes étanchées par le prolongement du HMF.
- De proposer, pour les cas où le géotextile à la bentonite pourrait être fragilisé, notamment par le battage de glissières de sécurité, de recouvrir celui-ci d'un mélange gravier – argile, plus riche en argile que celui qui a été testé à Grandson, en raison de l'érosion des particules fines.

### *Problématique du talus d'infiltration*

Le deuxième point important de ce travail visait à étudier la faisabilité-même du principe d'infiltration diffuse au travers des talus. Le suivi de la station pilote de Grandson a permis de :

- Démontrer que les talus d'infiltration tels que prescrits par l'OFEV constituent une couche épurative très performantes. En effet, peu de polluants sont observés après filtration par les sols, que ce soit en termes de diversité ou de teneur.
- Montrer qu'aucun polluant n'est détectable dans l'aquifère, même au niveau des traces, et ceci dans toutes les conditions hydrométéorologiques étudiées.

### *Problématique de géotechnique routière*

Les observations faites par le LAVOC-EPFL sur la stabilité de la chaussée ont montré que les déformations mesurées correspondent à celles auxquelles on pouvait s'attendre en fonction de l'excellente fondation de la route. Aucune déformation particulière n'a été identifiée sous le tronçon où l'eau s'infiltrait massivement dans la banquette. Ce résultat positif est à nuancer dans le cas d'une route bénéficiant de qualités de remblai moins favorable.

### *Problématique de l'évolution du système à plus long terme*

Un mandat de surveillance allégée sur 5 ans ayant été octroyé par le canton de Vaud, l'accent est désormais placé sur les points qui n'avaient jusqu'à présent pas pu être précisés faute de données, à savoir : l'effet du temps sur la fiabilité d'un tel système. Une somme d'évolutions pouvant aussi bien mener à l'amélioration des performances (fonction épurative des sols sur la pente d'infiltration par la reconstitution de l'équilibre biologique et structural) qu'à une péjoration (colmatage des sols par les fines produites par la route, déchirures sur le talus etc.) avait été imaginée. A ce jour, si des marques d'évolutions naturelles prévisibles ont bel et bien été observées, aucun lien notable n'a toutefois été mis en évidence entre ces changements et la qualité épurative du talus d'infiltration. Il va de soi que ces conclusions ne sauraient restées figées et que d'ici 2012 (fin du mandat), de nouvelles informations vont s'ajouter, permettant ainsi de se prononcer sur la fiabilité d'un tel système à l'échelle de la vie d'un ouvrage.

En conclusion, les résultats acquis par le suivi de la station jusqu'à ce jour démontrent que la notion d'infiltration diffuse sur les bas-côtés est réalisable en pratique dans un chantier routier, qu'elle est efficace sur les plans hydraulique et environnemental et qu'elle ne porte pas préjudice à la stabilité de la structure routière si l'on assure une bonne étanchéité de la banquette. Les objectifs du projet sont donc remplis.

Lausanne, le 17 juillet 2009

Prof. A. Parriaux

Directeur du GEOLEP

Dr M. Bensimon

Ingénieur chimiste

Dr P. Piguet

Géologue dipl.

J. Zigliani

Ingénieur géologue

### *Remerciements*

*Les auteurs de ce rapport tiennent à exprimer leur gratitude aux différentes institutions qui ont collaboré au succès du projet :*

- *à l'Office fédéral des routes qui a financé le projet proprement dit*
- *au Service des routes du Canton de Vaud qui a financé la construction de la station-pilote et qui a participé activement à la conception, à la construction, et au suivi de la station*
- *au Service des Eaux, Sols et Assainissement du Canton de Vaud qui co- finance actuellement le suivi allégé de la station*
- *à l'entreprise JPF qui a accompli un très bon travail de construction*
- *au Service des eaux, sols et assainissement du canton de Vaud pour son aide sur la qualité des sols du secteur*
- *à nos partenaires de l'EPFL pour leur collaboration spécialisée (LAVOC, ECOTOX, LPE)*
- *à toutes les personnes de ces institutions qui ont donné de leur temps et de leur compétence.*



---

## 9 Bibliographie

Alloway, B. J., *Heavy metal in soils*

Baize, D., *Guide des analyses en pédologie*, INRA, 2000

Boller, M., Kaufmann, P., Ochsenbein, U., *Bankette bestehender Strassen, Untersuchung des versickerung von Strassenabwasser über Strassenrandstreifen an einer bestehender Strasse*, rapport final, 2006

Boller, M., *Stoffflüsse und Massenbilanzen von Strassenabschnitten*, VSA – Fortbildungskurs, 2002

Boller, M., *Charakterisierung von Strassenabwasser – Emissionen und Immissionen*, VSA – Fortbildungskurs, 2002

Bouwer, H., *Groundwater Hydrology*, 1978

Docourt, M., *Mobilité des polluants routiers dans les sols. Exemple des hydrocarbures aromatiques polycycliques et des éléments traces minéraux*, Mémoire de recherche, GEOLEP, 2004

GEOLEP, *Rétention des polluants des eaux de chaussées: “infiltration sur les banquettes”*. *Vérification In Situ et optimisation*, Rapport 1, 2004

Hewitt, C. N., Rashed, M. B., *Removal rates of selected pollutants in the runoff waters from a major rural highway*, Water Resources. 1992

Mermoud, A., *Eléments de physique du sol*, 1999

Musy, A. et Soutter, M., *Physique du sol*, 1991

OFEFP, *Instruction « Protection des eaux lors de l'évacuation des eaux des voies de communication »*, 2002

OFEFP, *Gewässerschutzmassnahmen beim Strassenbau*, Grundlagenbericht, Schriftenreihe Umwelt N°263

Parriaux, A., Tarradellas, J., Spack, L., Bensimmon, M., *Interaction entre les routes et l'environnement souterrain*, cahier OFROU N°426, 1999

Parriaux, A., *Géologie : Bases pour l'ingénieur*. 2<sup>ème</sup> édition, PPUR Lausanne, 2009

Piguet, P., *Rétention des polluants des eaux de chaussées: "infiltration sur les banquettes". Vérification In Situ et optimisation*, Thèse de doctorat

Piguet, P., Parriaux, A., Bensimon, M., *The diffuse infiltration of road runoff: An environmental improvement*, Science of the Total Environment, 2008

Piguet, P., Parriaux, A., Bensimon, M., *Road runoff management using over-the-shoulder infiltration: real-scale experimentation*, Water Science and Technology, 2009

Richter, J., *Models for processes in the soil*, 1990

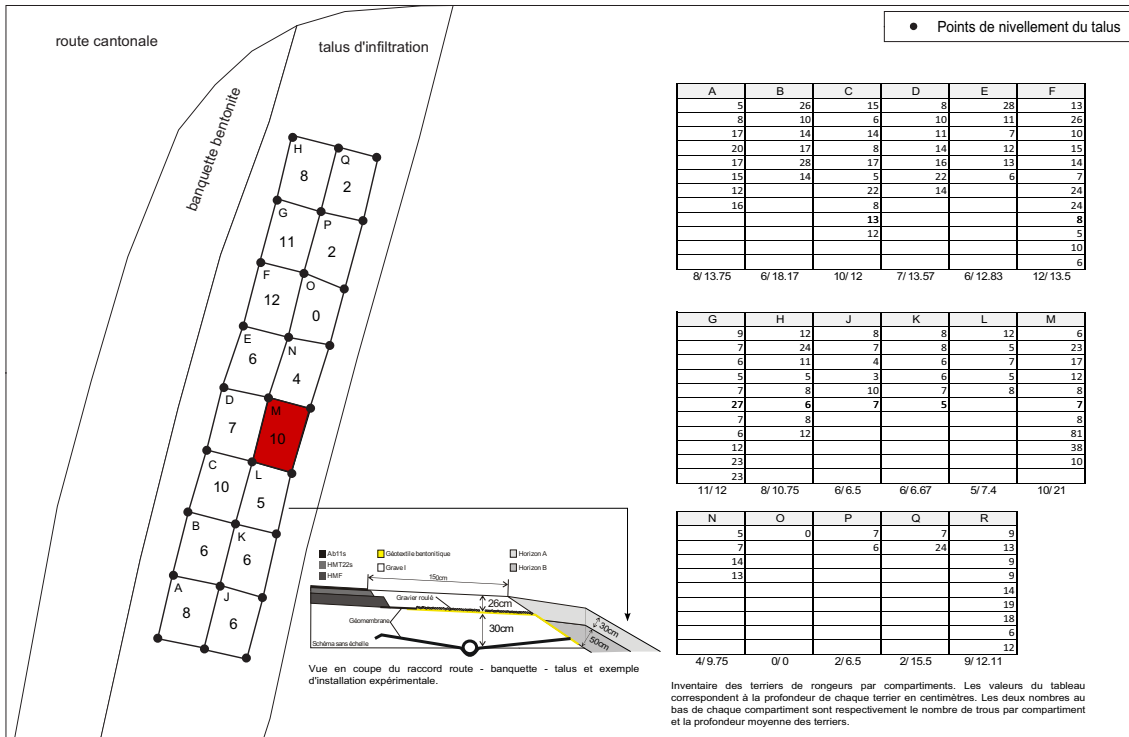
VSA, *Richtlinie zur Versickerung, Retention und Ableitung von Niederschlagswasser in Siedlungsgebieten*, 2002

VSS, *Evacuation des eaux de chaussées – intensité des pluies*, SN 640 350

Xanthopoulos, C., Hahn, H. H., *Priority pollutants from urban storm water runoff into the environment*, European Water pollution vol.4, 1994

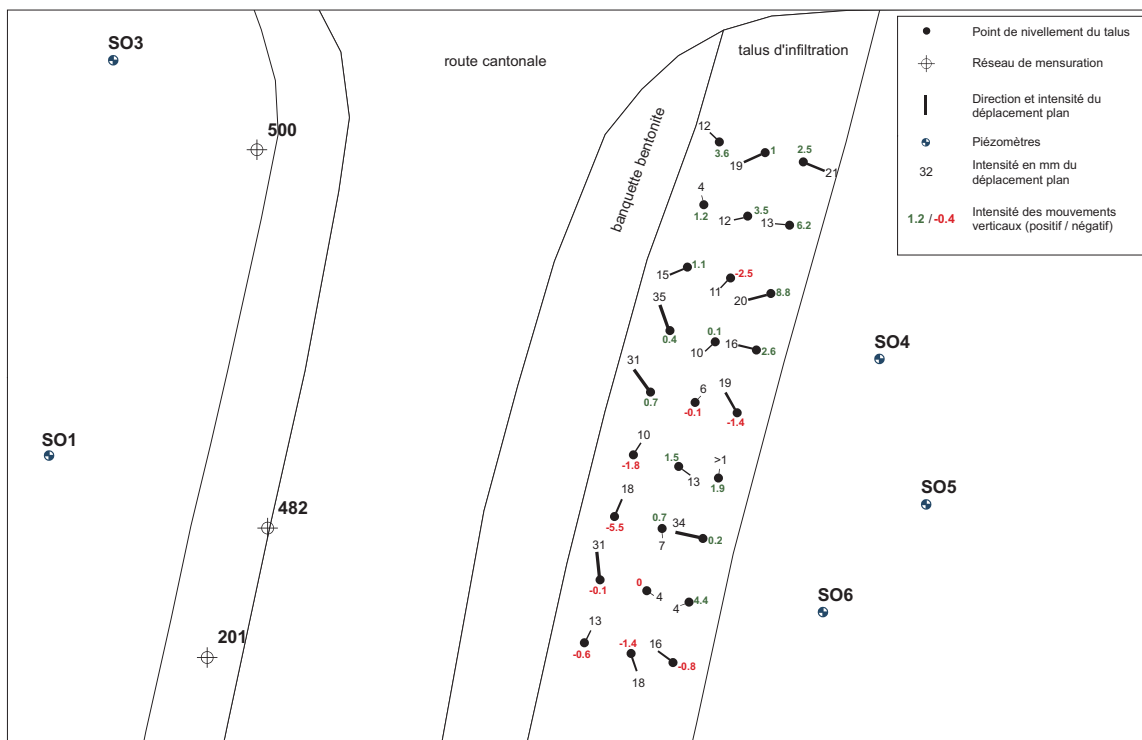
## **Annexe VII : Evolution du talus d'infiltration**

