

**Convention Région wallonne et HGE-ULg**  
**Caractérisation complémentaire des masses d'eau dont le bon état dépend**  
**d'interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines**

*D3.5 Quantification des échanges nappe-rivière pour les bassins tests*

**Coordinateur du projet :**

Dr. ir. Serge Brouyère (HGE-ULg)

**Partenaires scientifiques :**

ULg-HGE : Dr. Philippe Orban, Pierre Briers

GxABT-ULg-AEESP : Prof. Aurore Degré, Dr. Catherine Sohier

UN-LEED : Prof. Jean-Pierre Descy, Laurent Viroux, Bruno Leporcq

UN-GEOL : Prof. Vincent Hallet, Flore Schmit, Gaëtan Rochez

Rédaction : Pierre Briers, Philippe Orban, Serge Brouyère

# Table des matières

1.	Introduction et objectifs .....	3
2.	Description des dispositifs mis en place sur les bassins tests .....	4
2.1.	Suivi quantitatif des eaux de surface et des eaux souterraines .....	4
2.1.1.	Stations de jaugeage sur les cours d'eau .....	4
2.1.2.	Suivi piézométrique .....	6
2.1.3.	Station météorologique.....	8
2.2.	Suivi qualitatif des eaux de surface et des eaux souterraines.....	8
2.2.1.	Monitoring des eaux de surface à l'aide de sondes multi-paramètres.....	8
2.2.2.	Échantillonnages des eaux de surface et des eaux souterraines .....	9
2.2.3.	Profils de température dans le Triffoiy par la méthode Distributed Temperature Sensing .....	10
3.	Principales investigations menées lors de l'étude .....	11
4.	Résultats et interprétations des investigations.....	12
4.1.	Mise en évidence des échanges nappe-rivière.....	12
4.1.1.	Réalisation de profils en long sur le Triffoiy .....	12
4.1.2.	Distributed Temperature Sensing.....	18
4.2.	Dynamique temporelle des échanges nappe-rivière.....	21
4.2.1.	Débitmétrie au cours du temps aux stations de jaugeage sur le Triffoiy .....	22
4.2.2.	Débitmétrie au cours du temps aux stations de jaugeage sur le Hoyoux Amont .....	24
4.2.3.	Monitoring physico-chimique aux différentes stations de jaugeage .....	26
4.2.4.	Monitoring hydrochimique par échantillonnage automatique à l'exutoire du Triffoiy.....	28
4.2.5.	Analyse comparée de l'évolution de la piézométrie de la nappe et du niveau et débit des cours d'eau .....	30
4.3.	Premières conclusions relatives à l'étude des interactions nappe-rivière .....	35
4.4.	Quantification des échanges nappe-rivière.....	37
4.4.1.	Calcul des débits échangés entre la nappe et la rivière sur base de mesures de débits entre deux stations .....	37
4.4.2.	Quantification des flux d'eau souterraine par essais et mesures spécifiques .....	42
4.4.3.	Calculs et comparaison des flux d'eau souterraine obtenus par les différentes méthodes mises en œuvre.....	49
5.	Dynamique du nitrate entre nappe et rivière .....	53
5.1.	Evolution temporelle des concentrations en nitrate dans les eaux de surface.....	53
5.2.	Evolution amont-aval des concentrations en nitrate dans les eaux de surface .....	56
5.3.	Informations complémentaires fournies par les mesures de nitrate réalisées sur le site expérimental d'Hodoumont .....	60
5.4.	Synthèse globale et interprétation relative au comportement du nitrate dans les eaux souterraines et à l'interface nappe-rivière .....	62
6.	Conclusions et perspectives.....	64
6.1.	Proposition d'un modèle conceptuel décrivant la dynamique des interactions nappe-rivière.....	64
6.2.	Discussion sur les moyens d'investigations mis en œuvre et de leur adéquation par rapport aux objectifs du projet .....	67
6.3.	Perspectives visant à élargir le champ d'applications des études nappe-rivière à d'autres contextes .....	68
7.	Bibliographie .....	69
8.	Annexes.....	70

## 1. Introduction et objectifs

L'objectif général de la tâche est de disposer de données, de mesures et d'observations permettant de mieux comprendre et de quantifier les échanges d'eau et de solutés entre les eaux souterraines et les eaux de surface et ce, dans des bassins de type calcaires carbonifères.

Afin de répondre à cet objectif général, des objectifs plus spécifiques ont été posés :

- a. tenter de mettre en évidence des échanges d'eau entre nappe et rivière ainsi que les modalités de ces échanges ;
- b. déterminer la dynamique temporelle des échanges nappe – rivière ;
- c. quantifier ces échanges (essentiellement eau) ;
- d. étudier et comprendre la dynamique du nitrate entre eau souterraine et eau de surface.

Afin de répondre à ces objectifs, une série d'investigations, complémentaires les unes avec les autres et basées sur des mesures directes telles que des jaugeages, des suivis hydrochimiques, de température et de conductivité électrique, des mesures de flux, (...) ont été testées et appliquées. Des mesures indirectes (application de la loi de Darcy pour le calcul des échanges) ont également été appliquées. Le choix de ces méthodes a été effectué après une analyse d'études analogues (ex : Winter *et al.* 1998, Sophocleus 2002, Kalbus *et al.* 2006, Fleckenstein *et al.* 2010, McCallum *et al.* 2012, Cook 2015). Les résultats ont servi à affiner l'analyse visant à évaluer l'importance relative du débit de base sur le débit des cours d'eau. En parallèle à cette caractérisation et cette quantification des échanges nappe-rivière, les travaux ont également porté sur un suivi de l'évolution des concentrations en nitrate tant du point de vue des eaux souterraines que des eaux de surface, et ce via des échantillonnages réguliers.

Du point de vue biologique, des investigations concernant les assemblages de diatomées ainsi qu'une analyse des peuplements de macroinvertébrés benthiques ont également été effectués. Ces résultats, développés dans le livrable D3.1 (*'Acquisition des données pour l'interprétation de la pression associée des prélèvements d'eau souterraine sur l'état et le fonctionnement écologique des cours d'eau'*), ne seront pas repris ici.

Afin que le lecteur ait accès à toutes les informations nécessaires pour la compréhension et la localisation du réseau de mesure, un rappel du dispositif expérimental mis en place dans les bassins tests est proposé en début de rapport. Une présentation des différentes investigations menées est ensuite effectuée afin de synthétiser la méthodologie appliquée. Les résultats et les interprétations sont ensuite développés selon la structure des objectifs spécifiques décrits ci-dessus. Les conclusions relatives aux échanges nappe-rivière et à la dynamique du nitrate et les perspectives apparentées sont finalement présentées.

## **2. Description des dispositifs mis en place sur les bassins tests**

Un livrable à part entière avait été rédigé en vue de décrire le réseau et le programme de monitoring proposé en début de projet (*'D2.4 Réseau et programme de monitoring mis en place sur les sites tests'*). Un rappel de ce réseau est proposé afin que ce document se suffise à lui-même. Des compléments d'informations ont toutefois été ajoutés à celles disponibles dans le livrable D2.4, notamment concernant les périodes sur lesquelles les données collectées sont disponibles.

Afin de ne pas surcharger les légendes des figures, les unités hydrogéologiques sont reprises en annexe (Annexe 1).

### **2.1. Suivi quantitatif des eaux de surface et des eaux souterraines**

#### *2.1.1. Stations de jaugeage sur les cours d'eau*

Des stations de jaugeage ont été mises en place sur les principaux cours d'eau avec pour objectif principal de suivre et calculer leurs débits. Au total, neuf stations de jaugeage 'permanentes' ont été définies dans les bassins tests (Tableau 1), à savoir 4 dans le Triffois et 5 dans le Hoyoux Amont (dont 3 sur des affluents).

Ce terme de permanent est utilisé dans le cadre d'un suivi temporel du débit en opposition aux stations de jaugeages 'ponctuelles' où des mesures épisodiques ont été réalisées. Ces stations ont été implantées en fonction de la géologie (au contact entre différentes lithologies, seuils hydrogéologiques), de mesures de débits déjà réalisées lors d'une première campagne (effectuée en avril 2013) et pour permettre le calcul des bilans hydrologiques (Figure 1).

Toutes les stations ont été équipées de sondes mesurant en continu le niveau et la température de l'eau. Deux stations (exutoires du Triffois et du Hoyoux Amont) ont également mesuré la conductivité électrique de l'eau. L'ensemble des sondes ont été installées en juillet 2013 à l'exception de la station ST 9 qui a été installée en septembre 2014. Le pas de temps d'acquisition des données est de 15 minutes.

Des mesures de débit ont régulièrement été effectuées afin de construire les courbes de tarage. Cette courbe lie le niveau d'eau au débit mesuré et permet ainsi de calculer le débit en continu en interpolant ou extrapolant cette relation (*'D3.3 Bilans hydrogéologiques'*).



### 2.1.2. Suivi piézométrique

Un suivi piézométrique régulier, manuel ou automatique, a été effectué sur différents ouvrages des bassins.

Le suivi automatique par sonde (pas de temps au minimum horaire) a été mis en place sur l'ensemble des nouveaux piézomètres réalisés dans le cadre du projet (PA1 'Amont' et PA2 'Aval', F1 State, Hodoumont P1, P2 SUP, P2 PROF, P5 et sur 6 micropiéromètres) ainsi que sur un puits de particulier situé à Jamagne (Puits Jamagne). D'autres ouvrages ont également été régulièrement suivis, que ce soit dans le cadre de la convention ou dans le cadre du réseau de suivi des compagnies d'eau. La Figure 2 présente la localisation des ouvrages ayant fait l'objet d'un suivi piézométrique.

Au point de vue des micropiéromètres, des forages ont été implantés au niveau de 4 sites (numérotés de 1 à 4) situés dans une prairie en bordure de Triffoiy (Figure 3). Un forage crépiné en dessous des limons (profondeur variable entre 4 et 6m de profondeur) a été effectué sur chacun des 4 sites (nommé en fonction du site de forage : MP1, MP2-6, MP3-6, MP4). Un complément de nom au site de forage est effectué au niveau des sites 2 et 3 du fait qu'un 2<sup>ème</sup> forage de plus faible profondeur (3m) a été effectué sur ces 2 sites (nommé MP2-3 en opposition au MP2-6 et MP3-3 en opposition au MP 3-6). Au total, 6 forages ont donc été réalisés en bordure du cours d'eau.

La localisation des micropiéromètres a été définie sur base des mesures de débit du cours d'eau et de mesures de température (Distributed Temperature Sensing, cf. §4.1.2). Les ouvrages ont été implantés en bordure directe du cours d'eau à l'exception du MP4 qui est situé à 20m de la berge.

Une description détaillée des ouvrages forés dans le cadre du projet est disponible dans le '*D2.3 Rapport technique relatif au forage des piézomètres et des micropiéromètres*'.

Une synthèse des informations concernant les micropiéromètres et les piézomètres est disponible en annexe (Annexe 2 et Annexe 3).

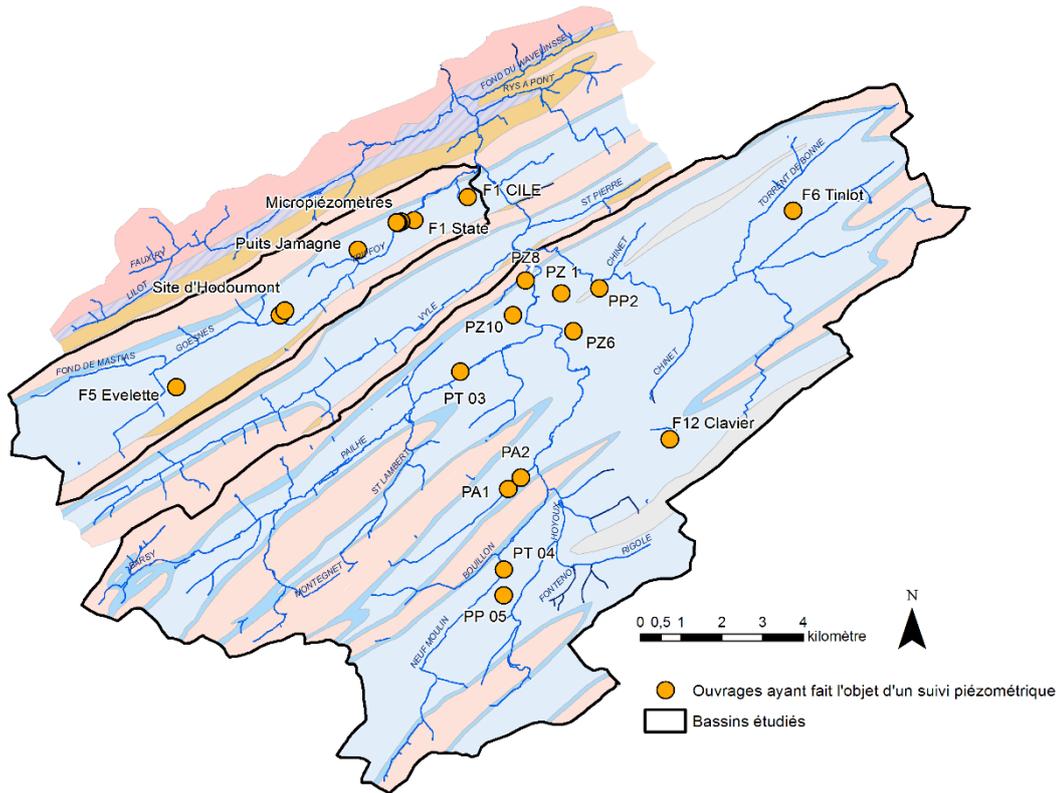


Figure 2 : Réseau de suivi piézométrique (propre à la convention ou en collaboration avec les compagnies d'eau, la légende des unités hydrogéologiques est reprise en annexe)

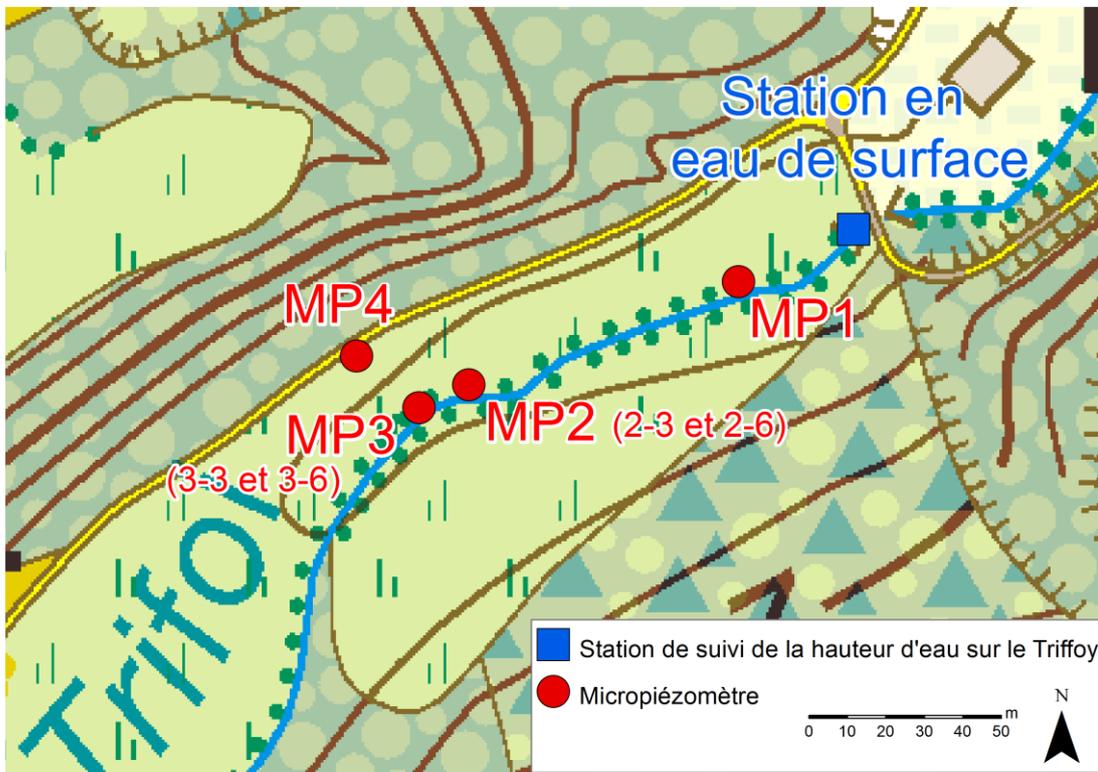


Figure 3 : Implantation des micropiézomètres (deux ouvrages de différentes profondeurs ont été forés sur les sites 2 et 3) et de la station de mesure de la hauteur d'eau sur le Triffoy (à proximité du hameau de Vaux)

### 2.1.3. Station météorologique

Une station météorologique de type WS-GP1 « *Compact all-in-one weather station* » (Delta-T Devices) a été installée dans le bassin du Triffoiy à Hodoumont en septembre 2013 (Figure 4). Cette station mesure de manière horaire la température de l'air, la pluviométrie, l'humidité relative de l'air, la radiation solaire, la direction et la vitesse du vent.

Ces données ont servi à calculer des valeurs représentatives à l'échelle locale (Hoyoux) de l'évapotranspiration potentielle et réelle, de la réserve d'eau facilement utilisable du sol ainsi que de l'eau utile (ruissellement + infiltration) ('D3.3 Bilans hydrogéologiques').

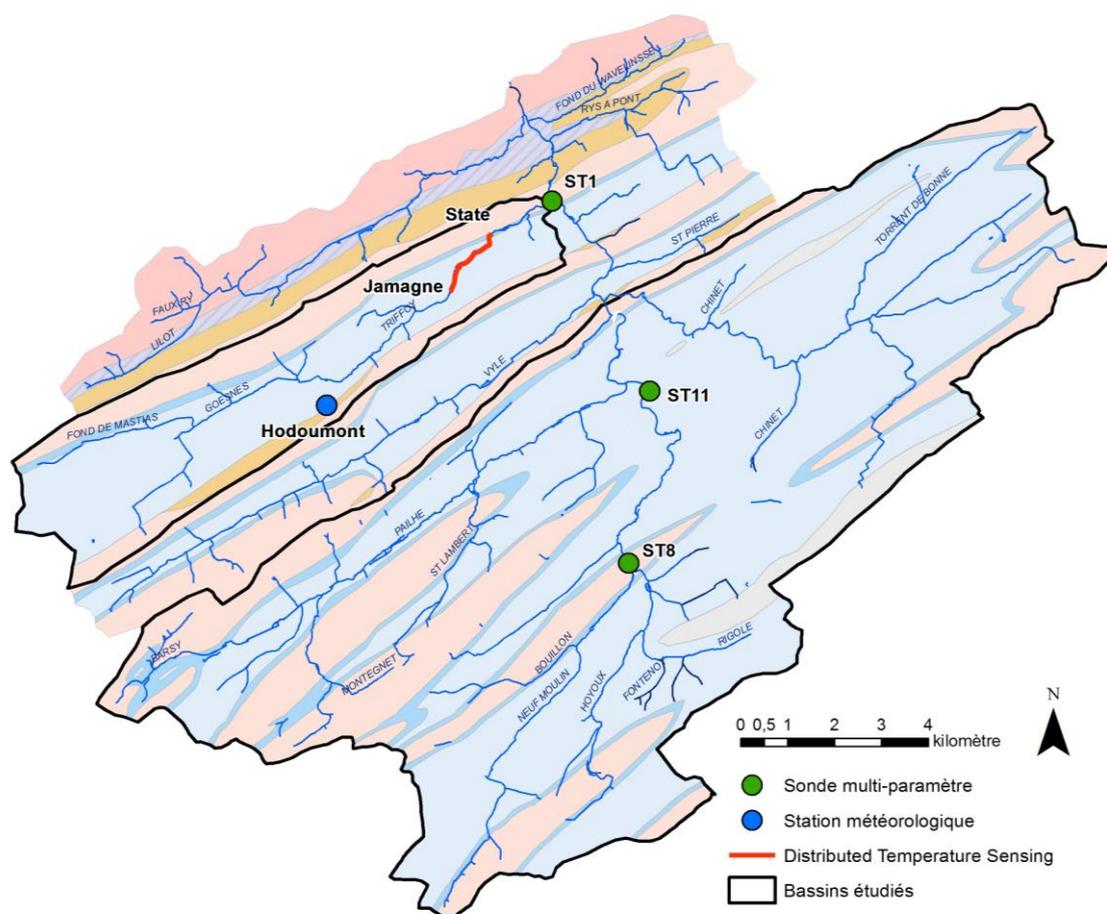


Figure 4 : Localisation de la station météorologique, des sondes multi-paramètres (incluant le capteur nitrate) et de la fibre optique mis en place dans le cadre de la convention (la légende des unités hydrogéologiques est reprise en annexe)

## 2.2. Suivi qualitatif des eaux de surface et des eaux souterraines

### 2.2.1. Monitoring des eaux de surface à l'aide de sondes multi-paramètres

Des sondes multi-paramètres (YSI 6920v2 et OTT Hydrolab DS5/MS5) ont également été déployées dans les 2 bassins étudiés en septembre 2013 et enregistrent à fréquence élevée (15 ou 20 minutes) la température de l'eau, la conductivité électrique, le pH, le potentiel d'oxydo-réduction, l'oxygène dissous et la concentration en azote nitrique (N-NO<sub>3</sub>).