# Inventaire de la porosité secondaire affectant le talus d'infiltration en mars 2009



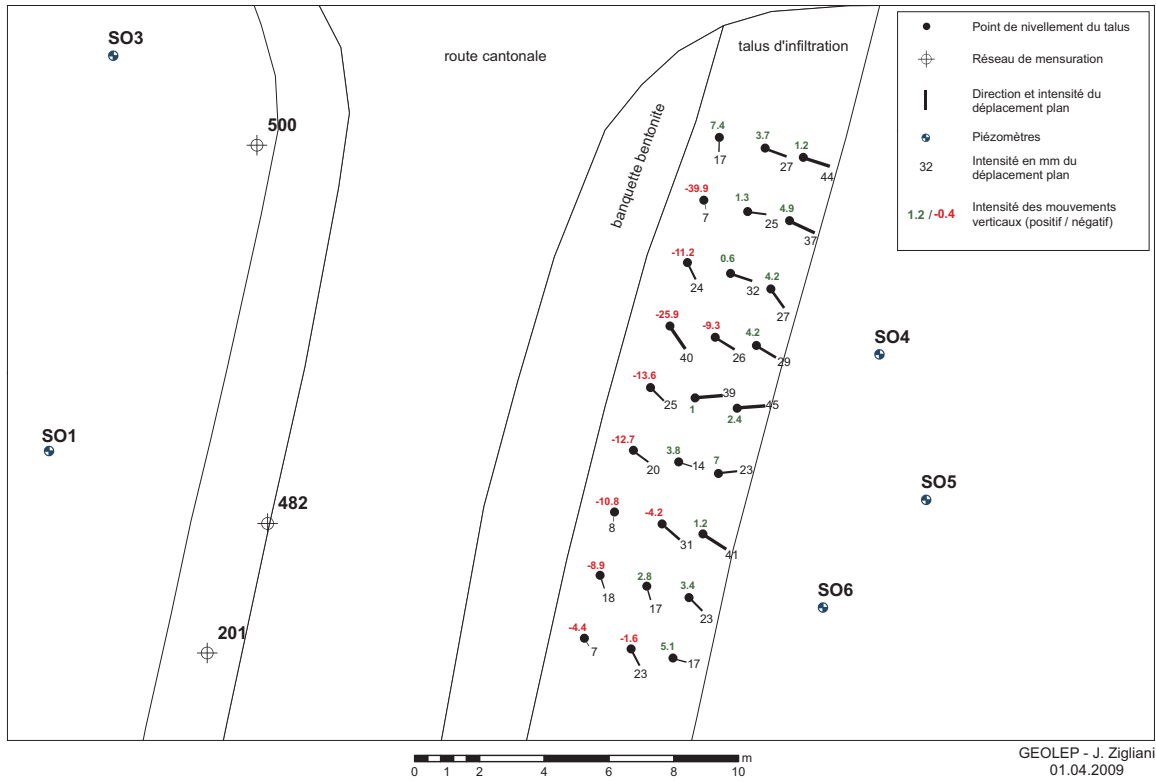
GEOLEP - J. Zigliani  
01.04.2009

# Mouvements dans le talus d'infiltration entre les campagnes d'août 2007 et mai 2008

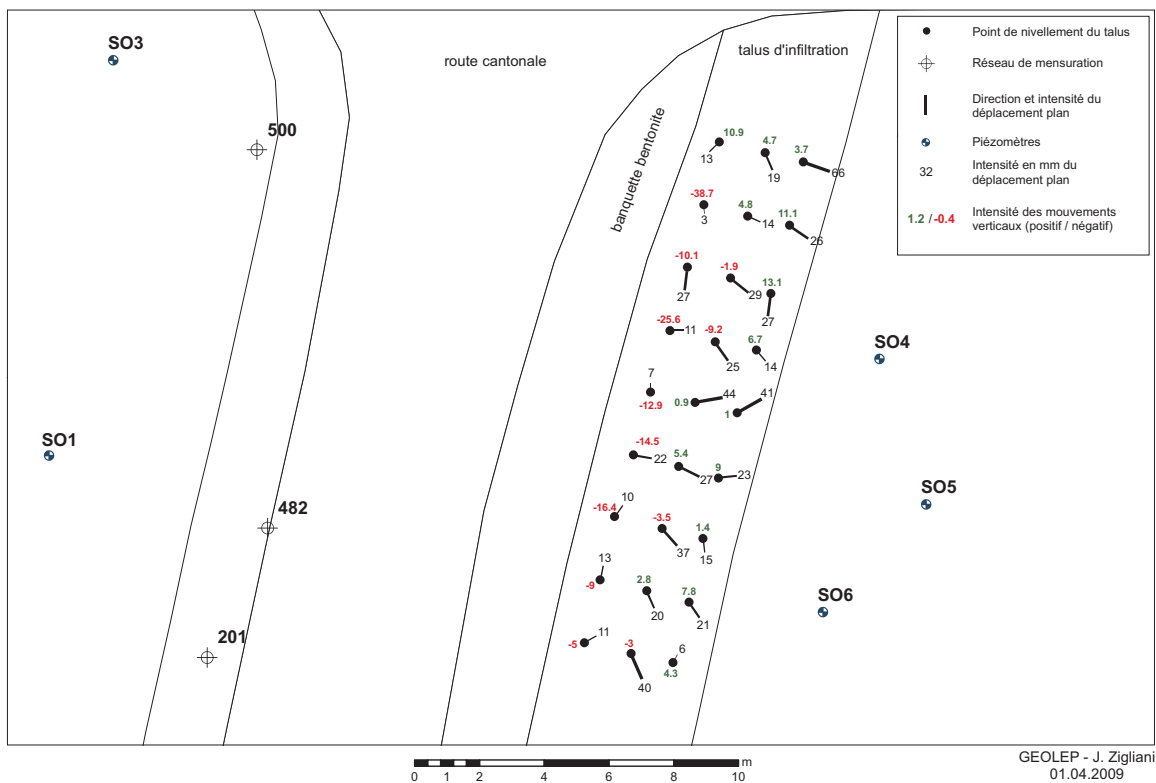


GEOLEP - J. Zigliani  
01.04.2009

## Mouvements dans le talus d'infiltration entre les campagnes de mai 2008 et mars 2009

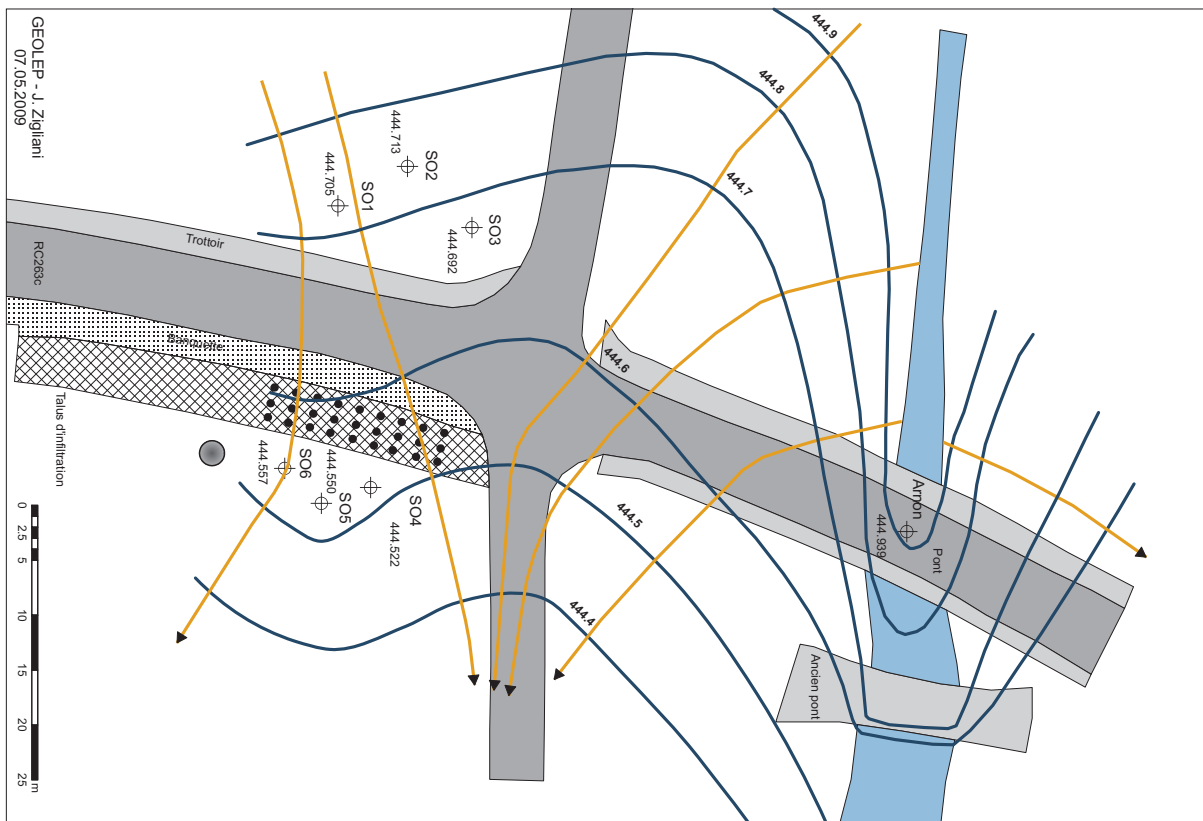
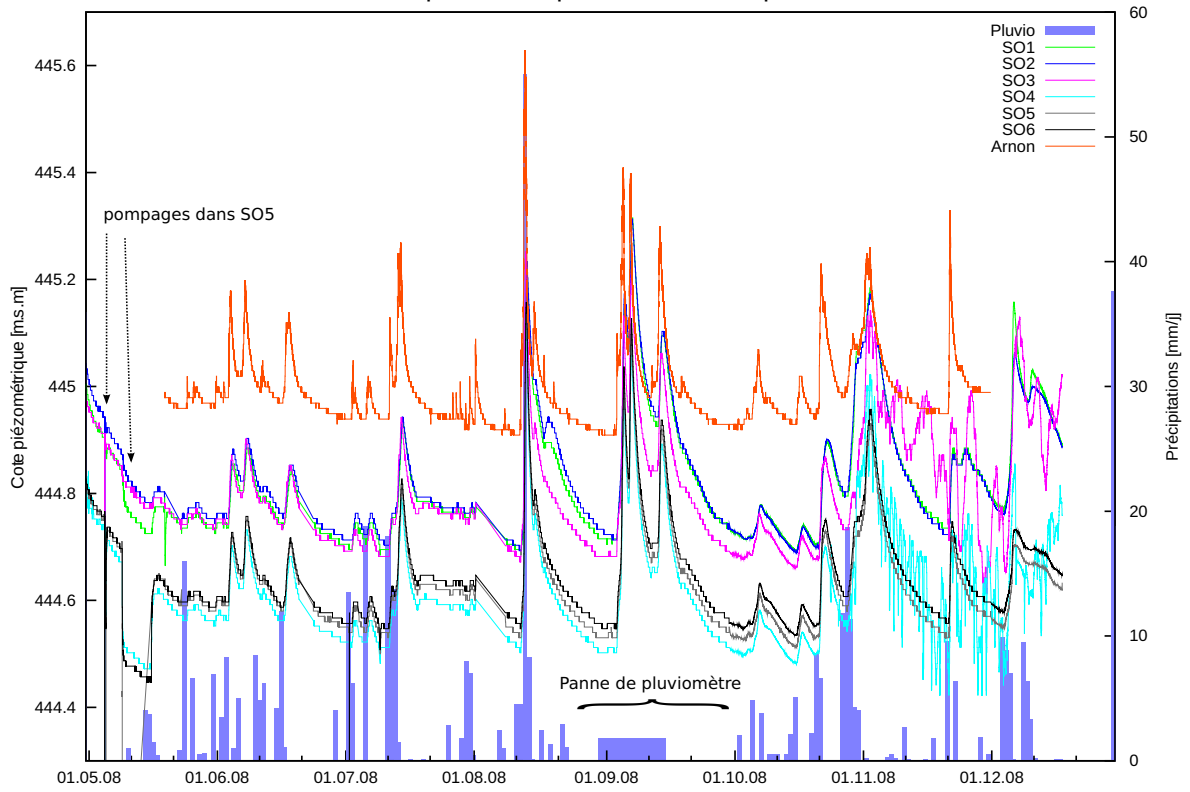


## Mouvements dans le talus d'infiltration entre les campagnes d'août 2007 et mars 2009



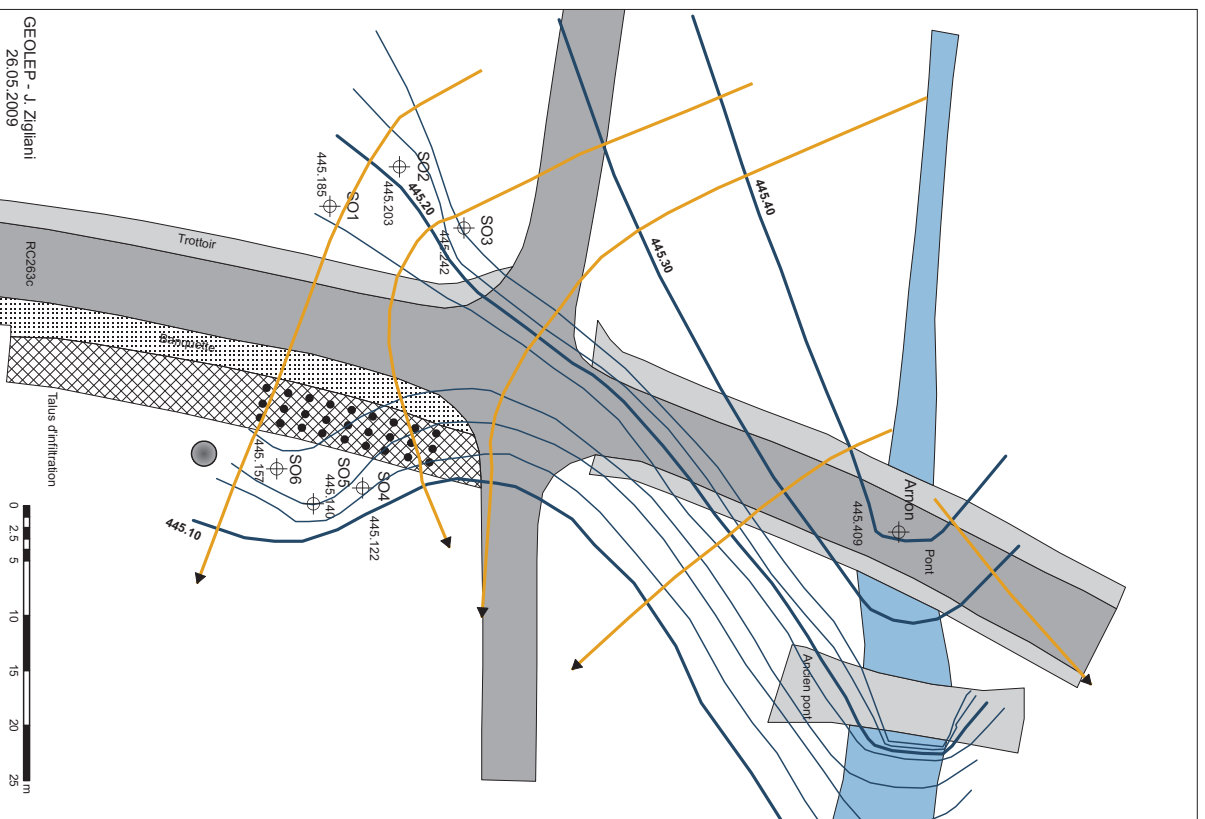
## **Annexe VIII : Suivi hydrogéologique**

### Niveaux piézométriques et limnimétriques 2008



Carte isopièze en basses eaux - 01.07.2008

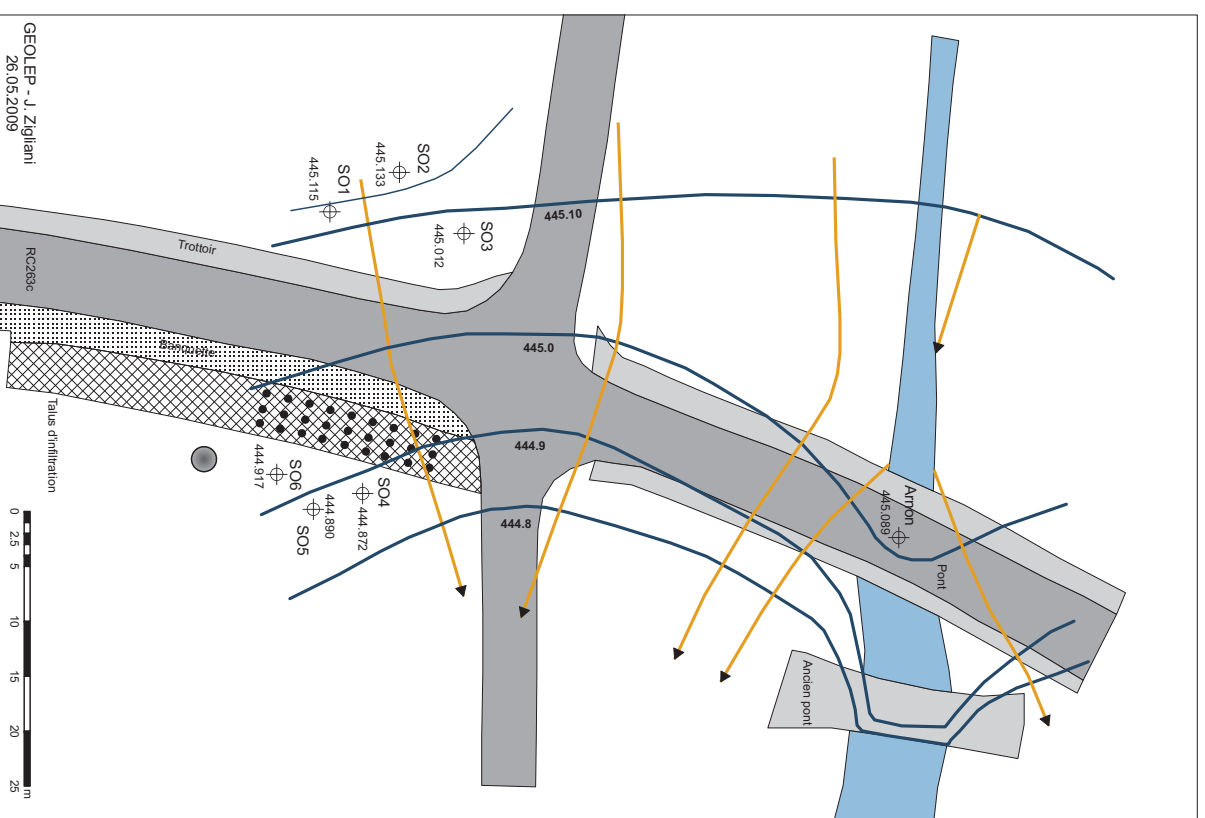
Carte isopièze en hautes eaux - 13.08.2008