Au total, trois sondes ont été déployées dans les bassins, une dans le Triffoiy et deux dans le Hoyoux (Tableau 2 et Figure 4).

Tableau 2 : Synthèse des informations de position et de période de mesures des sondes multi-paramètres

Bassin	Numéro de Station	Nom de station	Coordonnées Lambert (m)		Période de mesure
			X	Y	
Triffoiy	ST 1	Exutoire	213733	129179	09/2013 – 06/2015
Hoyoux Amont	ST 11	Petit-Modave	215128	126751	09/2013 – 06/2015
Hoyoux Amont	ST 8	Petit-Avin	215362	121397	09/2013 – 06/2015

### 2.2.2. Échantillonnages des eaux de surface et des eaux souterraines

En plus de la campagne hydrochimique régionale (faisant l'objet du livrable 'D3.2' qui lui est spécifiquement consacré) et de quelques échantillonnages ponctuels complémentaires, des échantillonnages réguliers ont été effectués au niveau de certains points en eau de surface et en eau souterraine afin de suivre la dynamique de l'hydrochimie en fonction des conditions météorologiques/hydrodynamiques/piézométriques (Tableau 3).

Au niveau des eaux souterraines, un échantillonnage régulier a été effectué sur le piézomètre P1 à Hodoumont. Cet ouvrage a principalement servi de puits de restitution pour les essais de traçage et, en dehors de ces essais, le matériel de pompage est resté en place afin de faciliter l'échantillonnage. En plus du prélèvement pour la campagne hydrochimique régionale de l'automne 2014, le suivi régulier (au minimum bimensuel) a débuté en janvier 2015. L'analyse des éléments majeurs a été effectuée de manière systématique sur l'ensemble des échantillons prélevés.

Dans les eaux de surface, afin de compléter les données enregistrées par la sonde multi-paramètres à l'exutoire du Triffoiy (ST1 - Figure 1), un échantillonneur automatique a été mis en place à la même station. Il prélève un volume d'eau suffisant pour réaliser l'analyse des éléments majeurs. En plus de caractériser l'hydrochimie de l'eau, les analyses ont également permis de calibrer/valider les mesures du capteur nitrate de la sonde multi-paramètres. L'échantillonneur à l'exutoire du Triffoiy a été placé en août 2014 avec un pas de temps d'échantillonnage de 12 heures. Tous les échantillons n'ont cependant pas analysés. Il est à noter qu'au vu de la méthodologie de prélèvement adoptée (échantillonneur automatique), les échantillons ont séjournés un certain temps en contact avec l'atmosphère et que des phénomènes de dégazage se sont produits. Ils sont donc potentiellement altérés du fait du contact avec l'atmosphère. Des prélèvements manuels ont régulièrement été effectués sur les autres stations où des sondes multi-paramètres ont été placées.

Tableau 3 : Synthèse des informations concernant les prélèvements manuels en vue du suivi des concentrations en nitrate

Bassin	Nom de station	Type	Méthode	Période	Fréquence	Nombre d'échantillons
Triffoiy	Hodoumont P1	Eau souterraine	Manuel	02/2015-01/2016	Bimensuelle	130
Triffoiy	Exutoire	Eau de surface	Automatique	07/2014-01/2016	Bihebdomadaire	250
Hoyoux Amont	Petit-Modave	Eau de surface	Manuel	09/2013-06/2015	Bihebdomadaire	180
Hoyoux Amont	Petit-Avin	Eau de surface	Manuel	09/2013-06/2015	Bihebdomadaire	200

### 2.2.3. Profils de température dans le Triffoiy par la méthode Distributed Temperature Sensing

En octobre 2013, une fibre optique de 1800m de long a été mise en place dans le Triffoiy (Figure 4) entre les cotes 6200m (Jamagne) et 8000m (State). Ces cotes font référence à la distance par rapport à la source du Triffoiy (0m). Elle a été déroulée dans le cours d'eau et lestée à l'aide de briques pour qu'elle demeure submergée. L'objectif était de mesurer la température de l'eau du Triffoiy suivant un profil en long, en vue de localiser des zones d'arrivée d'eau souterraine par contraste de température entre les eaux souterraines et les eaux de surface. Le choix du tronçon a été défini sur base de mesures du débit en différents points de la rivière en période de récession. Ce tronçon est en effet caractérisé par une forte augmentation amont-aval du débit correspondant à des apports d'eau souterraine. Des profils DTS ont été effectués de manière régulière afin de mettre en évidence les variations de température du cours d'eau sous différentes conditions climatiques. Un listing des dates de réalisation des mesures est disponible en annexe.

### 3. Principales investigations menées lors de l'étude

Afin d'avoir une vue d'ensemble des méthodes utilisées pour caractériser les interactions nappe-rivière, une synthèse des différentes investigations effectuées est présentée au Tableau 4. Une analyse de la pertinence, de la complémentarité et de la valeur ajoutée de ces différentes investigations dans le contexte d'une étude des interactions nappe-rivière sera effectuée à la fin du livrable.

Tableau 4 : Synthèse des investigations réalisées dans le cadre de la convention (T : Triffoy – HA : Hoyoux Amont)

Type d'investigation	Bassin(s) concerné(s)	Description de l'investigation	Résultats exploitant cette investigation	Chapitre apparenté	Echelle	
					Spatiale	Temporelle
Jaugeages	T/HA	Mesures du débit du cours d'eau	Mise en évidence des échanges ESO-ESU/ Hydrogrammes/ Quantification des échanges	4.1 / 4.2 / 4.3	Profil en long /Global /Local	Ponctuel/ Monitoring
Profils physico-chimiques	T	Mesures de la physico-chimie de l'eau le long du cours d'eau	Mise en évidence des échanges	4.1	Profil en long	Ponctuel/ Monitoring
Profils et suivi hydrochimique	T/HA	Echantillonnage et analyses chimiques	Mise en évidence des échanges / Caractérisation nitrate	4.1 / 5	Global	Régulier
Suivi piézométrique	T/HA	Mesure du niveau de la nappe	Relation débit / piézométrie	4.2	Global	Monitoring
Distributed Temperature Sensing	T	Mesure de température le long du cours d'eau	Mise en évidence et spatialisation des échanges	4.1	Profil en long	Ponctuel
Suivi de température	T	Mesure en continu de la température aux stations de jaugeage	Mise en évidence des échanges	4.1	Global	Monitoring
Suivi de la conductivité électrique	T/HA	Mesure en continu de la conductivité électrique	Mise en évidence des échanges / Séparation d'hydrogramme (Délivrable 4.1)	4.1	Global	Monitoring
Slug tests	T	Mesure de la conductivité hydraulique	Quantification des échanges	4.3	Local	Ponctuel
FVPDM	T	Mesure de flux	Quantification des échanges	4.3	Local	Ponctuel

## 4. Résultats et interprétations des investigations

### 4.1. Mise en évidence des échanges nappe-rivière

#### 4.1.1. Réalisation de profils en long sur le Triffoy

A plusieurs reprises, des profils en long ont été réalisés sur le Triffoy. Ces mesures ont consisté à se déplacer, au cours d'une même journée, d'amont en aval le long du cours, et d'effectuer à différentes stations (Figure 5) une série de mesures simultanées, à savoir :

- Un jaugeage pour connaître le débit instantané du cours d'eau ;
- Une mesure des paramètres physico-chimiques (température, conductivité électrique, pH, oxygène dissous) ;
- Un prélèvement d'eau dans le cours d'eau pour l'analyse des éléments majeurs.

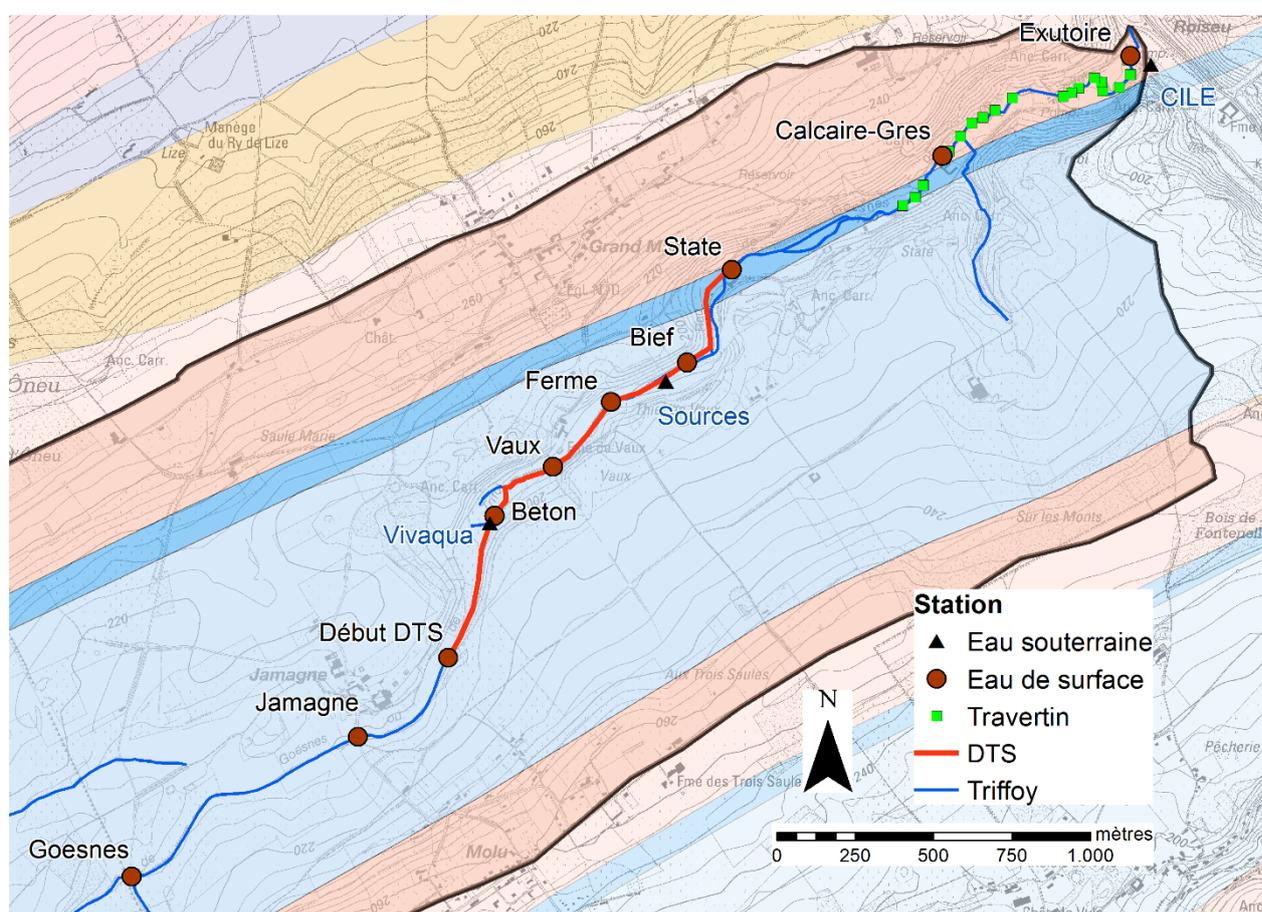


Figure 5 : Localisation des stations de jaugeage ponctuel, de mesure physico-chimique et de prélèvement d'eau lors des différentes campagnes de profils en long réalisés sur le Triffoy, les cascades de travertin sont également représentées (la légende des unités hydrogéologiques est reprise en annexe)

L'objectif de ces campagnes était de mettre en évidence, par une série d'indicateurs, les arrivées d'eau souterraine et leur importance sur la débitmétrerie et la qualité physico-chimique du cours d'eau.

De manière systématique, ces campagnes de mesures ont été réalisées en dehors de périodes de pluies pour s'affranchir du ruissellement éventuel. De cette manière, toute variation observée (augmentation du débit, changement de la physico-chimie) peut être attribuée à des nouvelles arrivées d'eau souterraine se mélangeant à l'eau de surface venant de l'amont (qui est elle-même constituée d'eau souterraine ayant déjà alimenté le cours d'eau).

### **Description physique amont-aval du profil investigué**

Au niveau des 3 premières stations de mesure ('Goesnes', 'Jamagne' et 'Début DTS') peu d'eau est en général présent et le fond de rivière est majoritairement vaseux. La décharge du captage de Jamagne de Vivaqua apporte de l'eau à la rivière de manière continue (~25-30L/s) entre la station 'Début DTS' et 'Béton'. Le tronçon entre la station 'Début DTS' et la décharge du captage est aménagé afin d'empêcher la contamination des eaux du captage par l'infiltration éventuelle de l'eau de surface. La station à Vaux peut être décrite comme une zone de transition où l'amont présente un fond vaseux, des écoulements lents avec une hauteur d'eau importante tandis que l'aval présente un fond de rivière de type caillouteux et des écoulements beaucoup plus rapides (avec une diminution de la hauteur d'eau). Ce fonctionnement est similaire pour les stations de 'Ferme' et de 'Bief'. Des sources sont présentes dans les berges en rive droite du cours d'eau quelques dizaines de mètres avant la station 'Bief'. A cette station, un aménagement dans la rivière dévie une partie du cours d'eau pour alimenter une roue à aube tandis que l'autre partie suit son cours. Cette déviation retourne au cours d'eau à hauteur de la station de 'State' où les mesures sont effectuées à l'aval de cette confluence. Cette station présente à nouveau un fond de rivière de type vaseux mais avec un écoulement qui semble plus important que l'ensemble des stations précédentes. La station 'Calcaire-grès' est située quelques dizaines de mètres après que le cours d'eau ait quitté les formations calcaires. Le fond de rivière est majoritairement caillouteux et l'écoulement de l'eau est assez rapide. Les premières cascades de travertins apparaissent quelques dizaines de mètres avant cette station. Une série de cascades de travertins agrémentent également le tronçon 'Calcaire-grès – Exutoire', la station 'Exutoire' étant d'ailleurs située après une série de cascades. Le cours d'eau est le plus large à cet endroit et le fond de rivière est à nouveau uniquement caillouteux.

Par souci de lisibilité et vu la similarité des résultats des différentes campagnes, seuls les résultats de la campagne du 2 avril 2014 (Figure 6) sont présentés. Les résultats analysés de 2 autres profils sont présentés en Annexe 4 tandis que l'ensemble des résultats de débit des campagnes réalisées est présentée à l'Annexe 5. Des prélèvements en eau souterraine ont également été effectués lors de cette campagne du 2 avril 2014 et permettent d'obtenir des valeurs typiques des eaux souterraines (hydrochimie, physico-chimie et température) pour les comparer aux valeurs des eaux de surface.

Lors de cette campagne de mesure, la température atmosphérique a varié entre 7°C en matinée (9h) et 20°C en soirée (18h). La température du cours d'eau a suivi cette tendance (9.5°C en matinée et 11.7° en fin de journée). Les mesures réalisées lors du profil en long étant répartie sur une journée de mesure, les résultats issus des profils de température sont donc également influencés par cette variation journalière de température.

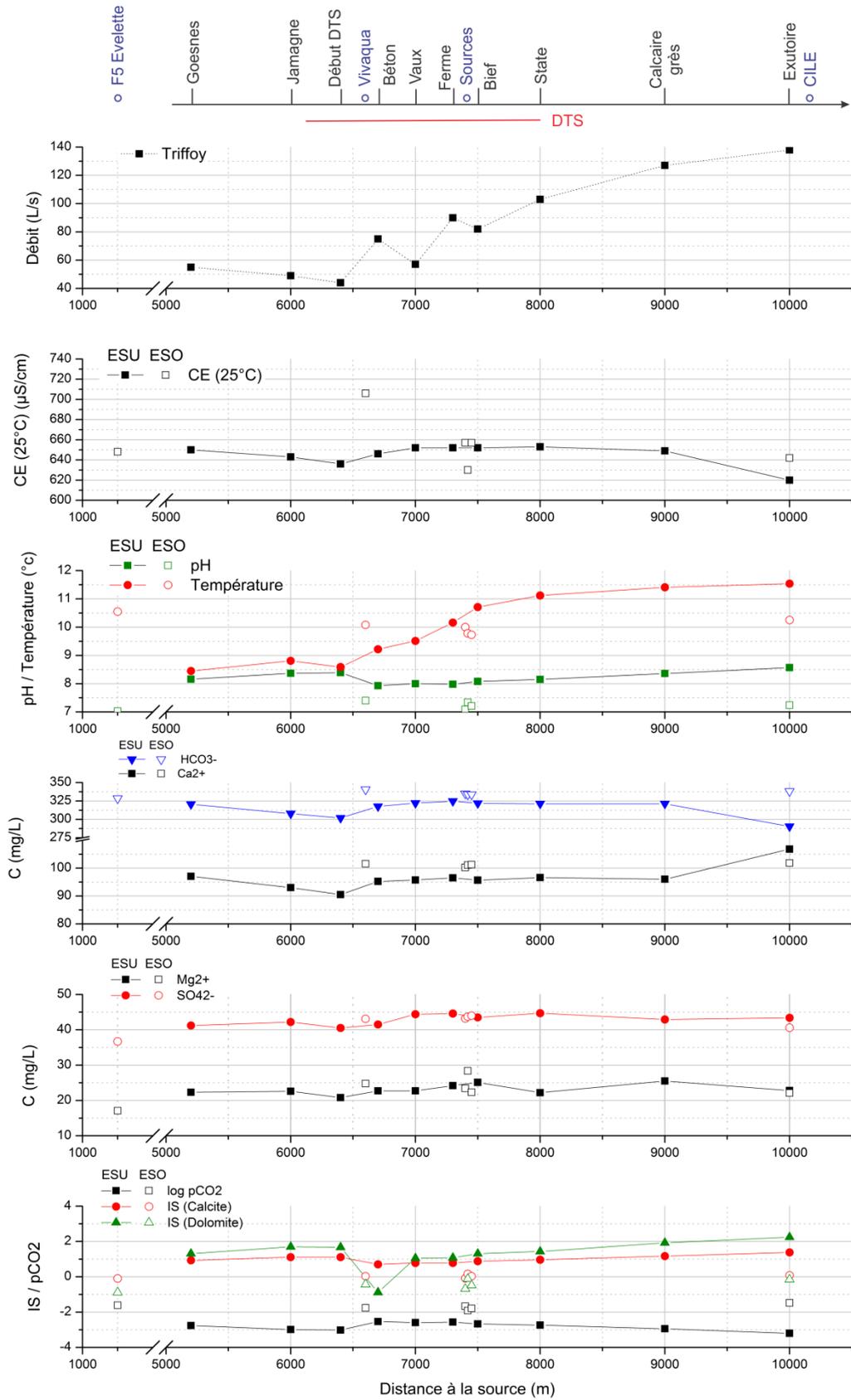


Figure 6 : Résultats de débitmètrie, de physicochimie (in-situ, CE : conductivité électrique corrigée à 25°C) et d'hydrochimie (C : concentration mg/L, IS : indice de saturation) en eau souterraine et en eau de surface du profil en long réalisé le 2 avril 2014 ; le nom des stations de mesure se trouve sur l'axe présenté en haut du graphe (avec un point flottant pour les eaux souterraines et un trait lié à l'axe pour les eaux de surface)

## **Evolution du débit**

La partie en amont de la station 'Début DTS' présente un débit faible et même une légère diminution apparente de débit d'amont vers l'aval. Ce tronçon est donc à priori perdant. Les stations de 'Jamagne' et de 'Goesnes' étaient d'ailleurs asséchées à la fin des étés 2012 et 2013. Aucune perte nette n'a été visualisée sur le tracé du cours d'eau, ce qui laisse penser à des infiltrations diffuses au niveau du lit de la rivière. Une stabilisation ou une légère augmentation de débit entre ces stations a également été mesurée lors d'autres campagnes de mesure.