GEOLEP - J. Zigiiani  
26.05.2009



Carte isopièze en hautes eaux - 14.08.2008

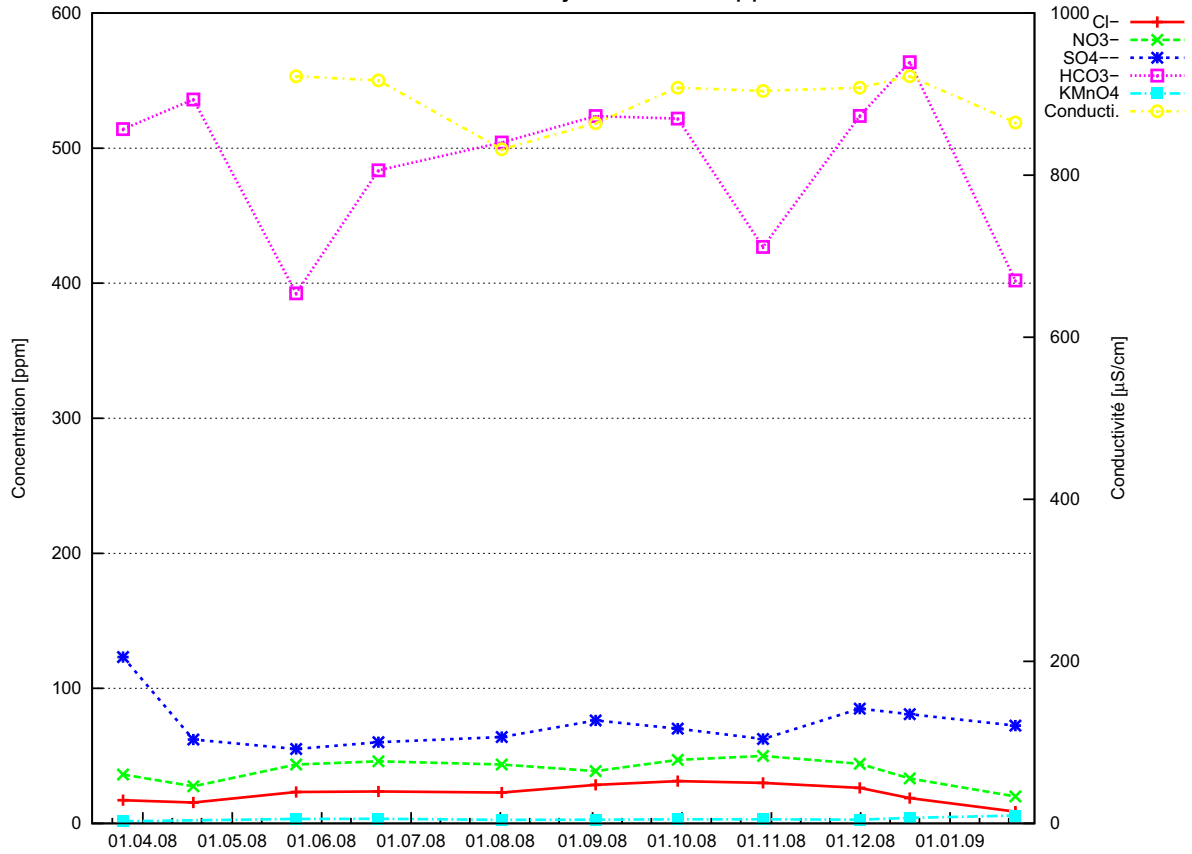


GEOLEP - J. Zigiiani  
26.05.2009

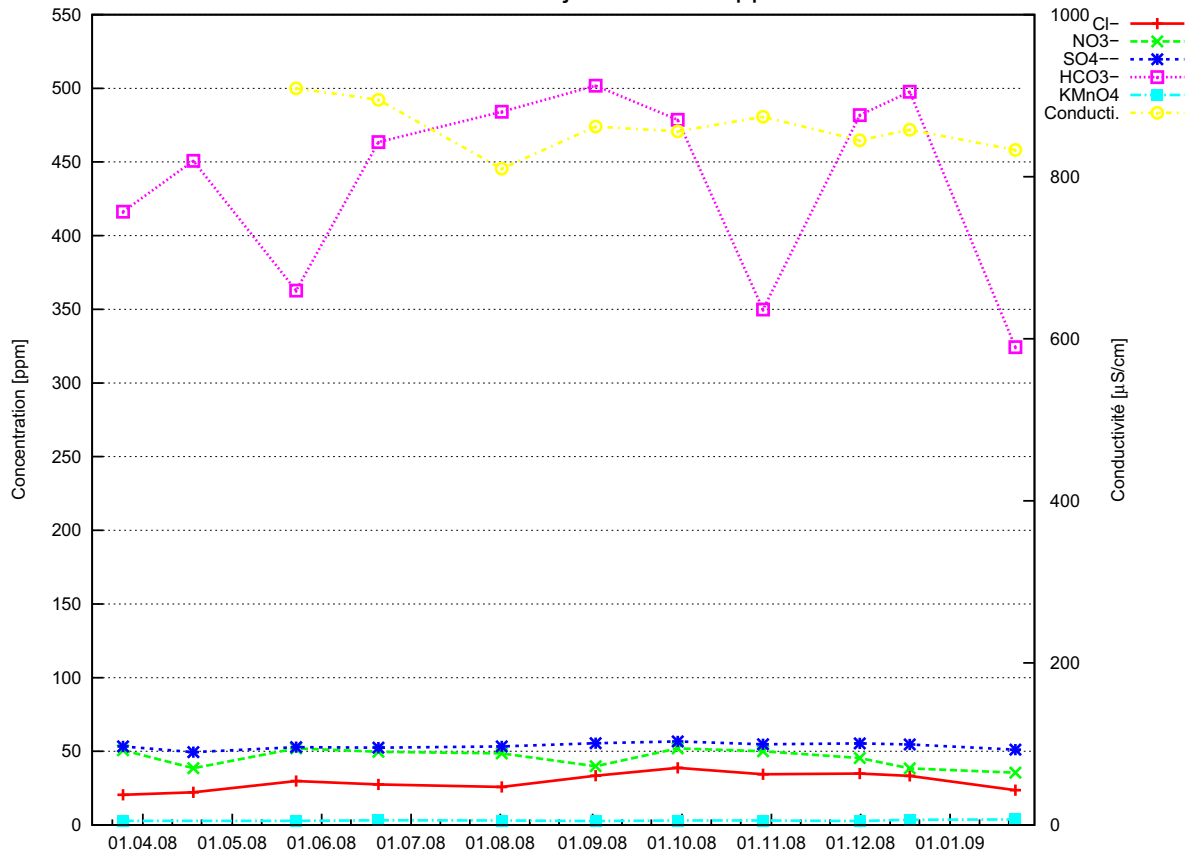


## **Annexe IX : Analyses chimiques**

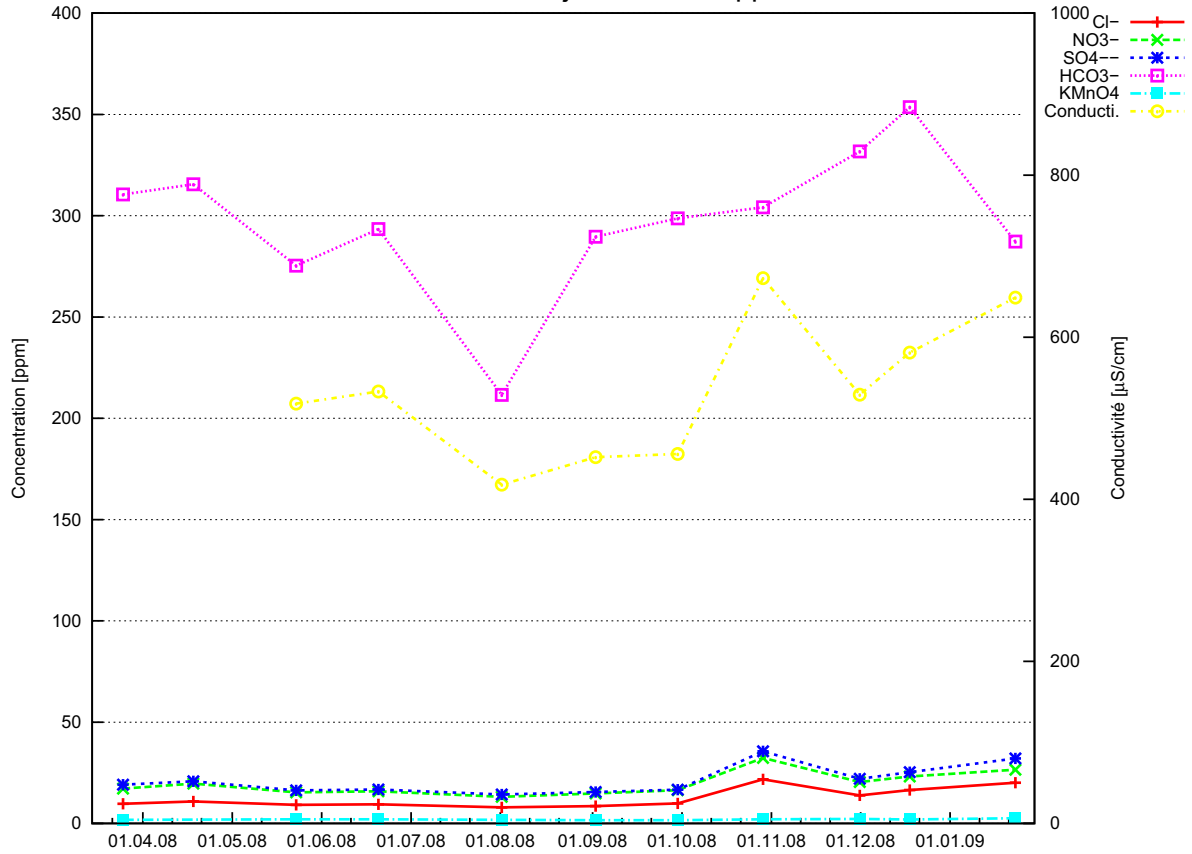
Concentration en ions majeurs de la nappe en SO1



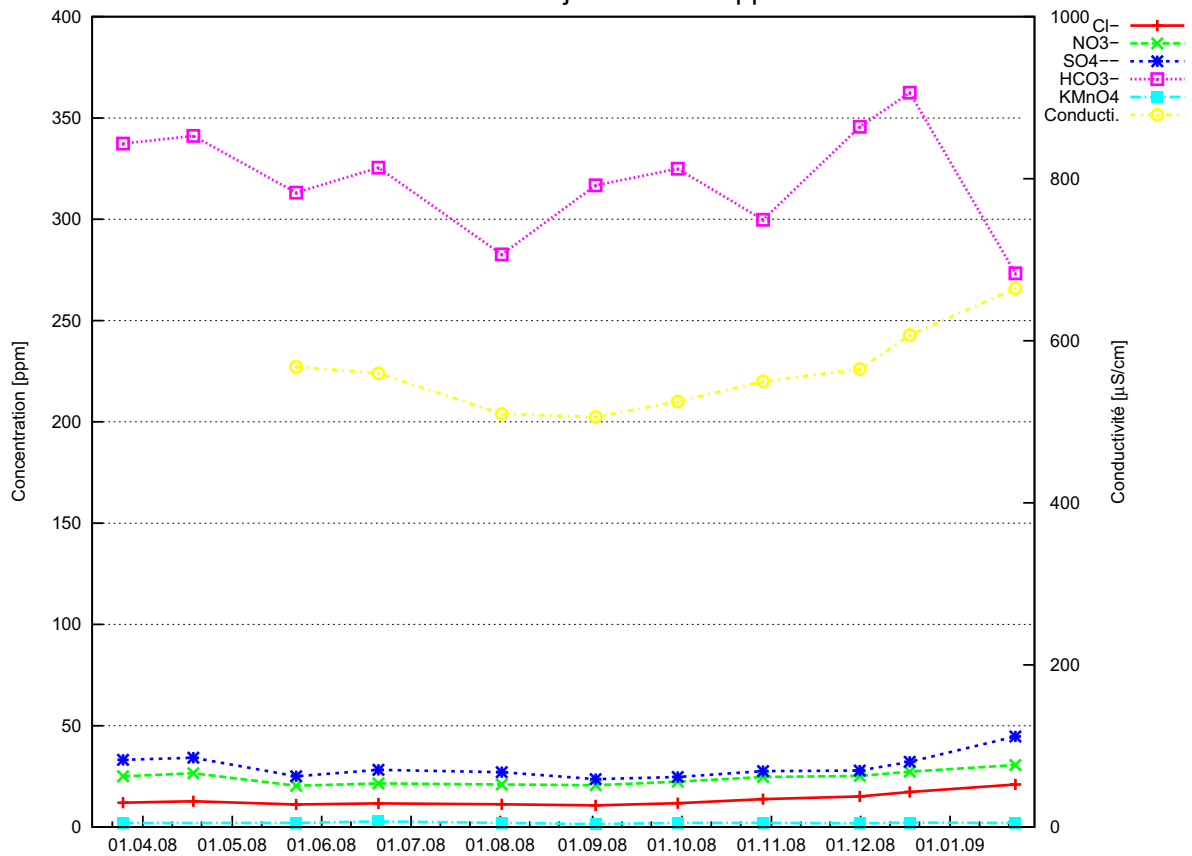
Concentration en ions majeurs de la nappe en SO2



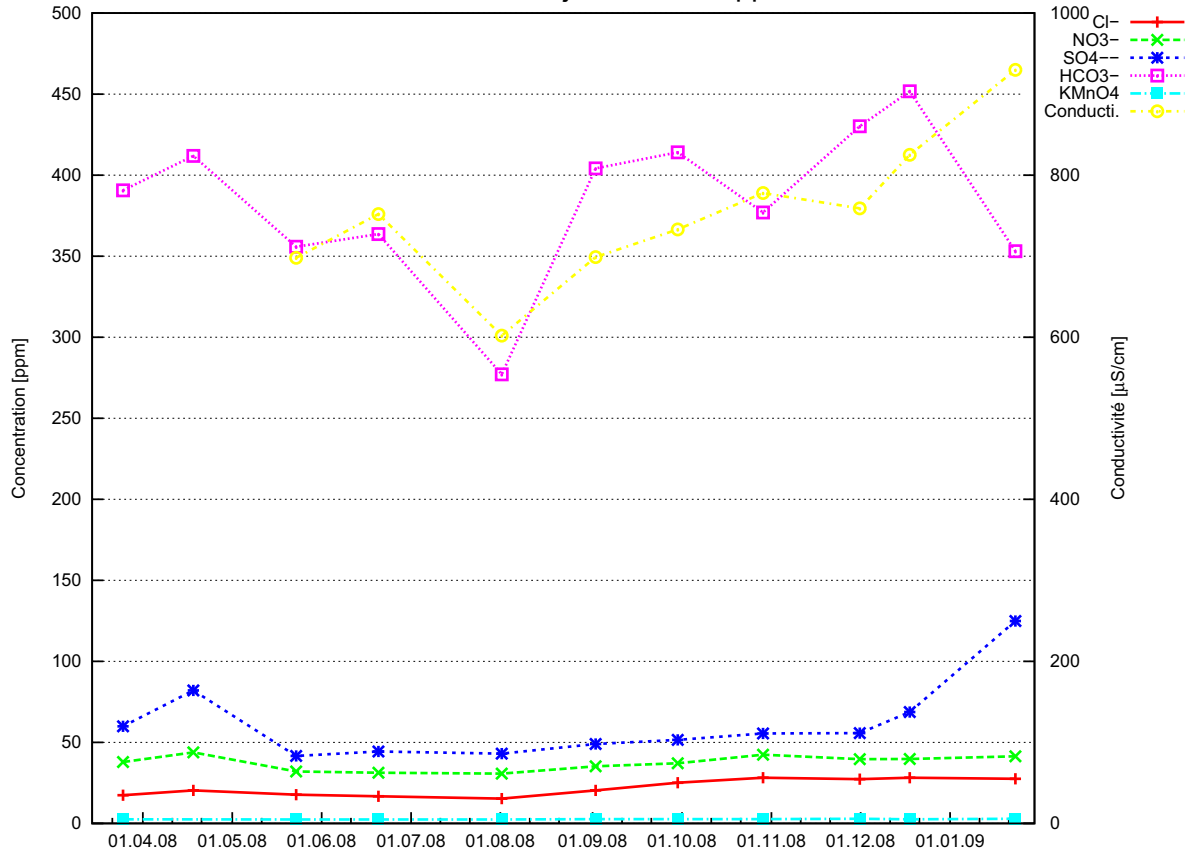
Concentration en ions majeurs de la nappe en SO3



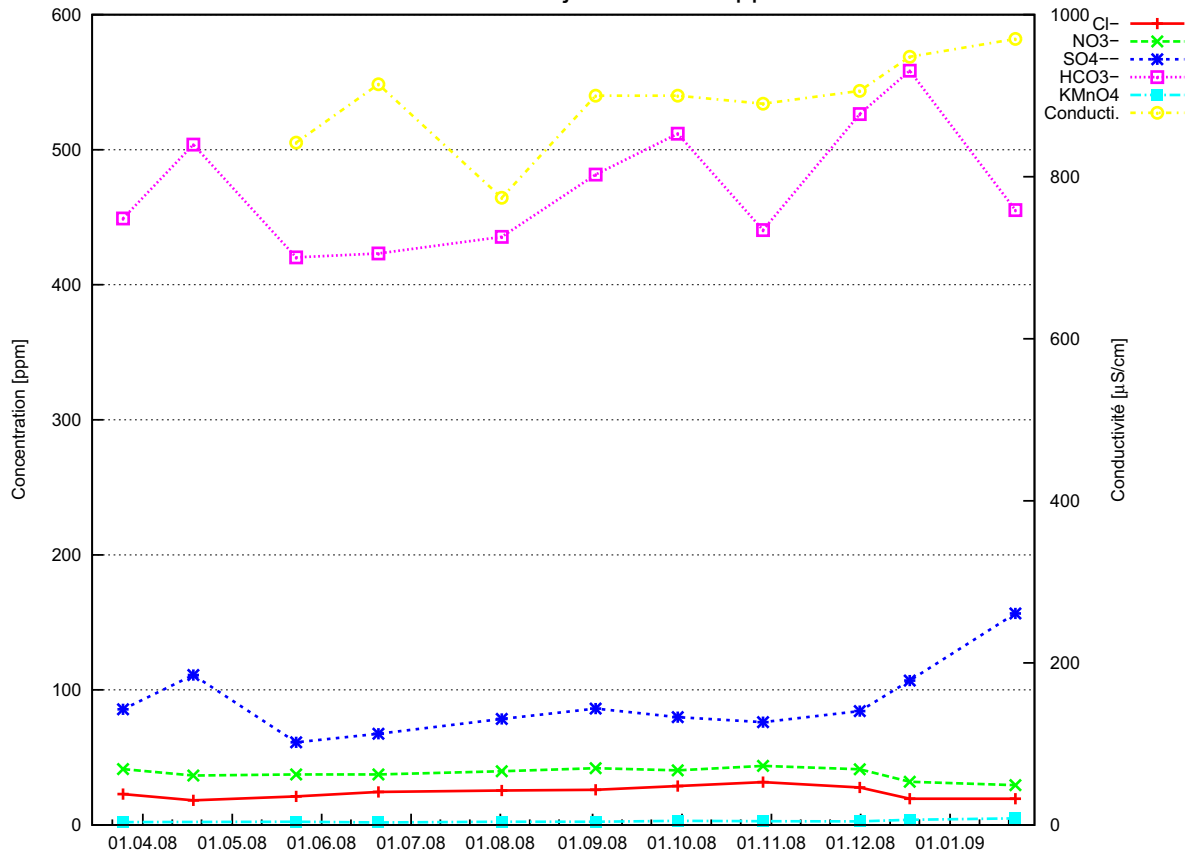
Concentration en ions majeurs de la nappe en SO4