En aval de la station 'Début DTS', le débit présente une forte augmentation généralisée le long du cours d'eau jusque la station 'State'. La décharge du captage de Jamagne (Vivaqua) apporte évidemment de l'eau vers la rivière et explique en partie l'augmentation du débit. Cependant, cette décharge n'explique pas à elle seule les apports d'eau vers la rivière car une augmentation importante du débit est encore mesurée après cette station. Deux tronçons ('Béton-Vaux' et 'Ferme-Bief') présentent une diminution du débit. Toutefois, une incertitude inhérente à la méthode de jaugeage existe. De plus, le fond de la rivière étant caillouteux sur ces tronçons, l'écoulement est moins laminaire que sur les autres stations ce qui a des conséquences sur l'exactitude des mesures de vitesse d'écoulement. Le débit augmente ensuite de manière régulière jusqu'à l'exutoire.

## **Evolution de la physico chimie**

Au niveau de la physico-chimie de l'eau de surface, la conductivité électrique et le pH de l'eau sont relativement constantes le long du Triffoy. La conductivité électrique varie aux alentours de 650  $\mu\text{S}/\text{cm}$  tandis que les valeurs de pH varient entre 8,1 et 8,4. Les points en eau souterraine présentent des valeurs de conductivité électrique relativement similaires à celle du cours d'eau à l'exception de la décharge de Vivaqua (740  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Les valeurs de pH sont cependant plus basses et varient entre 7 et 7,2.

Une variation de ces paramètres est mesurée sur le cours d'eau entre les cotes 5200 et 6400 m où la conductivité électrique diminue légèrement tandis que le pH augmente. Le débit diminue également sur ce tronçon. Le comportement inverse est enregistré entre les cotes 6400 et 7000 m. La conductivité électrique augmente tandis que le pH diminue (et reste à ces valeurs jusque 7400 m). Le débit augmente nettement sur ce secteur.

La température de l'eau souterraine varie entre 9,5 et 10,5°C. Le profil en eau de surface montre une augmentation de température passant de 8,5°C à 11,5°C (pour les raisons déjà évoquées d'augmentation de la température de l'air en cours de journée)

## **Evolution de la chimie**

Les concentrations chimiques des éléments analysés (calcium, magnésium, bicarbonates et sulfates) sont relativement constantes le long du cours d'eau. La même particularité que la physico-chimie est observée, à savoir une diminution des concentrations entre les cotes 5200 et 6400 m suivi d'une

augmentation entre les cotes 6400 et 7000m. Les concentrations se stabilisent ensuite jusque l'exutoire où les concentrations en calcium et bicarbonates diminuent de manière générale. Cette diminution de concentration est probablement en lien avec la précipitation de carbonates pour la formation des cascades de travertin.

### **Evolution des indices de saturation et de la pression en CO<sub>2</sub>**

L'indice de saturation correspond au rapport entre le produit des activités ioniques des éléments constituant un minéral (PAI) et la constante de solubilité de ce même minéral (Ksp).

L'indice de saturation s'exprime comme suit :

$$SI = -\log \frac{PAI}{K_{sp}} \quad [1]$$

Trois cas de figure sont donc possibles. Si l'indice de saturation est proche de 0, le minéral est a priori présent et contrôle la concentration dans l'eau d'un de ses éléments constitutifs. Si l'indice de saturation est inférieur à 0, le minéral est en sous-saturation et a priori, le minéral est absent ou en cours de dissolution. Si l'indice de saturation est supérieur à 0, le minéral est en sursaturation et une précipitation du minéral est possible.

La pression en CO<sub>2</sub> dans l'air représente 0.03% de la pression atmosphérique (pression partielle de 10<sup>-3.52</sup> atm). L'eau de pluie dissout du CO<sub>2</sub> en s'équilibrant avec cette atmosphère. Cette eau s'enrichit également en CO<sub>2</sub> dans le sol suite à la dégradation de la matière organique. :



Ceci produit un enrichissement du CO<sub>2</sub> dans l'eau d'infiltration et l'eau souterraine d'un facteur 10 à 100 par rapport à l'eau de pluie, donnant une eau qui a une teneur en CO<sub>2</sub> équivalent à un équilibre avec une pression partielle de CO<sub>2</sub> de 10<sup>-2.5</sup> à 10<sup>-1.5</sup> atm.

Cette eau d'infiltration est donc fort agressive au vue de la quantité de CO<sub>2</sub> dissous. Cette eau va provoquer la dissolution de minéraux carbonatés tels quel la calcite et la dolomite, provoquant une augmentation des concentrations en calcium et en magnésium dans l'eau et une neutralisation du pH (entre 7 et 7,5).

Quand l'eau souterraine revient à la surface, elle présente une sursaturation en CO<sub>2</sub> par rapport à l'atmosphère et un dégazage de ce CO<sub>2</sub> a lieu. Ce dégazage a pour conséquence d'augmenter le pH de l'eau (8 à 8,4) vu qu'il y a moins de CO<sub>2</sub>. L'autre conséquence est de modifier l'équilibre des carbonates et de sursaturer l'eau par rapport aux minéraux carbonatés de la calcite et de la dolomite (IS calcite et IS dolomite ≥ 0).

Les indices de saturation présente un équilibre pour les eaux souterraines tant au niveau de la calcite (SI = 0) que pour la dolomite (SI = -0.5). Du point de vue des eaux de surface, une sursaturation est présente tout au long du cours d'eau (IS calcite = 1 et IS dolomite = 1,4). Seul le tronçon entre les cotes 6400 et 6700 m présentent une diminution de ces indices (plus marquée pour la dolomite).

La pression équivalente en CO<sub>2</sub> présente un comportement inversé. Cette pression augmente et passe de 10<sup>-3</sup> atm à 10<sup>-2.5</sup> atm sur ce tronçon entre 6400 et 6700 m et reste à ces valeurs jusque 7500 m. Elle diminue ensuite pour tendre vers 10<sup>-3</sup> atm à l'exutoire.

### **Evolution du rapport calcium-magnésium dans les eaux de surface**

Le rapport calcium/magnésium donne des informations quant au temps de résidence des eaux dans le milieu souterrain. En effet, les minéraux calciques présentent une cinétique de dissolution plus rapide que les minéraux magnésiens. Une circulation rapide dans le milieu souterrain a pour conséquence de se mettre plus rapidement en équilibre par rapport aux minéraux calciques que par rapport aux minéraux magnésiens. Le rapport Ca/Mg sera donc plus important dans ce cas de figure. A l'inverse, une circulation plus lente laissera le temps à l'eau de dissoudre les minéraux magnésiens et le rapport Ca/Mg sera plus faible.

Le rapport Ca/Mg du profil en long (Figure 7) présente des valeurs variant entre 3,7 et 4,7 au niveau des eaux de surface et des valeurs variant entre 6,5 et 3,6 pour les eaux souterraines. Ce rapport de 6,5 dans les eaux souterraines est observé au niveau du piézomètre F5 Evelette.

De manière générale, une légère tendance à la baisse du rapport Ca/Mg est observée d'amont en aval entre les stations de 'Goesnes' et 'Calcaire-grès' (cette tendance est indiquée par le trait en pointillé bleu). Cette tendance à la baisse montre que le temps de résidence de l'eau dans le milieu souterrain est globalement plus long en aval du bassin (vers l'exutoire) qu'en tête de bassin. Cette tendance est confirmée par la diminution amont-aval du rapport Ca/Mg au niveau des eaux souterraines. Le piézomètre Evelette, situé en tête de bassin, présente le rapport Ca/Mg le plus élevé. Le rapport Ca/Mg augmente ensuite au niveau de l'exutoire.

Il est à noter que la rivière s'écoule sur des formations gréseuses à partir de la station 'Calcaire-grès' et que des cascades de travertins, modifiant l'hydrochimie, sont présentes au niveau de ce tronçon.

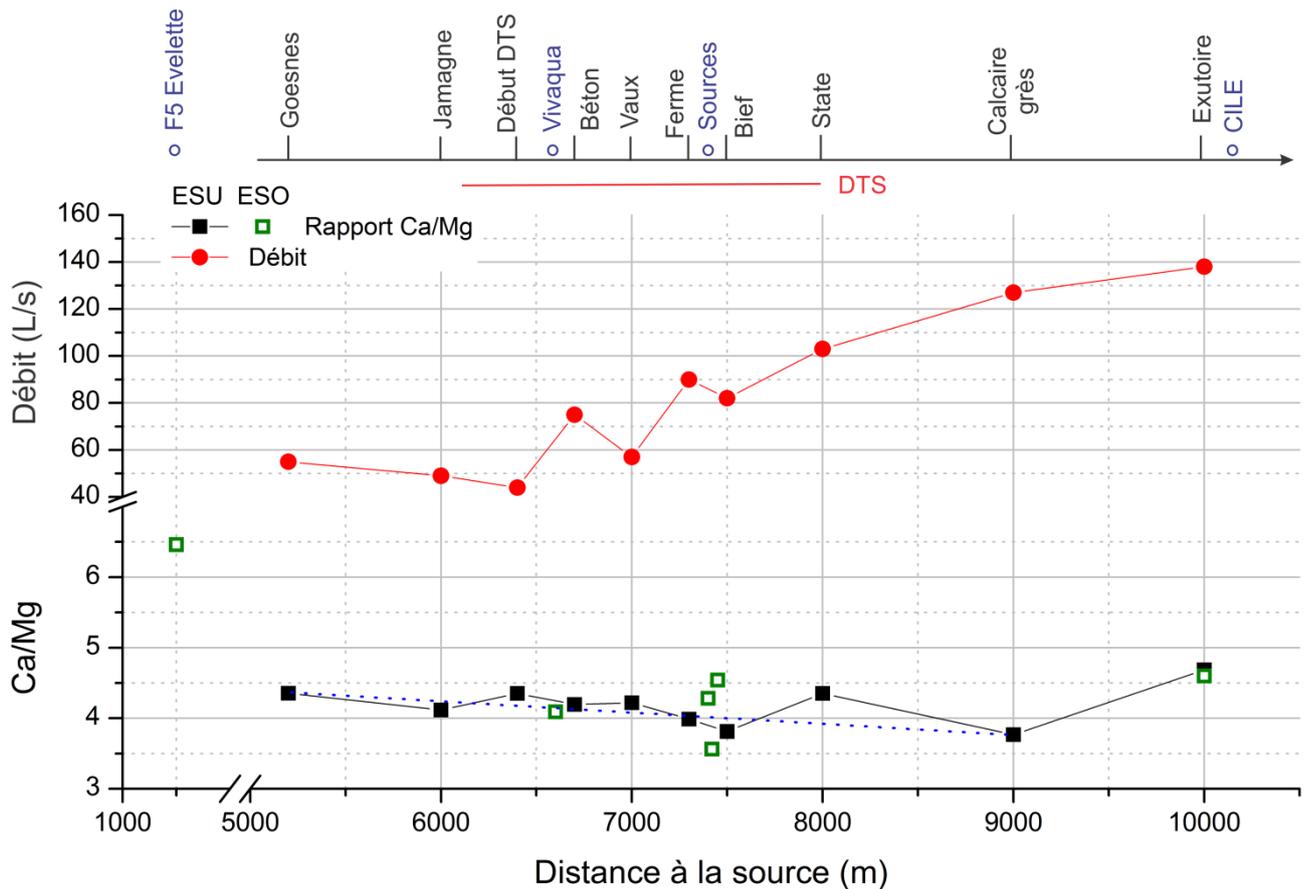


Figure 7 : Evolution en long du débit du cours d'eau et du rapport Ca/Mg pour les eaux souterraines et pour les eaux de surface souterraines ; le nom des stations de mesure se trouve sur l'axe présenté en haut du graphe (avec un point flottant pour les eaux souterraines et un trait lié à l'axe pour les eaux de surface)

L'ensemble de ces données montrent clairement que la rivière est bien alimentée par des eaux souterraines ayant une signature nette des roches calcaires. Le tronçon entre 'Goesnes' et 'Début DTS' présente une diminution ou une stabilisation du débit. La partie en aval de cette station présente une augmentation continue de débit, la rivière est donc drainante. La majorité des apports d'eau s'effectue sur le tronçon entre 'Jamagne' et 'State' avec des composantes plutôt diffuses mais également ponctuelles.

#### 4.1.2. *Distributed Temperature Sensing*

Les profils en long ont permis de mettre clairement en évidence les interactions nappe-rivière le long du Triffoiy et en particulier le caractère drainant du tronçon situé entre Jamagne et State. Afin de déterminer plus précisément le caractère ponctuel ou diffus du drainage des eaux souterraines par le cours d'eau et, le cas échéant, de localiser des venues d'eau plus localisées ainsi que suivre la dynamique des échanges, un système de Distributed Temperature Sensing (DTS) a été placé dans la rivière sur ce secteur (Figure 8). Le début du DTS correspond à la cote 6200m (par rapport à la distance à la source) tandis que la fin du système se situe à 8000m (par rapport à la distance à la source).

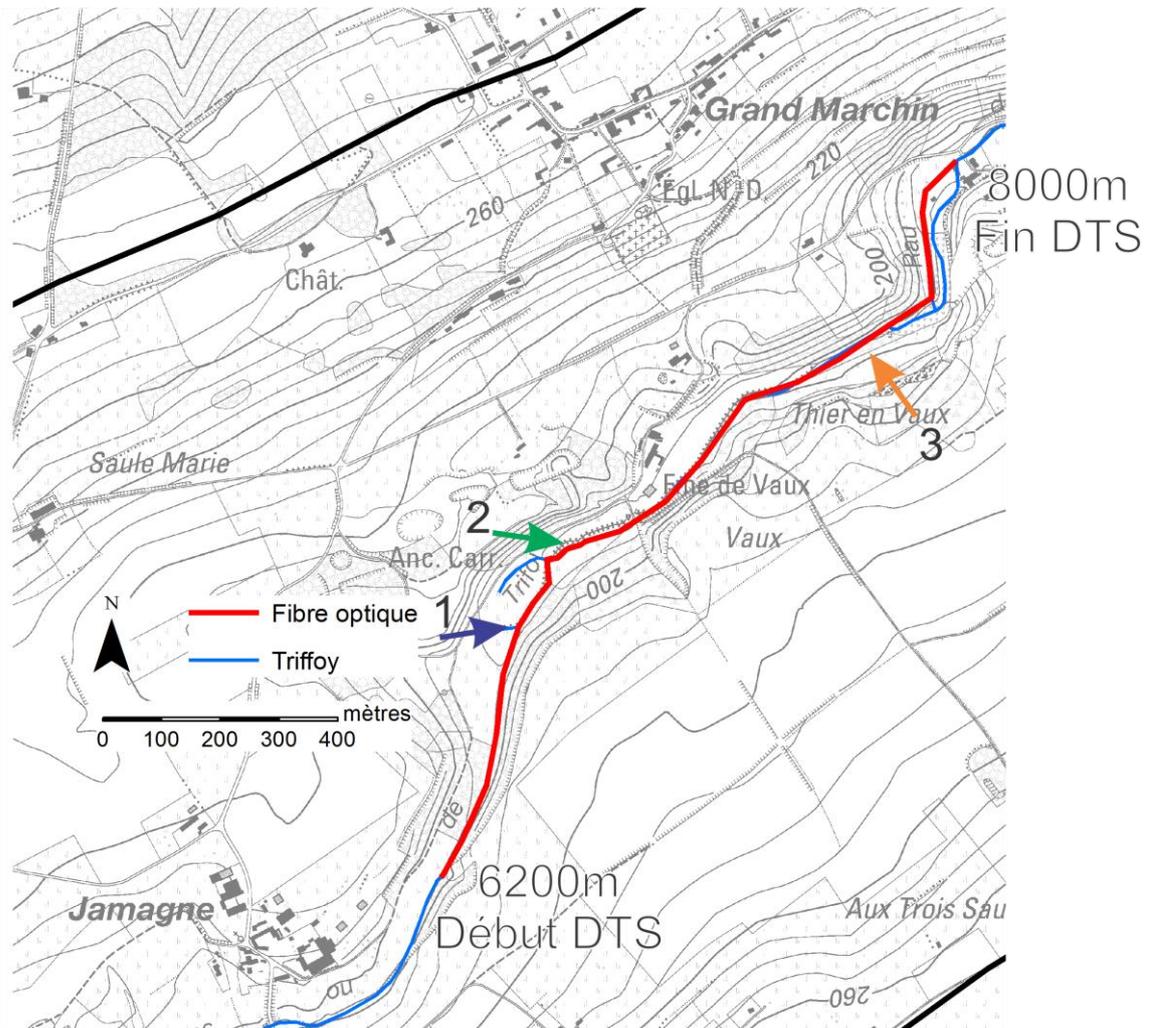


Figure 8 : Localisation du système DTS le long du Triffoy entre Jamagne (cote de début de la fibre : 6200m) et State (cote de fin de la fibre : 8000m), les flèches correspondent à la localisation des arrivées d'eau ponctuelles

La localisation des arrivées d'eau souterraine est déterminée suite aux changements de température observés le long du profil DTS. Ces variations de température reflètent le mélange d'eaux (de surface et souterraine) caractérisées par des températures différentes. En effet, la température de l'eau de surface est fortement influencée par la température atmosphérique (allant de  $\pm 2^\circ\text{C}$  en hiver à  $\pm 20^\circ\text{C}$  en été), alors que la température des eaux souterraines est très constante (autour de  $10^\circ\text{C}$ ).

Des campagnes de mesures ont été réalisées à différentes périodes de l'année afin de suivre le profil de température sous différentes conditions climatiques. Les résultats sont évidemment plus marqués lorsqu'un contraste de température important existe entre les eaux de surface et les eaux souterraines, typiquement en été et en hiver.

Le principe de fonctionnement de la méthode se base sur un système optoélectronique (laser) qui permet d'effectuer des mesures de températures spatialisées le long de la fibre (Selker *et al.*, 2006). L'interaction entre le laser et la fibre provoque la réémission d'un rayon lumineux dont les propriétés (longueur d'onde et intensité) dépendent notamment de la température. Un traitement du signal permet ainsi de calculer la température. La spatialisation de la mesure est calculée selon le temps mesuré entre l'émission et le retour du rayon lumineux (selon la relation distance = vitesse  $\times$  temps).

En fonction de la calibration utilisée, une résolution de l'ordre de 0.1°C en température et de 1m en spatialisation peut être atteinte.

Deux profils de température sont présentés par souci de clarté (Figure 9). Les résultats des autres campagnes réalisées, qui montrent des résultats similaires, sont fournis en annexe (Annexe 6).

Les profils de température présentent des comportements distincts qui peuvent être divisés en 2 groupes. La partie 'amont' (de la cote 6200 à 6700m) présente des températures stables tout au long du profil. Par contre, la partie 'aval' (de 6700 à 8000m) présente des variations de température beaucoup plus marquées.

La partie 'amont' correspond majoritairement à la portion du cours d'eau qui est bétonnée (jusque 6700m). Ces travaux ont été réalisés afin d'empêcher l'infiltration des eaux de surface vers le milieu souterrain, ce qui pourrait conduire à une contamination des eaux du captage situé à proximité du cours d'eau. A l'inverse, bien que l'idée soit d'empêcher l'infiltration de l'eau de surface, aucune arrivée d'eau souterraine dans la rivière n'est possible sur ce secteur. Les températures mesurées en amont de cette zone sont donc stables.