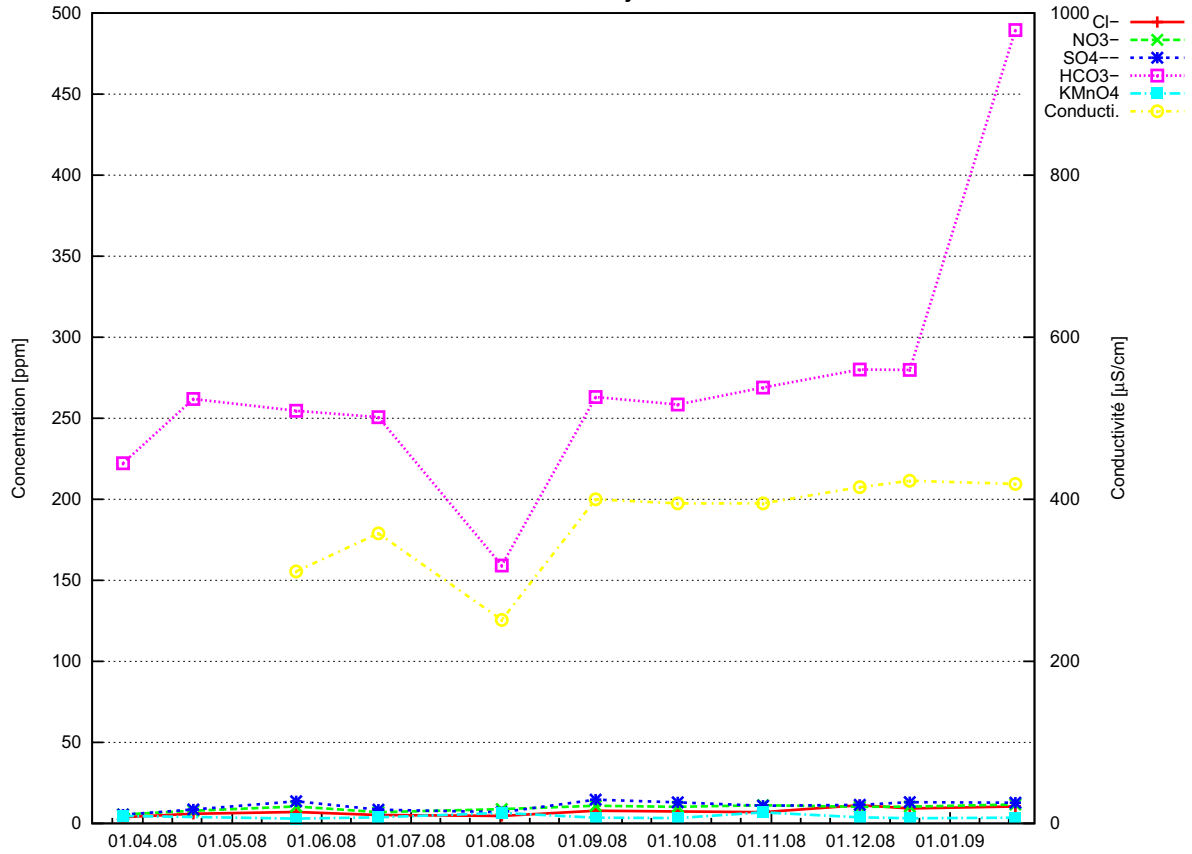
Concentration en ions majeurs de la nappe en SO5



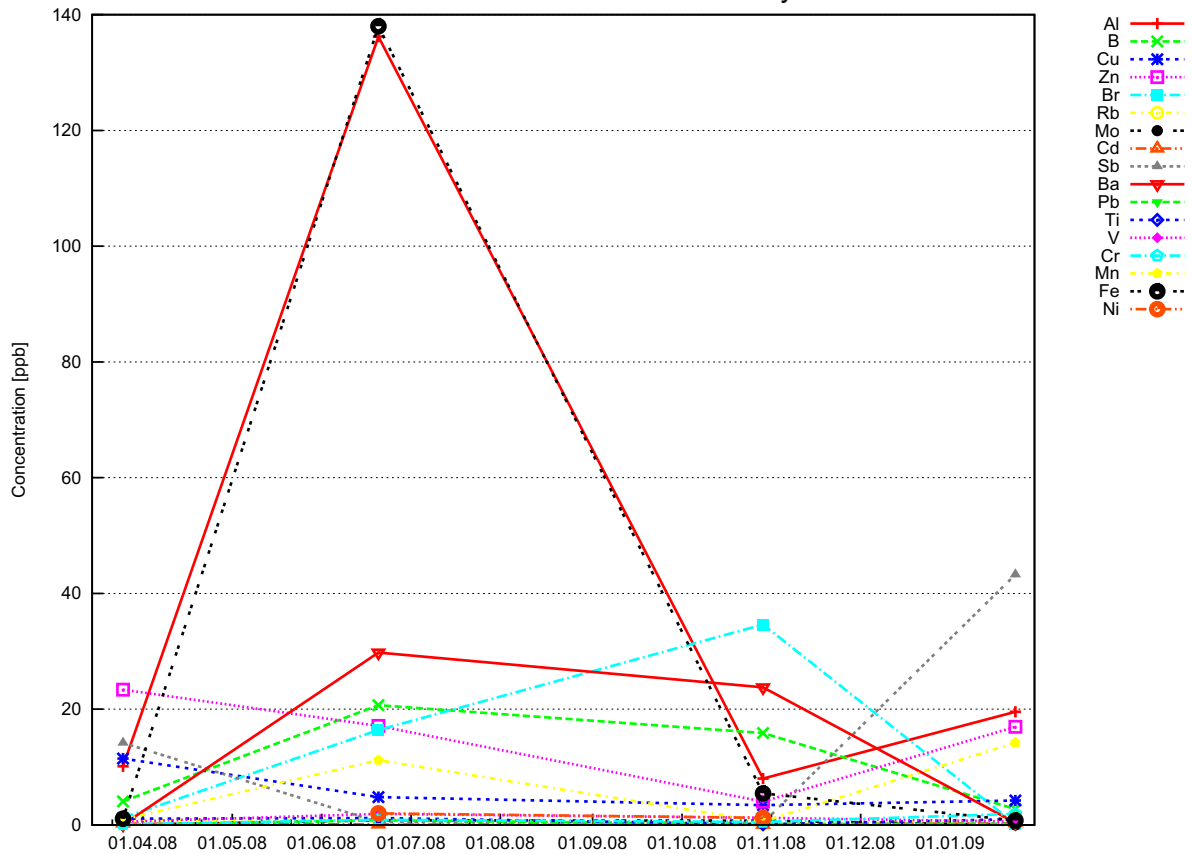
Concentration en ions majeurs de la nappe en SO6



### Concentration en ions majeurs de l'Arnon



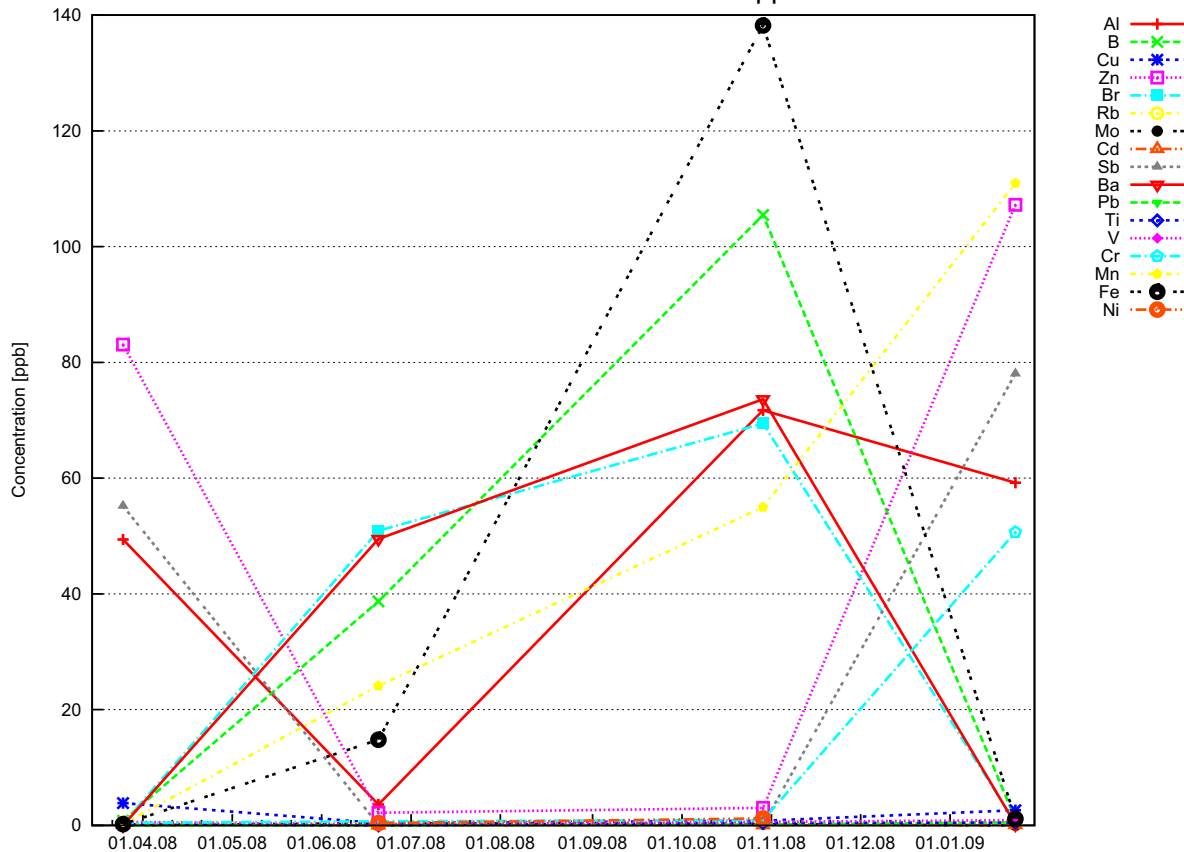
### Concentration en éléments traces dans le lysimètre



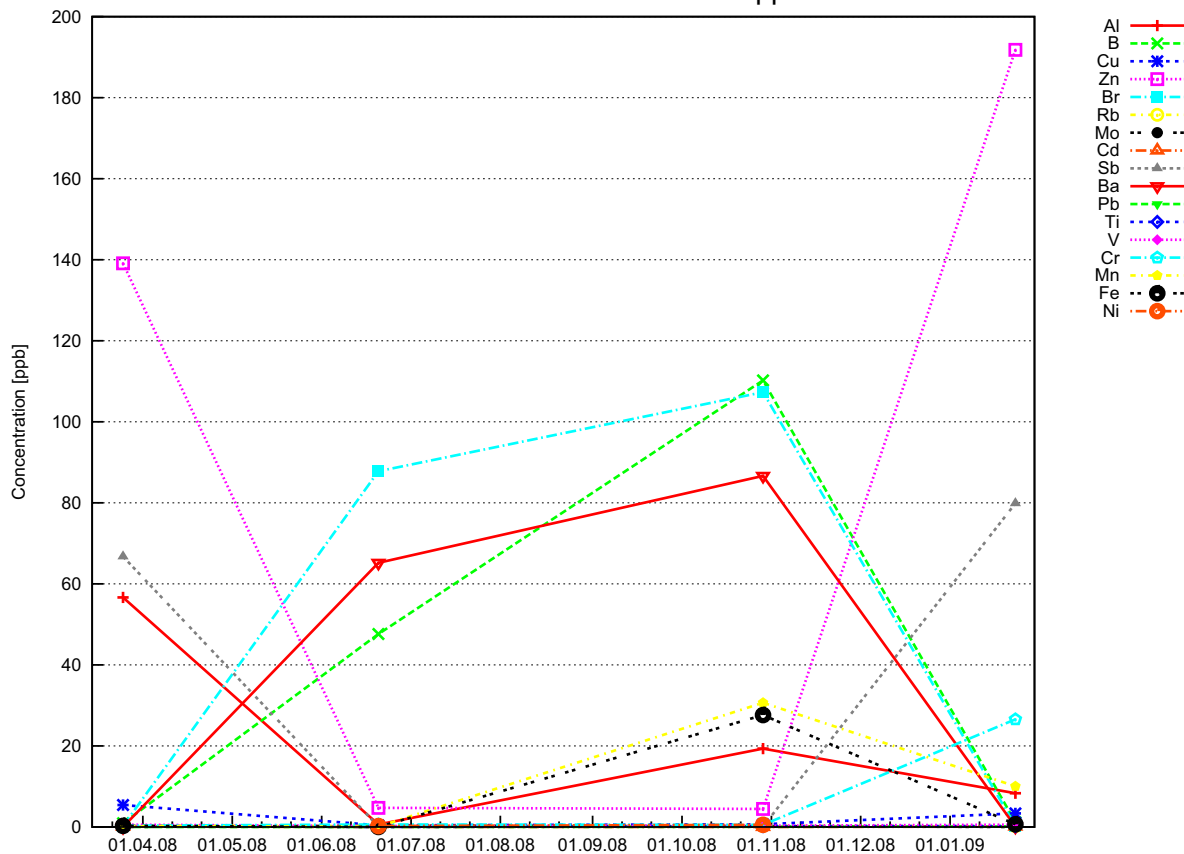




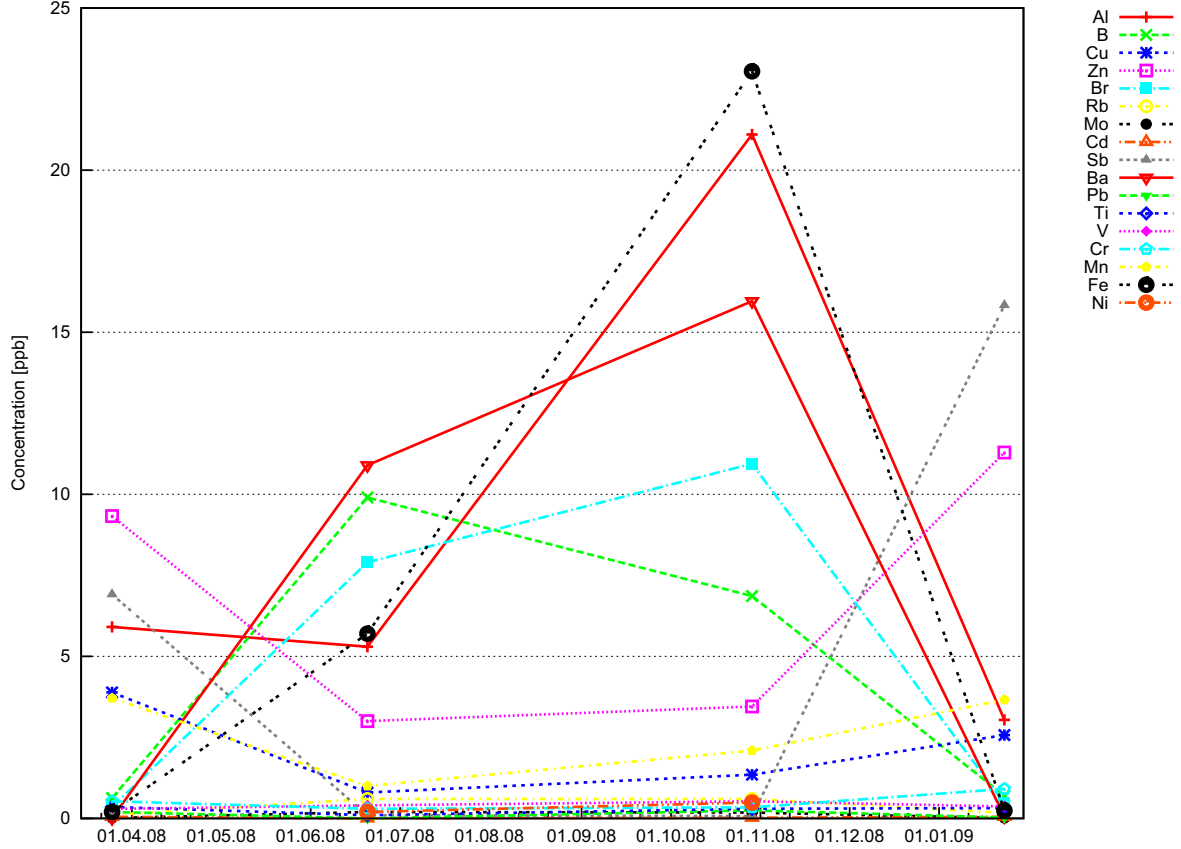
Concentration en éléments traces de la nappe en SO5