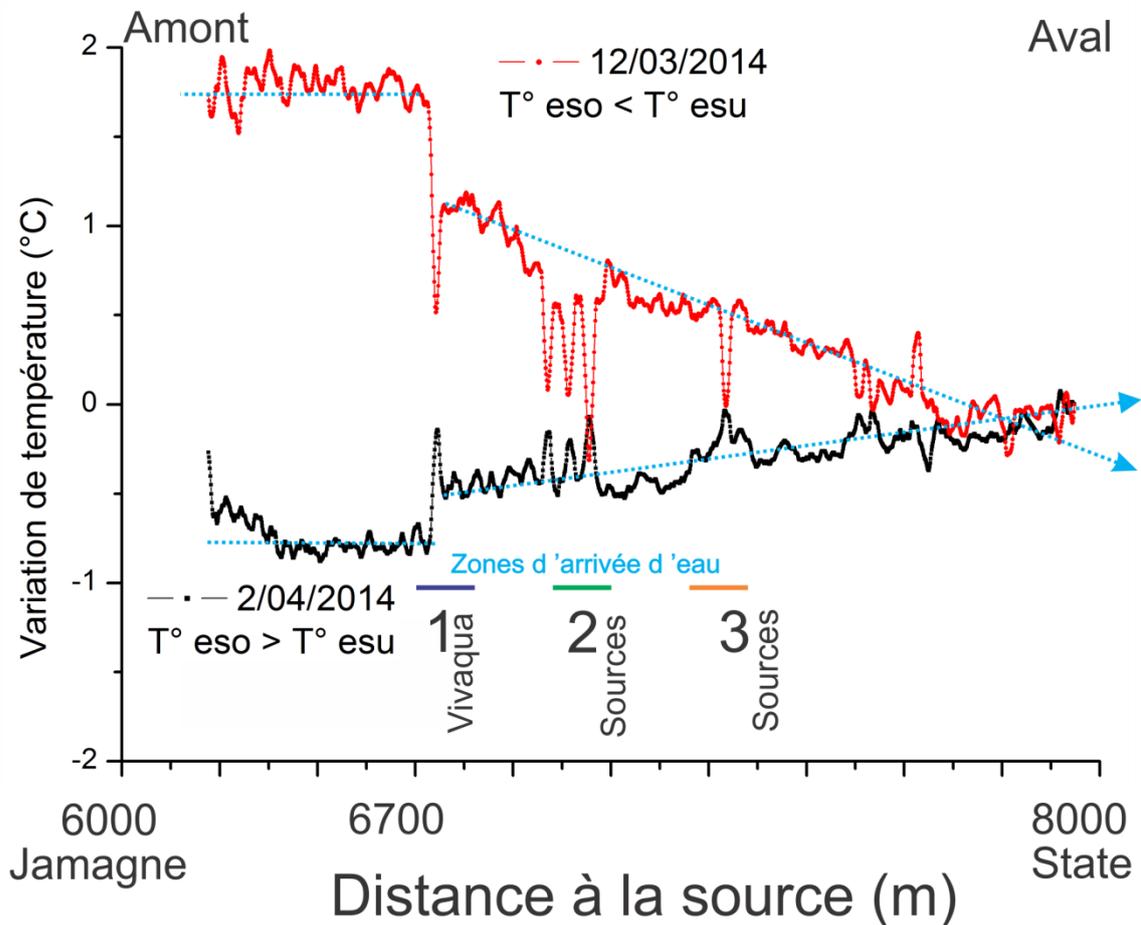
Sur le secteur 'aval', la température du Triffooy présente une dérive relativement linéaire, avec un refroidissement progressif de l'eau en été (quand l'eau souterraine est plus froide que la température ambiante de l'air) et un réchauffement en hiver (quand l'eau souterraine est plus chaude que la température ambiante de l'air).

A côté de cette variation régulière, on observe trois zones de variations nettes de température identifiées par des traits et des flèches de couleur et numérotés sur la Figure 9. La première anomalie de température correspond à la décharge du captage de Vivaqua. La deuxième anomalie a permis de détecter (par visite sur site) une zone de sources dans la rivière. La troisième anomalie correspond à des zones de sources au niveau des berges. Dans les trois cas, les variations de température correspondent à des apports ponctuels d'eau souterraine dans la rivière, avec une amplitude de variation de température qui dépend vraisemblablement de l'importance de l'arrivée d'eau souterraine.

On observe également que le gradient de température entre le Triffooy et l'eau souterraine s'inverse entre les deux campagnes de mesure présentées. Cette inversion de gradient implique donc une inversion de la variation de température du mélange d'eau (et donc des profils de température). Cette inversion est clairement marquée par la symétrie entre les 2 profils, ce qui confirme l'ensemble des interprétations effectuées (un coefficient de corrélation de -0.93 existe entre les 2 séries de mesures).

Les données collectées à l'aide de la méthode DTS permettent donc d'une part de confirmer les arrivées d'eau souterraine détectées par les profils en long, mais également d'affiner le type d'arrivées d'eau. Ainsi des zones d'arrivées nettes d'eau sont mises en évidence (anomalies locales de températures à certains endroits du cours d'eau) en plus de tronçons d'apports diffus (variation linéaire et progressive de la température le long du cours d'eau). De manière plus générale, ces

résultats confirment que le cours d'eau est bien alimenté par les eaux souterraines aux différents moments de l'année. Ils montrent en outre que ces apports d'eau souterraines sont à la fois diffus et progressifs le long du cours d'eau (sans doute en partie via le drainage des eaux par la nappe alluviale du Triffoy) mais également ponctuels, venues plus localisées via des zones d'écoulements préférentiels localisés au droit de fractures ou de drains dans les formations calcaires.



#### 4.2. Dynamique temporelle des échanges nappe-rivière

Les profils en long et autres mesures de type DTS permettent de mettre en évidence les interactions nappe-rivière et en particulier les apports en eau souterraine dans les cours d'eau. Elles montrent également que la signature des eaux de surface est fortement influencée par l'eau souterraine. Cependant, ces mesures ont un caractère relativement ponctuel dans le temps et elles ont en général été menées hors période de ruissellement.

Il est donc important de vérifier dans quelle mesure la dynamique temporelle des interactions est importante et en particulier si, lors d'événements pluvieux, le débit et la chimie des cours d'eau

varient substantiellement. A cette fin, un monitoring temporel plus détaillé a été mené à la fois sur les cours d'eau et sur les eaux souterraines en vue de mettre en évidence cette dynamique.

Les 9 stations de jaugeage qui ont été mises en place (cf. §2.1.1 et Figure 1) ont avant tout été utilisées en vue de calculer des bilans en eau sur les sous-bassins versants qui leur correspondent. La procédure d'acquisition et de traitement de ces données (méthodologie, courbe de tarage, ...) est décrite dans le livrable '*D3.3 Bilans hydrogéologiques*', ainsi que les calculs bilantaires qui en ont découlés.

Les résultats de ces investigations font l'objet de ce chapitre. Une approche plus quantitative est proposée au chapitre 4.4.

#### *4.2.1. Débitmétrie au cours du temps aux stations de jaugeage sur le Triffoy*

Au niveau du Triffoy, les différentes stations sont installées d'amont en aval le long du cours d'eau. Un suivi temporel et spatial du débit est ainsi possible.

L'hydrogramme présente (Figure 10), de manière générale, la même allure entre les stations. Les pics de crues et les périodes d'étiage sont synchrones. En période de récession, les écarts de débits entre stations sont relativement constants montrant que les échanges nappe-rivière sont relativement constants au cours du temps. Les débits de l'hiver 2014/2015 sont plus importants que ceux de l'hiver 2013/2014 dus aux précipitations plus importantes durant cet hiver par rapport au précédent.

La station 4 (Jamagne), située la plus en amont présente le débit le plus faible, quasi nul lors de certaines périodes (octobre 2013, été 2014). En dehors des périodes de crues, le secteur entre Jamagne et State présente une forte augmentation du débit (accroissement de l'ordre de 90L/s), traduisant des apports d'eau souterraine vers la rivière. A partir de State, le débit reste relativement constant entre les stations. Les erreurs inhérentes aux mesures (mesure de débit, courbe de tarage ...) expliquent le dépassement du débit de la station 3 par rapport aux stations 1 et 2. De plus, suite à des problèmes instrumentaux, les données pour la station de State (station 3) ne sont validées qu'à partir de septembre 2014.

L'écart observé entre les stations de State (ST 3) et Calcaire-grès/Exutoire (ST 2 et ST 1) à la fin de la chronique (à partir de mars 2015) s'explique par la mise en décharge complète entre ces stations des eaux prélevées au niveau du captage de Jamagne (de l'ordre de 70L/s). Il s'agit donc d'un apport non naturel d'eau après la station 3.

La dynamique des échanges nappe-rivière dans le Triffoy est donc relativement stable au cours du temps et les variations sont essentiellement fonction des événements météorologiques. Les crues sont dissipées en quelques jours et un retour rapide à une alimentation par les eaux souterraines s'effectue rapidement.