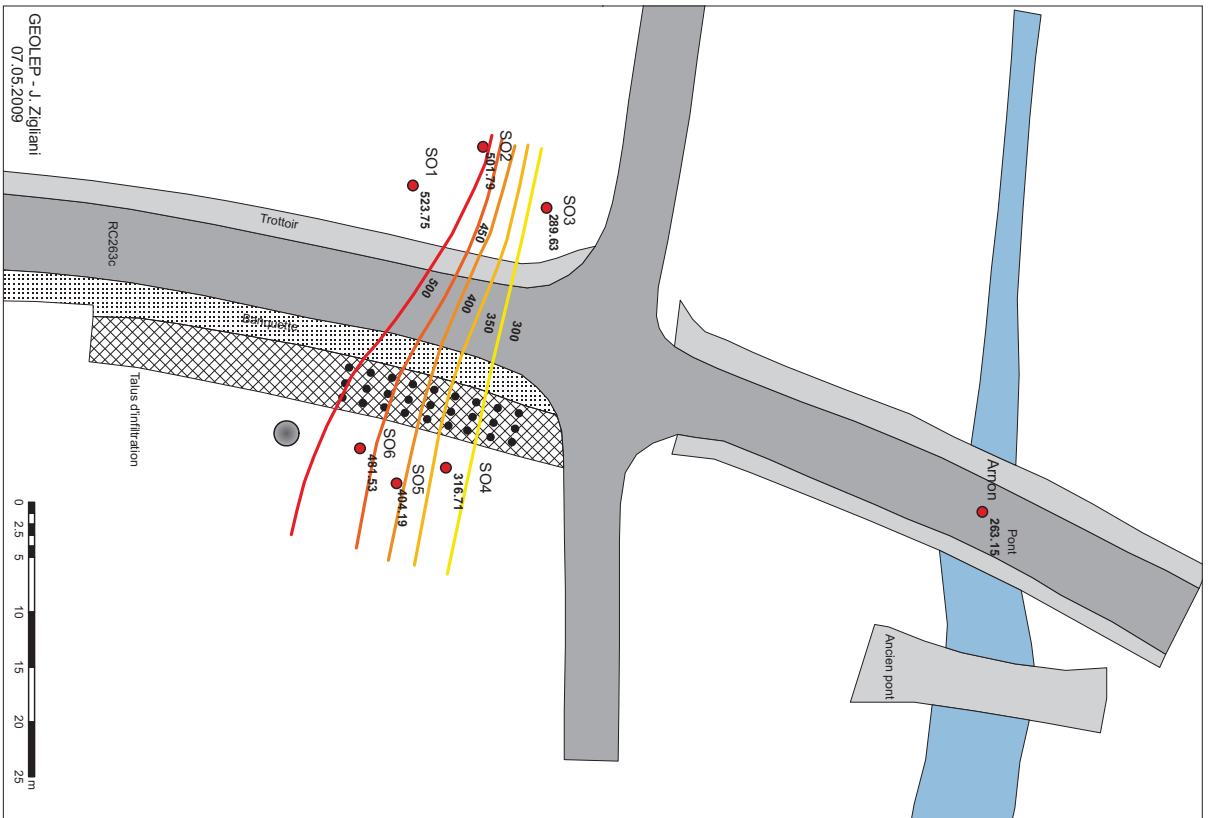
Concentration en éléments traces de la nappe en SO6



### Concentration en éléments traces de l'Arnon

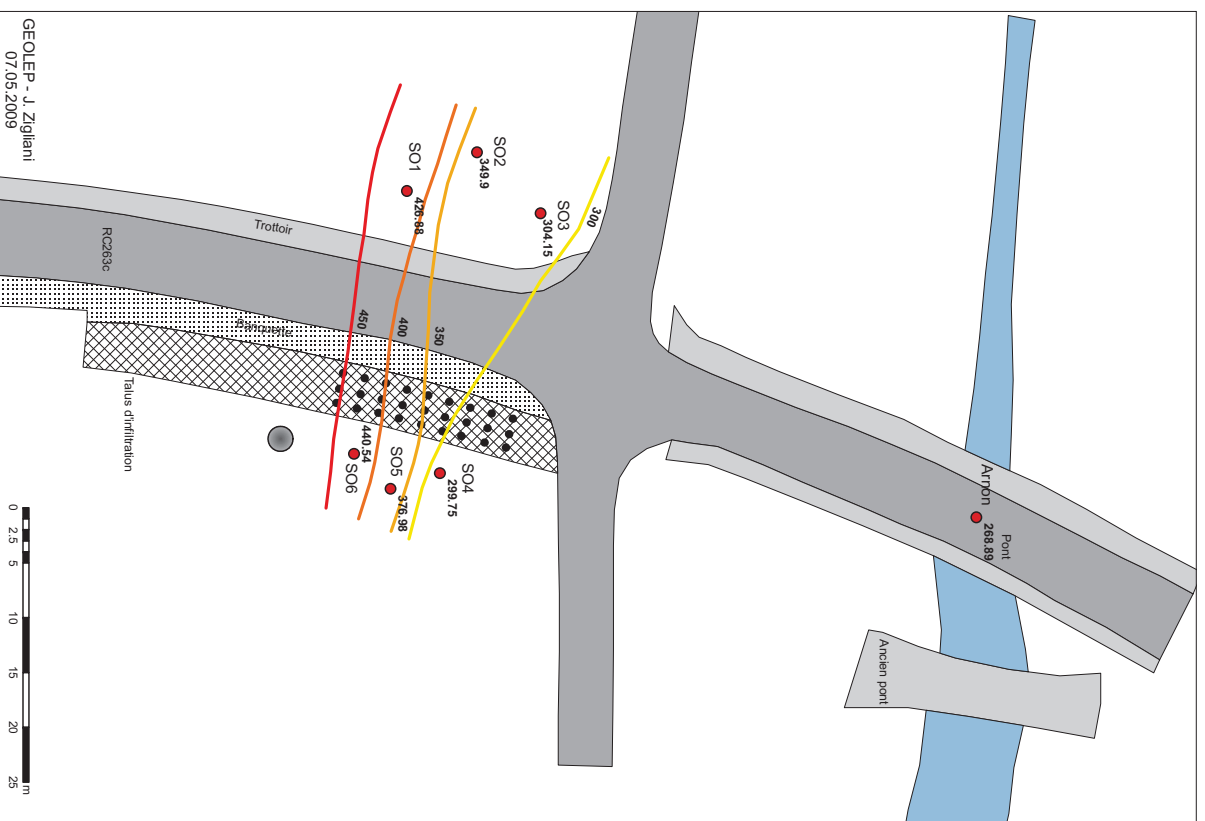


### Analyse de ions bicarbonates [mg/l] - 02.09.08

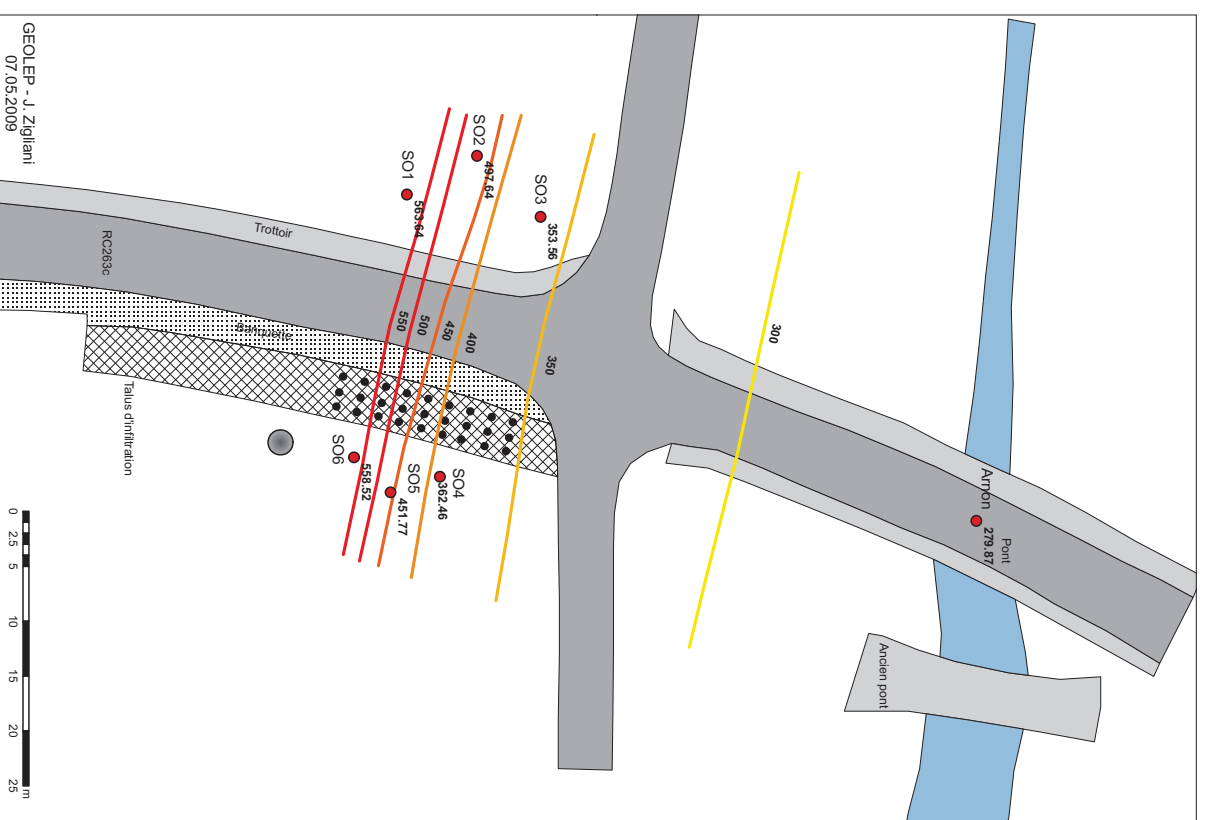


GEOLEP - J. Zigianni  
07.05.2009

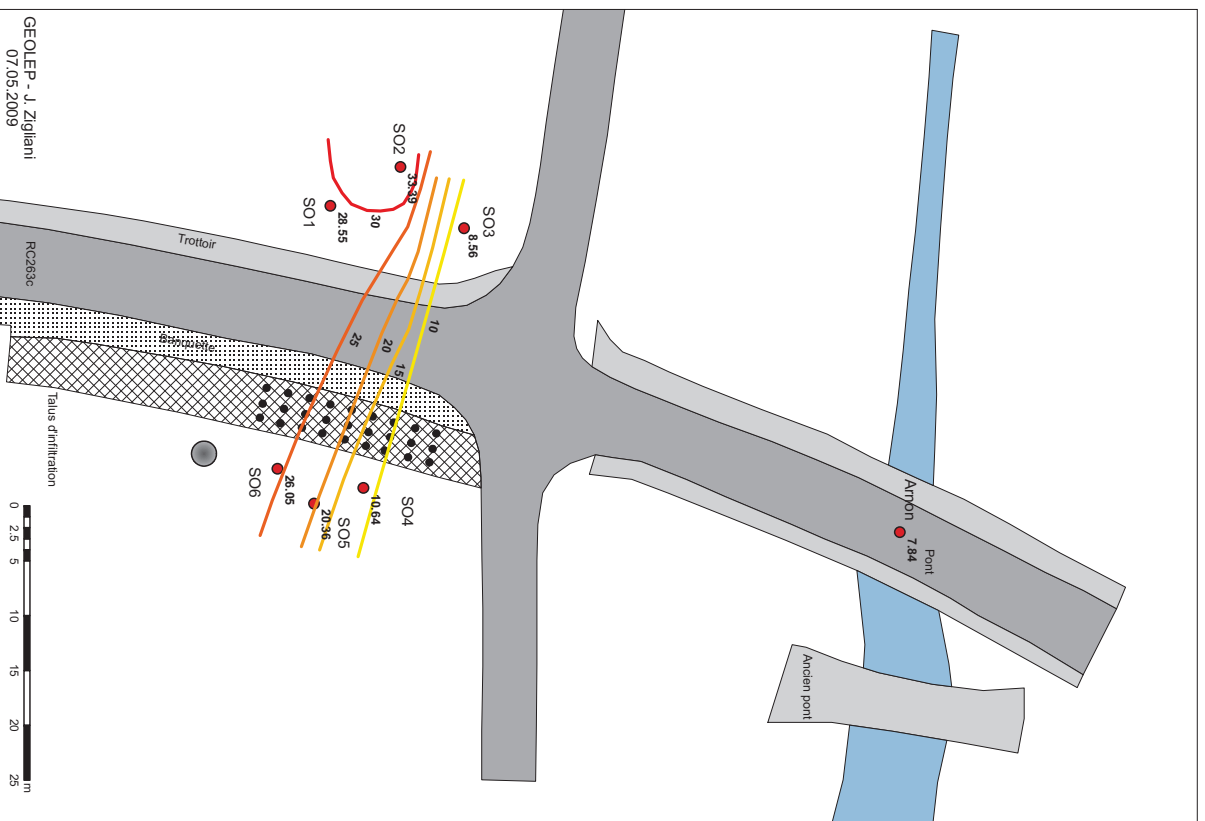
## Analyse de ions bicarbonates [mg/l] - 28.10.08



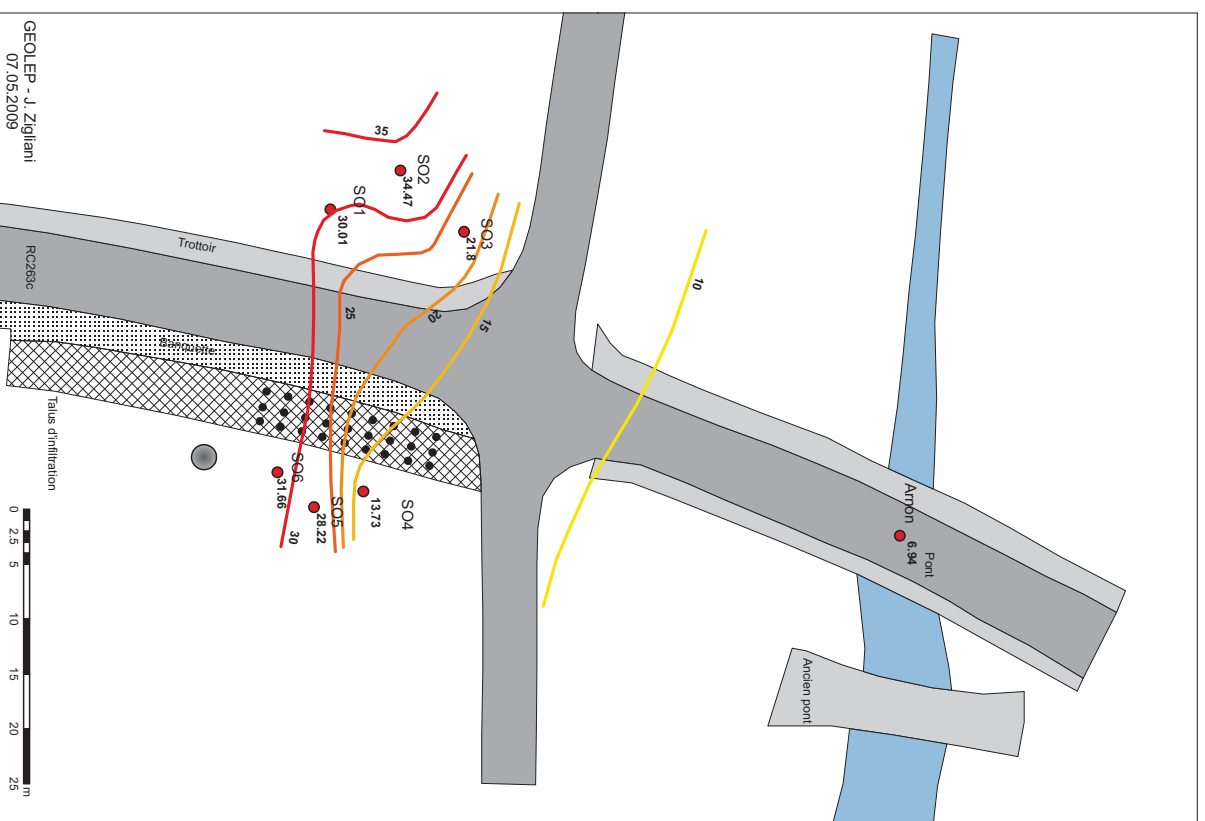
## Analyse de ions bicarbonates [mg/l] - 18.12.08



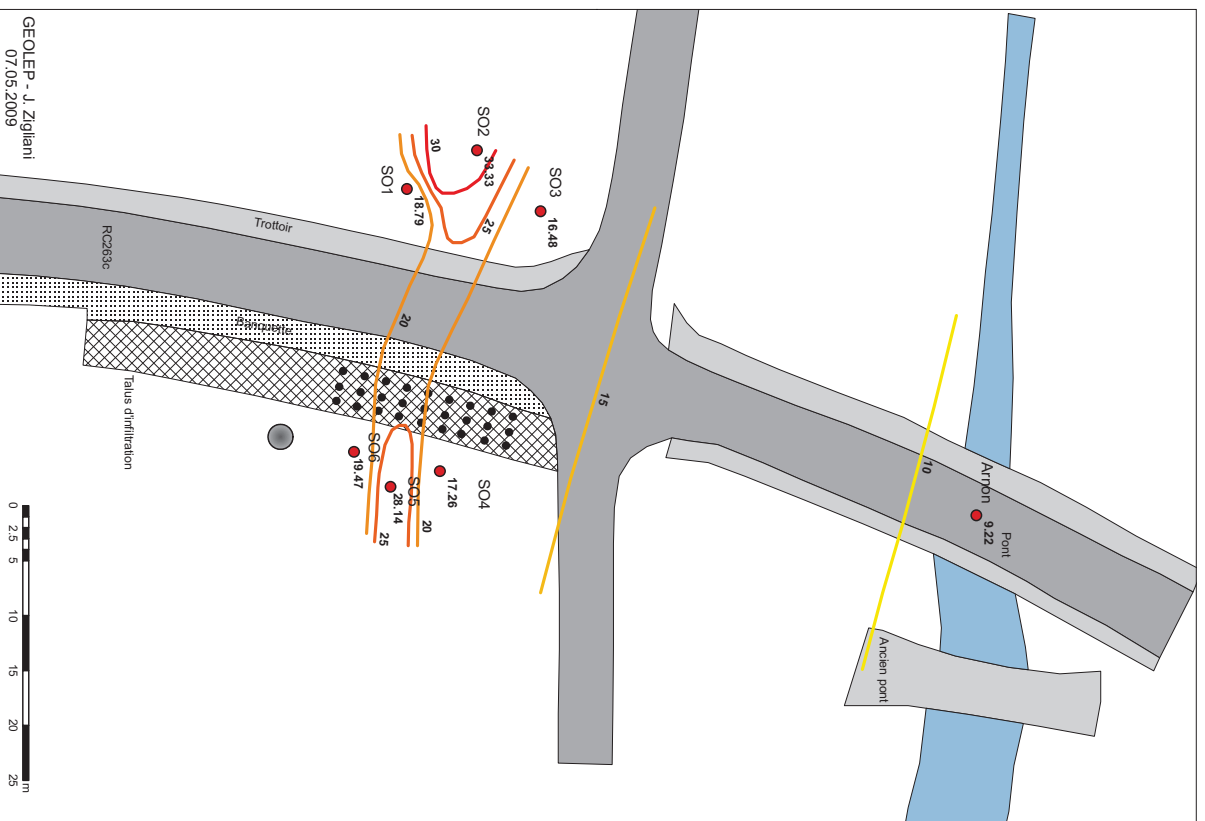
### Analyse de ions chlorures [mg/l] - 02.09.08



### Analyse de ions chlorures [mg/l] - 29.10.08

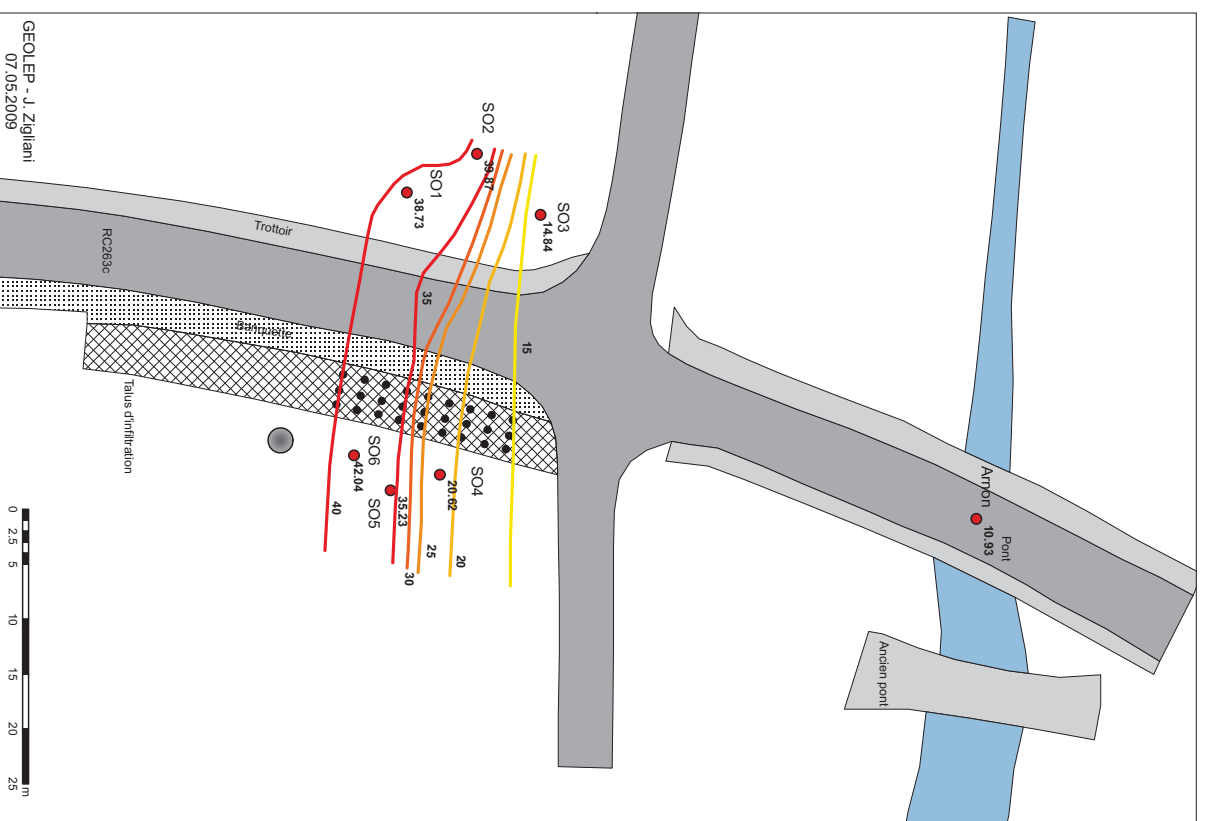


### Analyse de ions chlorures [mg/l] - 18.12.08



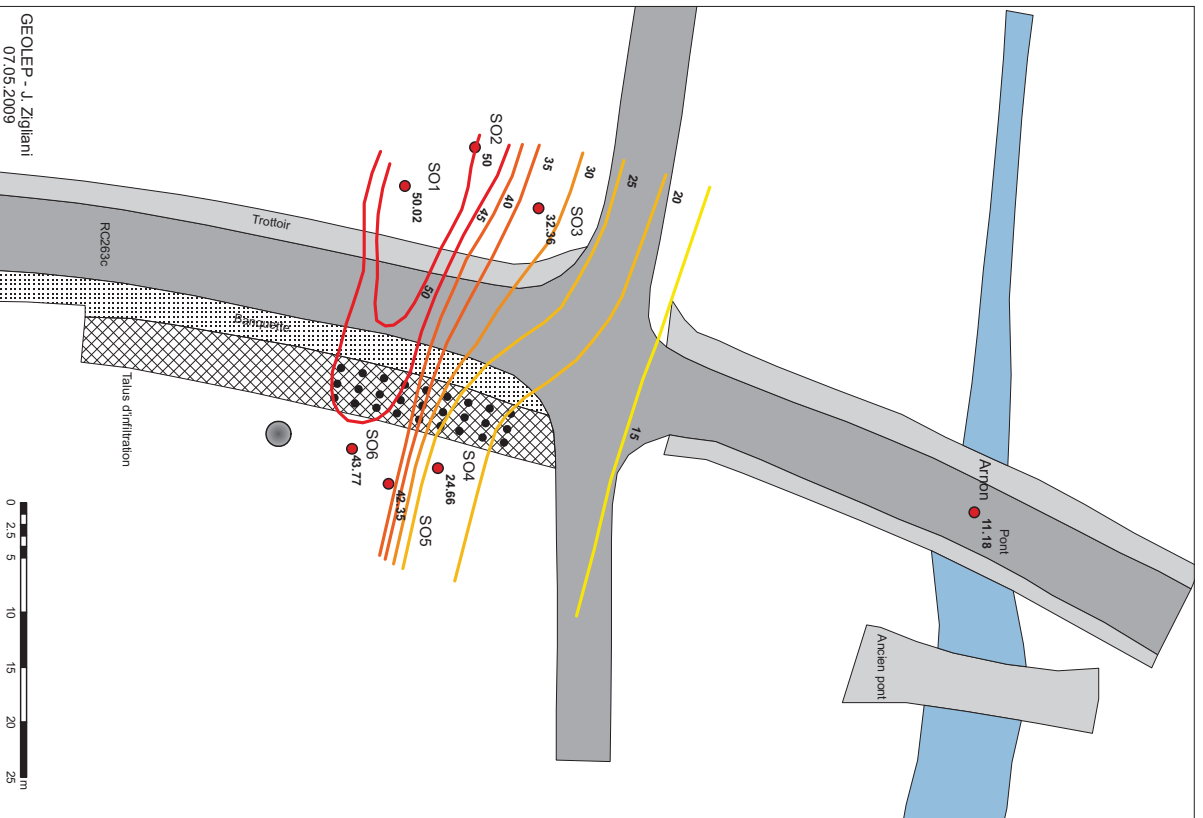
GEOL/EP - J. Zsigliani  
07.05.2009

### Analyse de ions nitrates [mg/l] - 02.09.08



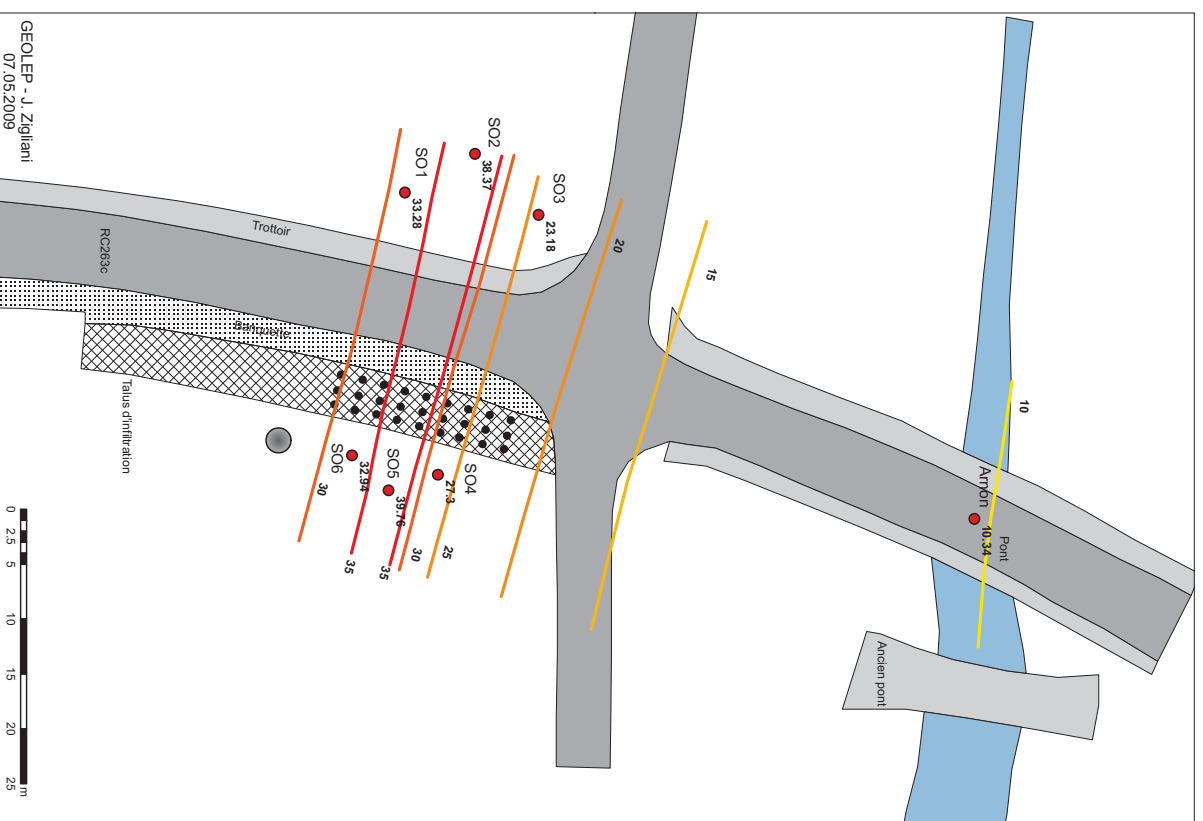
GEOL/EP - J. Zsigliani  
07.05.2009

Analyse de ions nitrates [mg/l] - 29.10.08



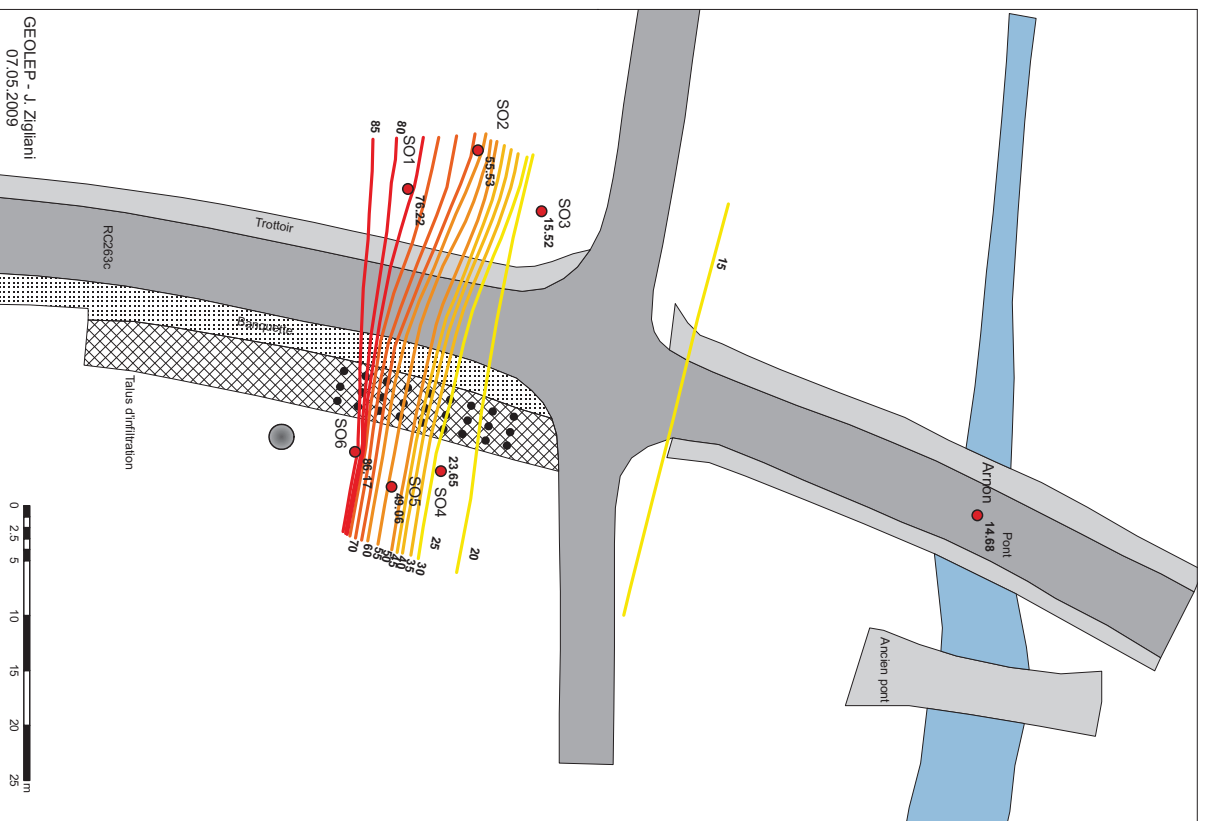
GEOL/EP - J. Zsigliani  
07.05.2009

Analyse de ions nitrates [mg/l] - 18.12.08

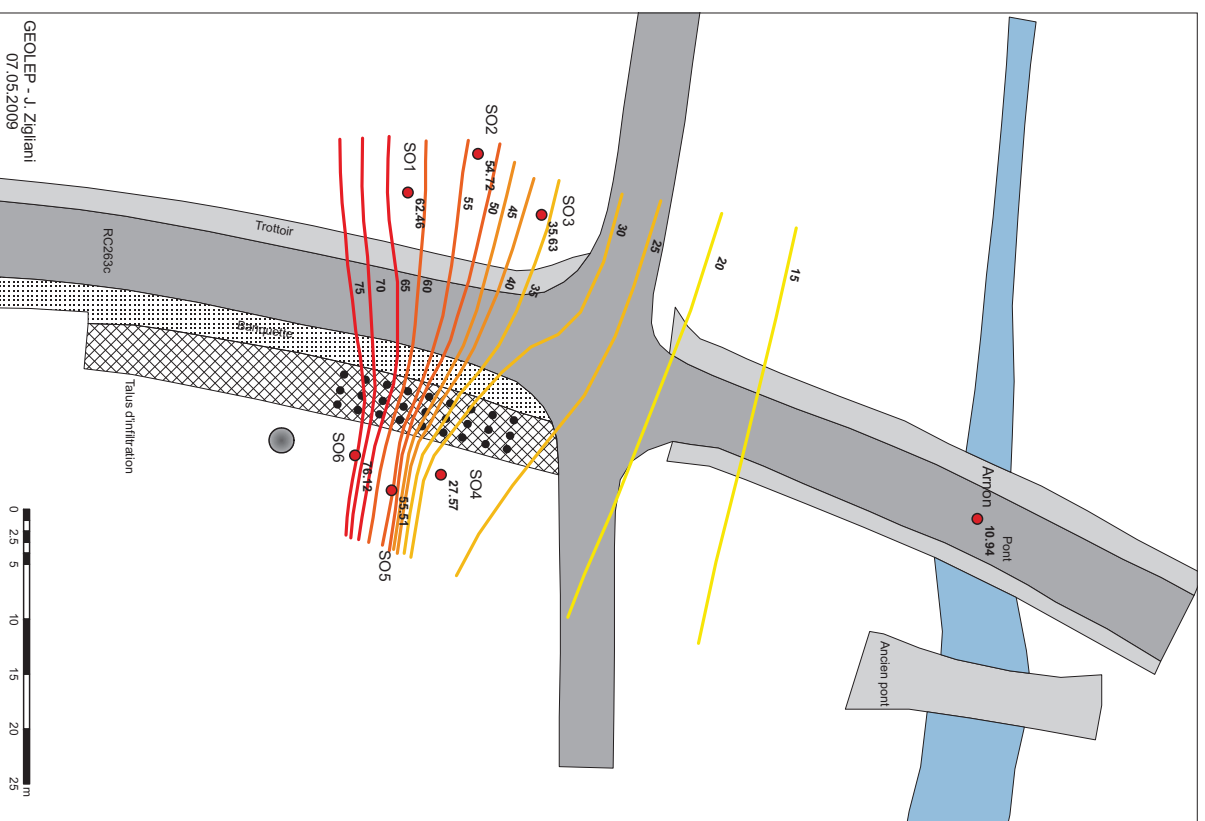


GEOL/EP - J. Zsigliani  
07.05.2009

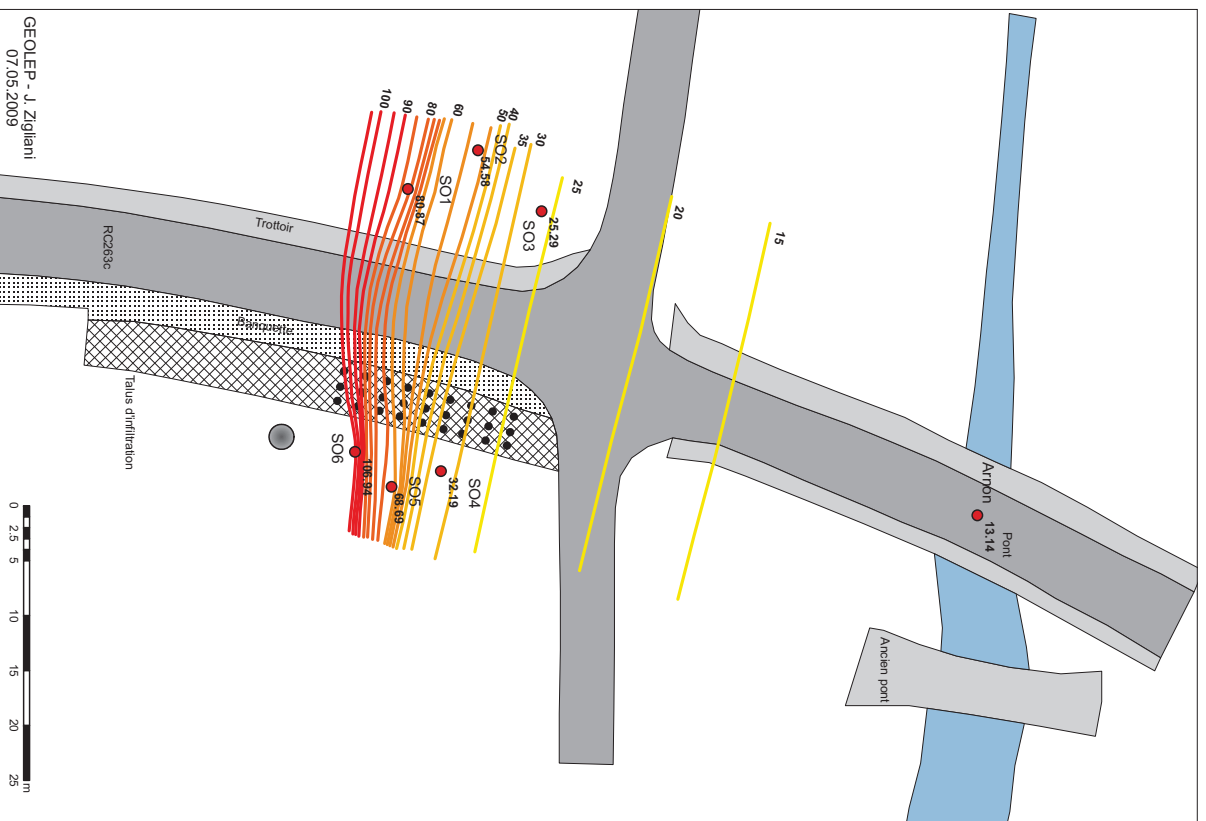
### Analyse de ions sulfates [mg/l] - 02.09.08



### Analyse de ions sulfates [mg/l] - 29.10.08

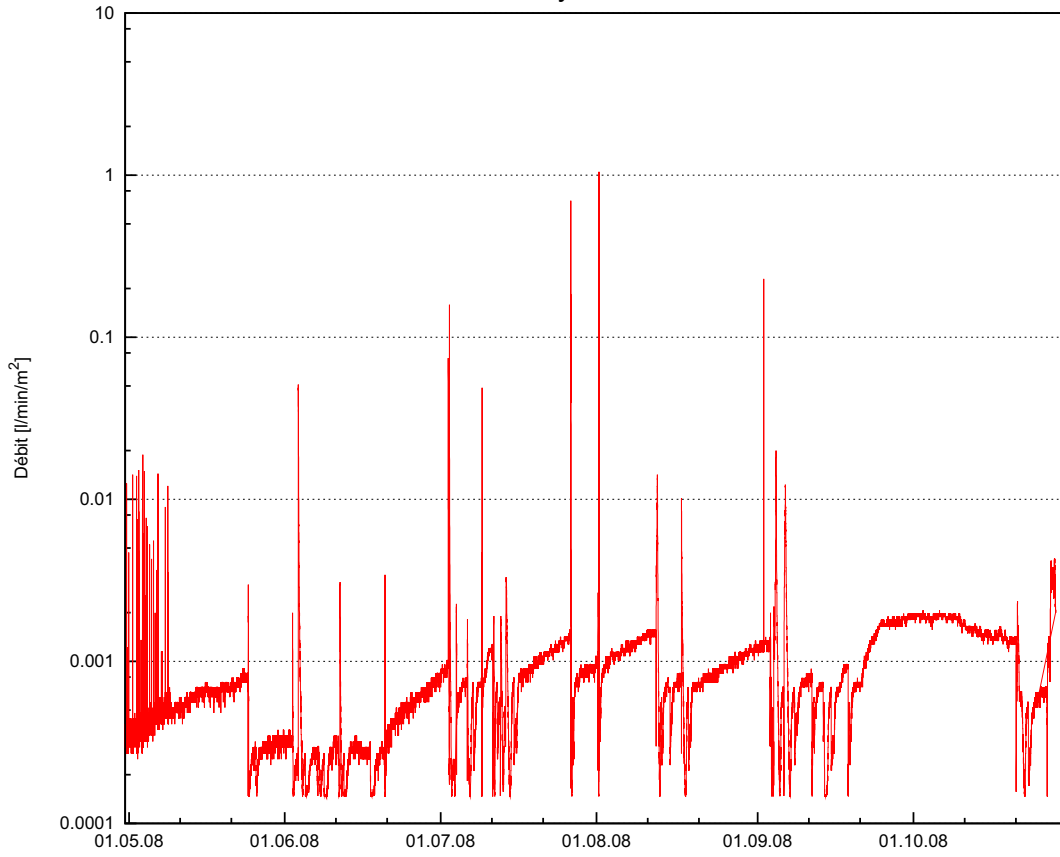


# Analyse de ions sulfates [mg/l] - 18.12.08

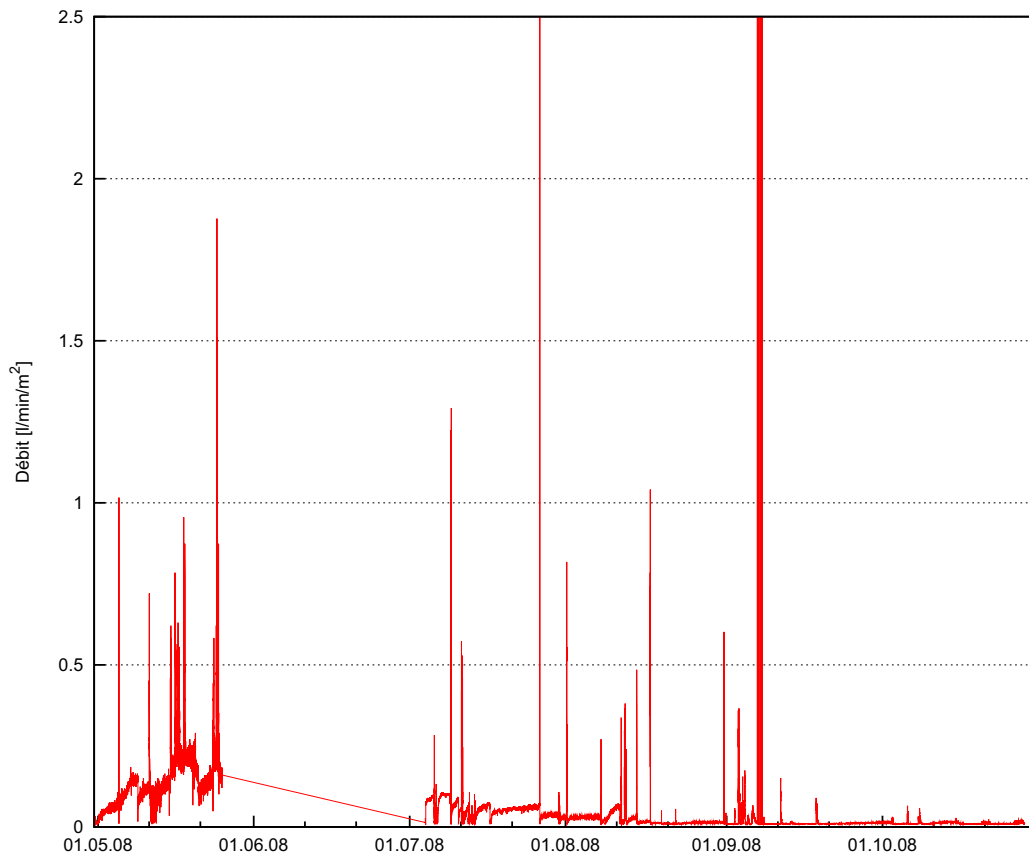


## **Annexe X : Comportements des banquettes et lysimètres**

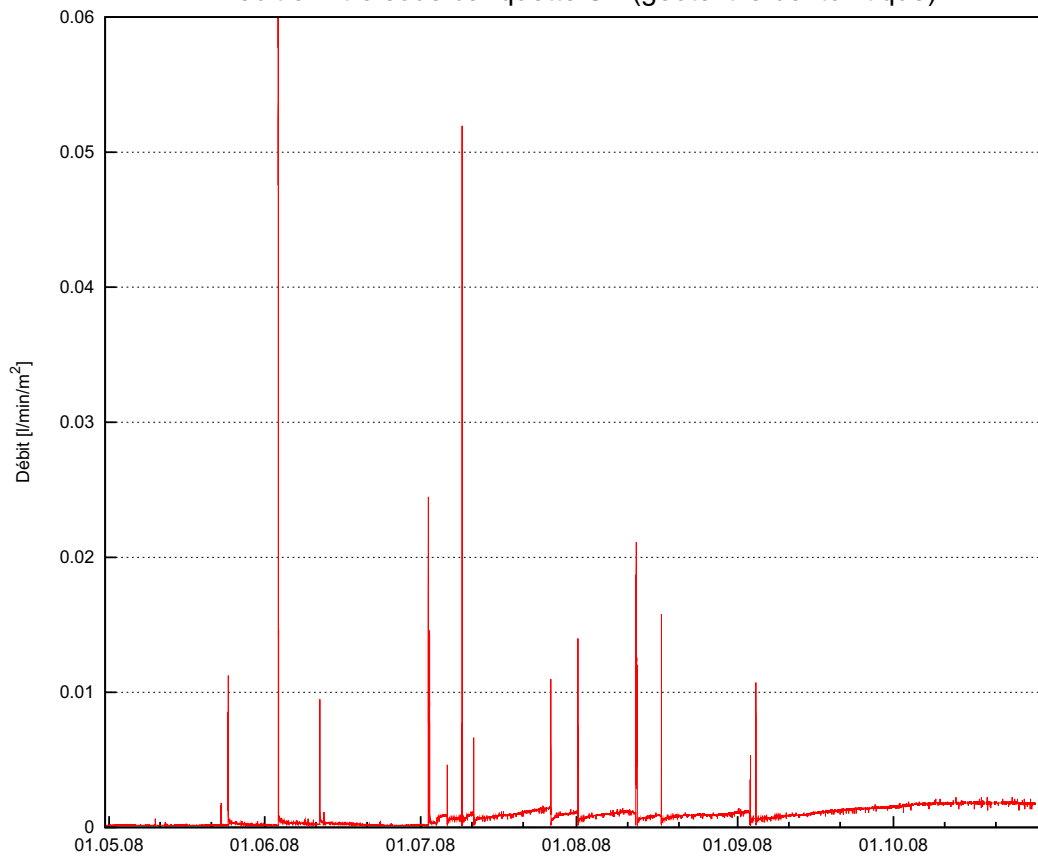
Débit lysimètre LW



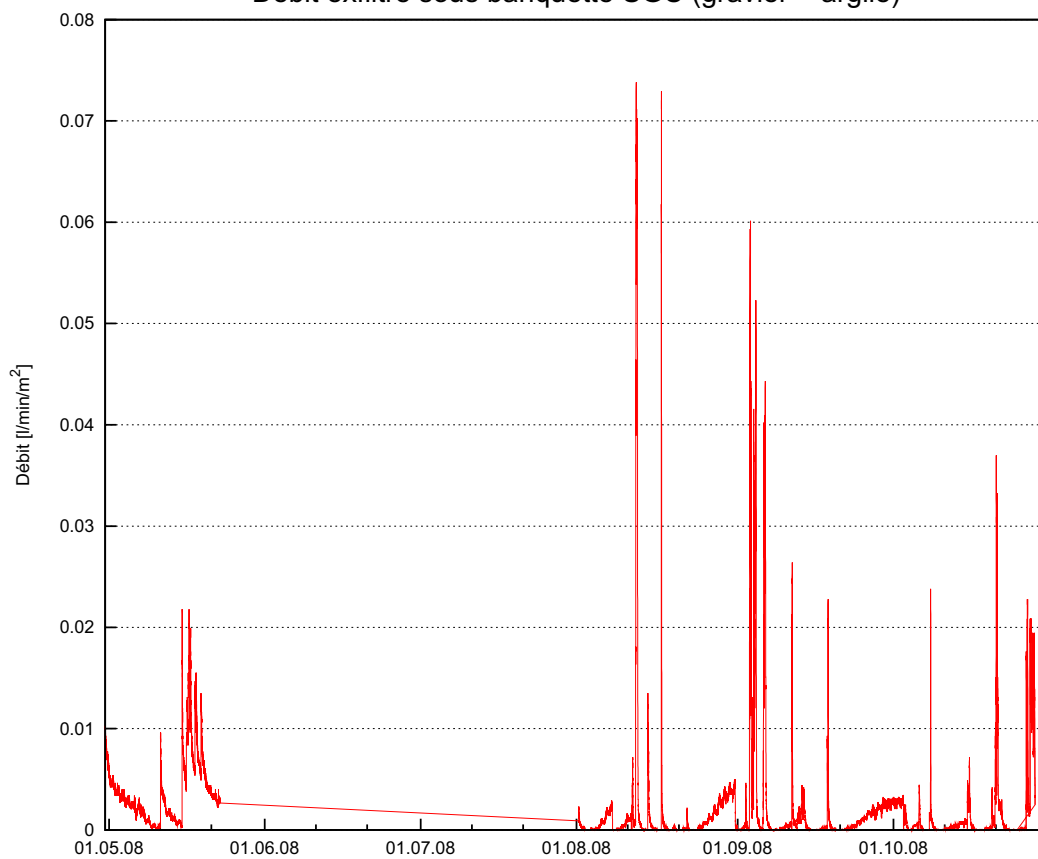
Débit ruissellement routier RUN



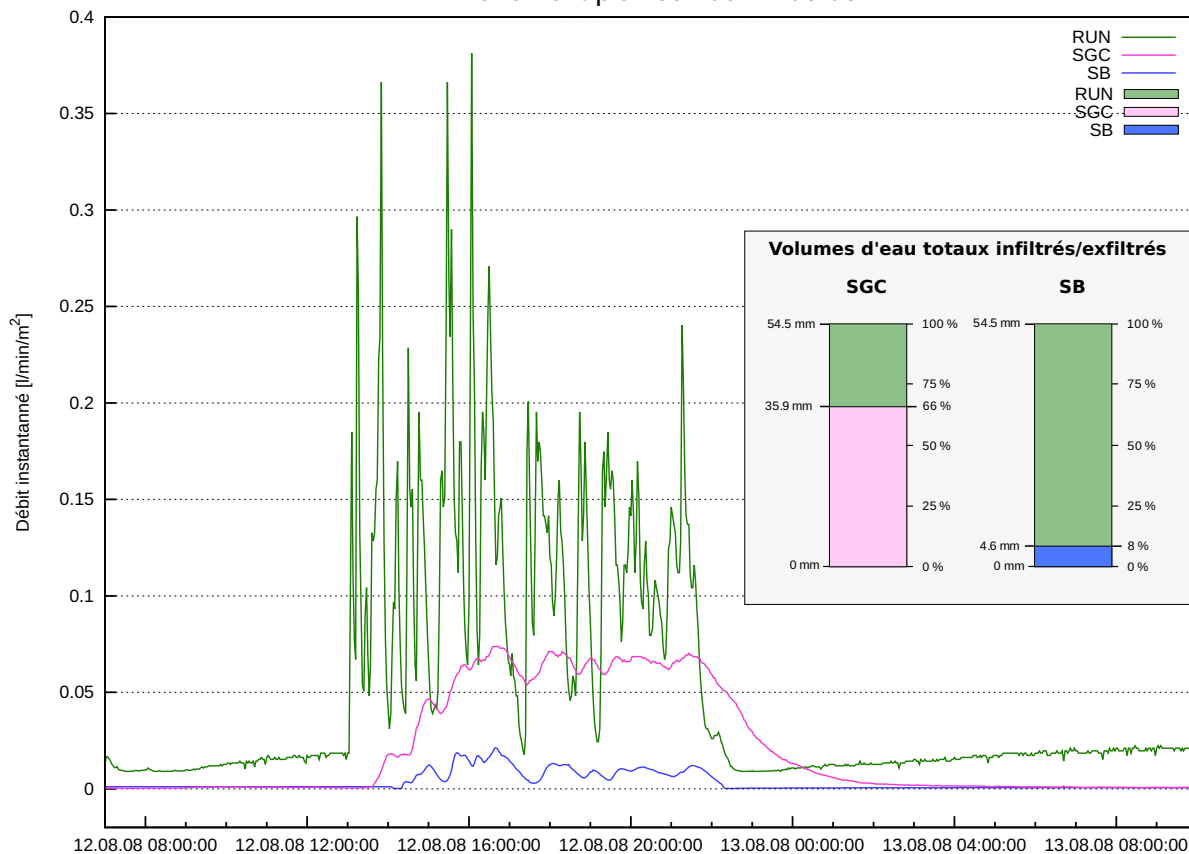
Débit exfiltré sous banquette SB (géotextile bentonitique)



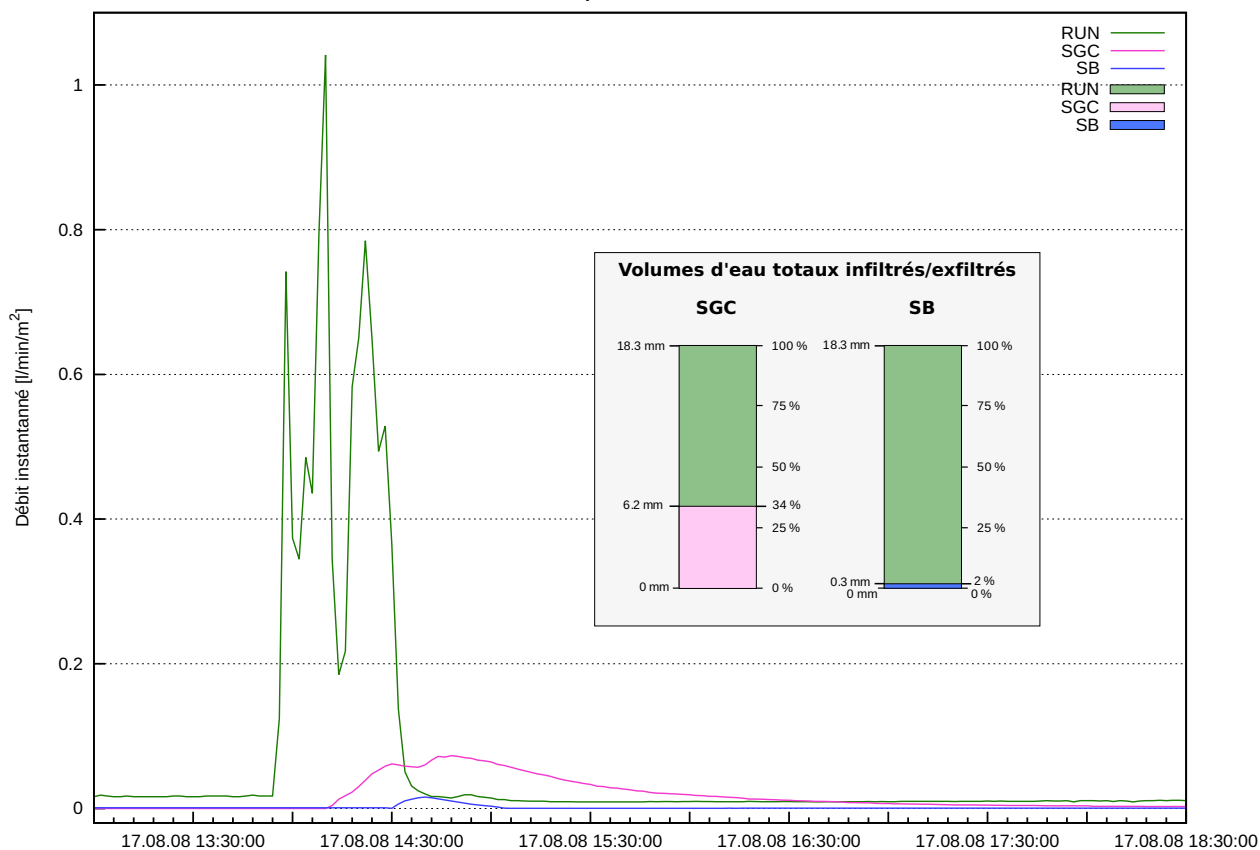
Débit exfiltré sous banquette SGC (gravier – argile)



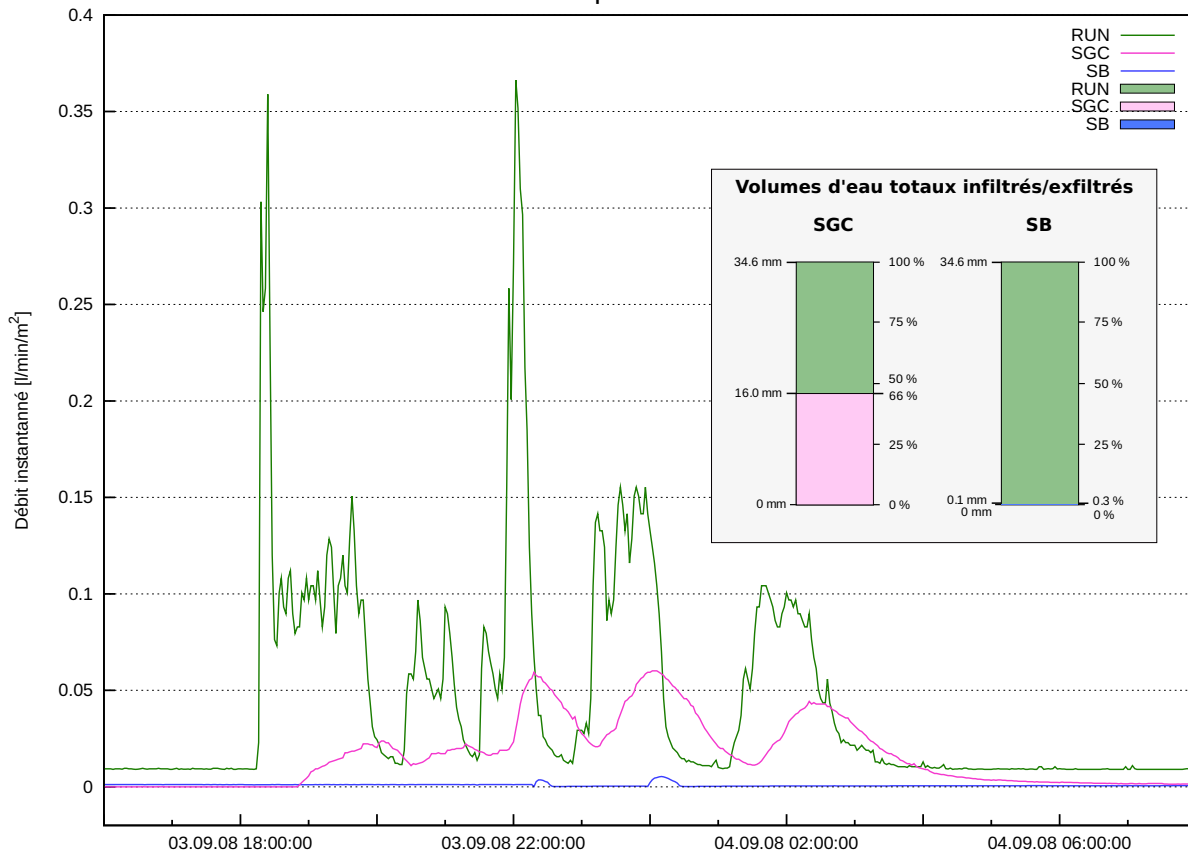
### Evènement pluvieux du 12.08.08



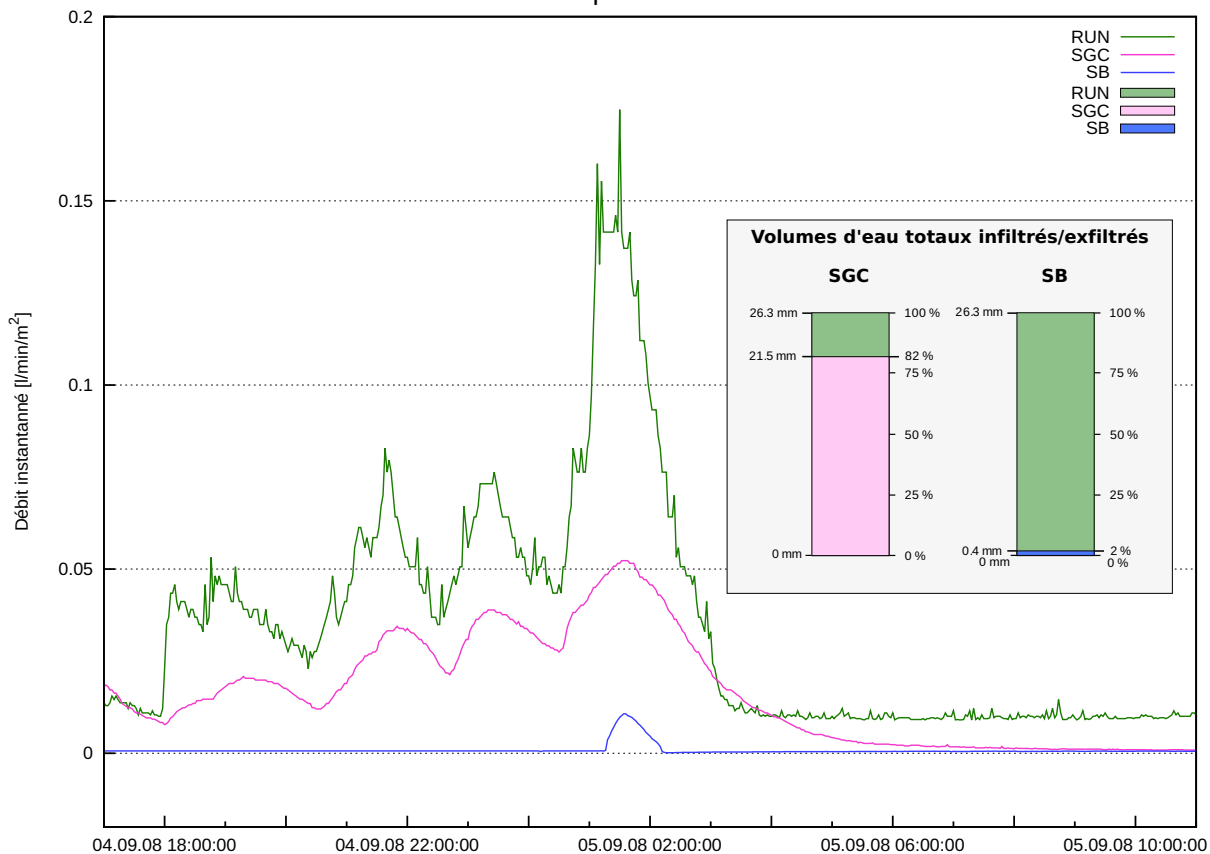
### Evènement pluvieux du 17.08.08



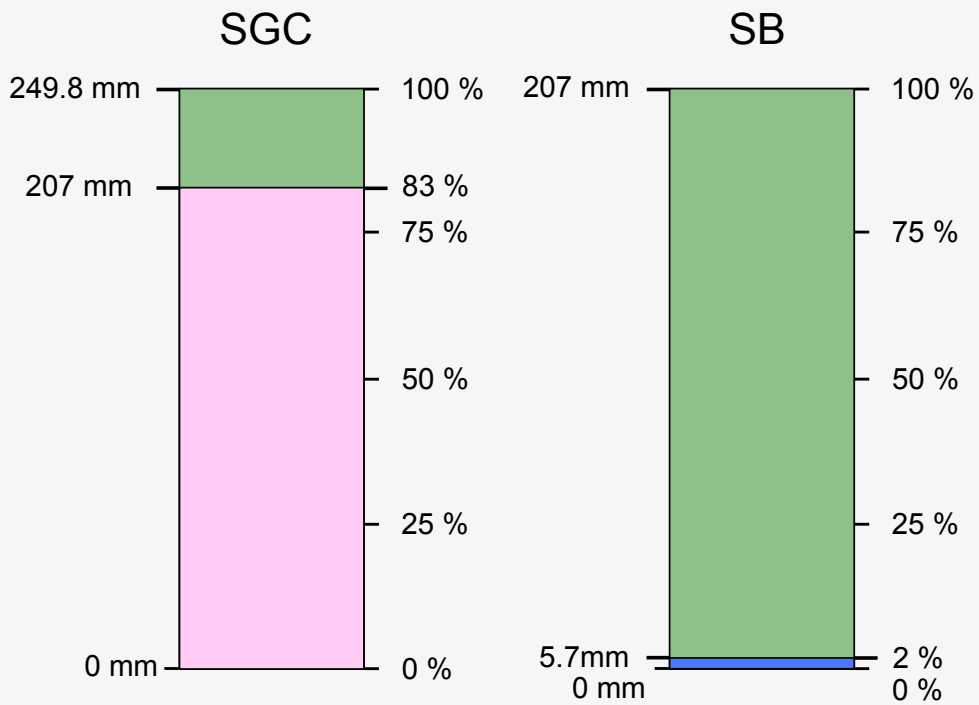
Evènement pluvieux du 03.09.09



Evènement pluvieux du 05.09.09



## Volumes d'eau totaux infiltrés/exfiltrés Période du 01.08.08 au 29.10.08



## Evènements pluvieux Période du 01.08.08 au 29.10.08