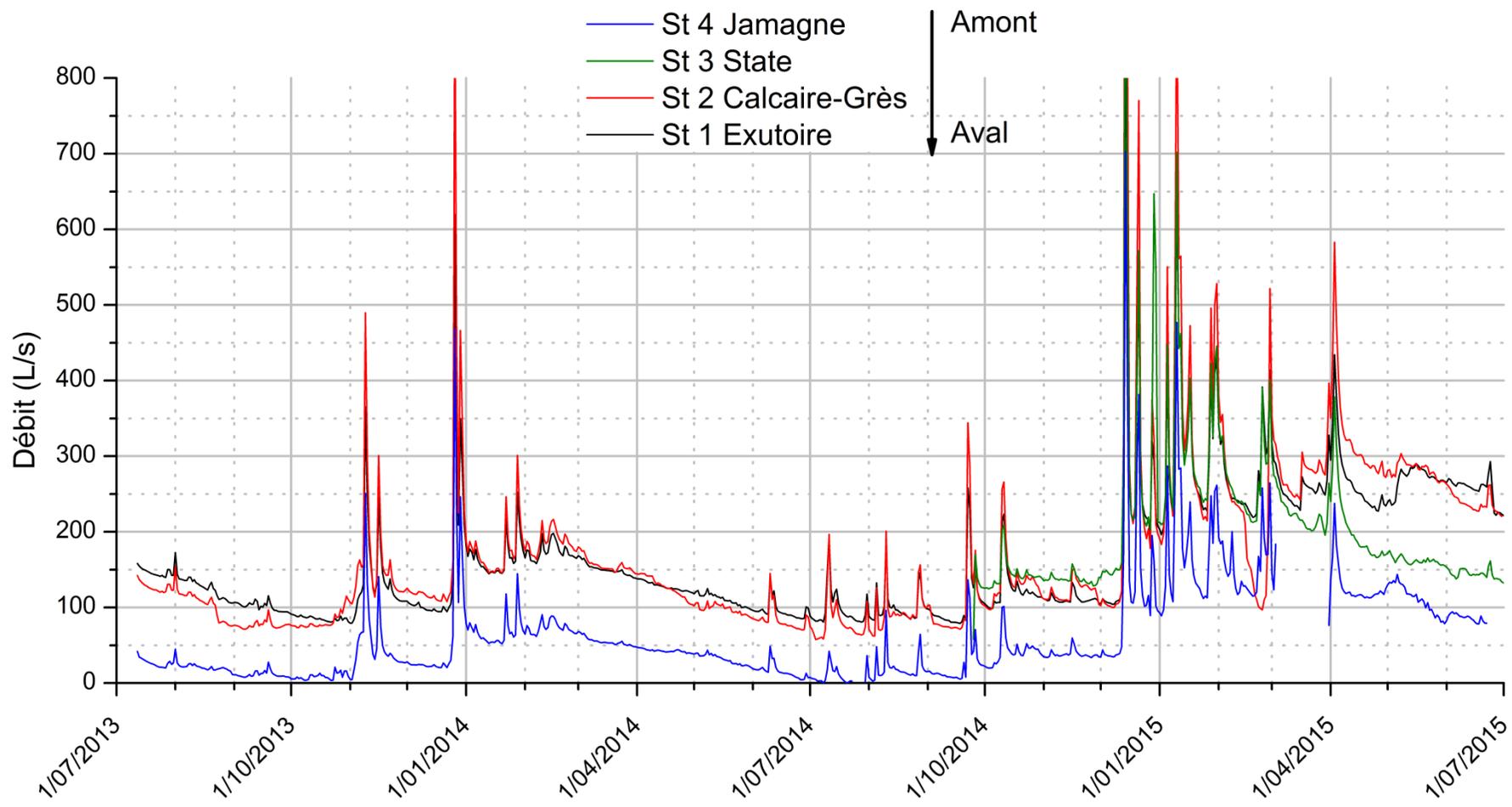


Figure 10 : Hydrogramme des différentes stations de jaugeage du Triffoy (les données de la station de State ne sont disponibles qu'à partir d'octobre 2014)

#### 4.2.2. Débitmétrie au cours du temps aux stations de jaugeage sur le Hoyoux Amont

Sur le Hoyoux Amont, les stations 5 (Hoyoux Amont exutoire) et 8 (Petit-Avin) sont disposées en long sur le cours d'eau principal (Figure 11). Les 2 autres stations sont situées sur des affluents, à savoir le Torrent de Bonne (station 6) et le ruisseau de Pailhe (station 7).

Comme pour le Triffoiy, les débits pour l'hiver 2014/2015 sont plus importants que pour l'hiver 2013/2014 (Figure 12). La station de Petit-Avin, située la plus en amont du bassin, présente les débits les plus faibles du cours d'eau principal. Le Hoyoux reçoit de l'eau en provenance essentiellement du ruisseau de Pailhe, du ruisseau d'Havelange, d'apports d'eaux souterraines et épisodiquement de la décharge du captage de Modave (essentiellement actif lors de périodes de crues). Les volumes de décharge des captages sont relativement faibles par rapport au débit du cours d'eau. Afin de réaliser des travaux, une mise en décharge complète du captage de Modave a été effectuée entre mars et octobre 2015 (apports d'eau de l'ordre de 300 à 750 L/s). Dans son ensemble, le ruisseau d'Havelange est à sec la majeure partie de l'année. Il n'est alimenté que par une source à une centaine de mètre de sa confluence avec le Hoyoux. Cependant, le débit écoulé à cette station reste très faible. La station à l'exutoire du Hoyoux Amont présente logiquement les débits les plus importants de l'ensemble des stations. Les données enregistrées sur le Torrent de Bonne indiquent que seules les périodes de crues présentent un débit non nul. Ceci confirme le caractère perdant de la rivière.

La dynamique des échanges nappe-rivière dans le Hoyoux Amont est à nouveau relativement stable au cours du temps et les variations sont essentiellement fonction des événements météorologiques. Les petits cours d'eaux perchés sont actifs uniquement pendant les gros événements pluvieux et le Hoyoux récupère l'eau utile de ces bassins via les eaux souterraines par le débit de base.

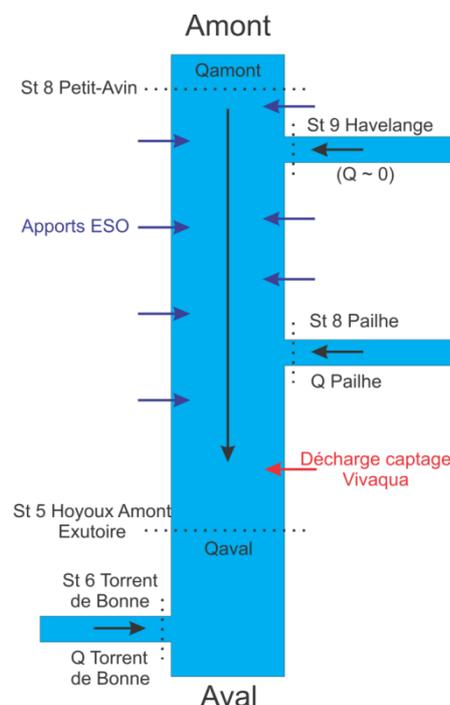


Figure 11 : Schéma synoptique des échanges d'eau dans le Hoyoux Amont

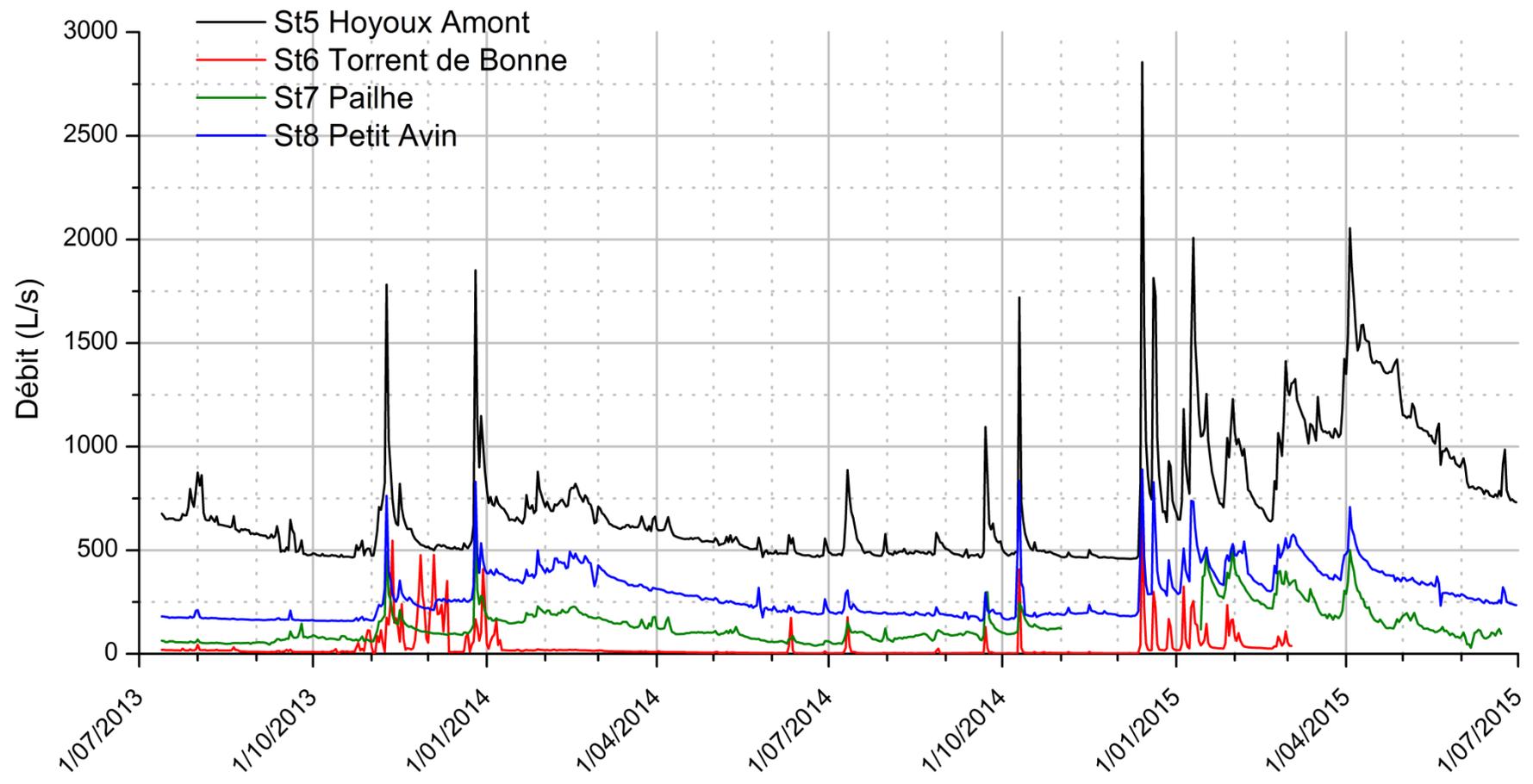


Figure 12 : Hydrogrammes des différentes stations de jaugeage du le Hoyoux Amont (incluant le Torrent de Bonne)

#### 4.2.3. Monitoring physico-chimique aux différentes stations de jaugeage

La dynamique des interactions nappe-rivière peut également se marquer au niveau des variations temporelles des paramètres physico-chimiques suite aux variations des proportions d'eau souterraine et d'eau de surface dans le mélange qu'est le cours d'eau.

##### **Suivi de la conductivité électrique**

Les sondes automatiques des deux stations situées aux exutoires des bassins (ST 1 dans le Triffois et ST 5 dans le Hoyoux Amont) ont également été équipées de sondes mesurant en continu, en plus de la hauteur d'eau et de la température, la conductivité électrique de l'eau (Figure 13). Ce paramètre apporte également de l'information quant à la dynamique des échanges nappe-rivière. En effet, les eaux souterraines étant plus minéralisées (CE à 25°C :  $\pm 600$  à  $650\mu\text{S}/\text{cm}$ ) que les eaux de ruissellement (CE à 25°C :  $\pm 300\mu\text{S}/\text{cm}$ ), toute diminution conséquente de la conductivité électrique est indicative d'apports d'eau par ruissellement.

De manière générale, la conductivité électrique mesurée présente un comportement stable, relativement constant tout au long de l'année, reflétant effectivement une minéralisation importante provenant des eaux souterraines. Seules les périodes de crues présentent une diminution de la conductivité électrique par des eaux de ruissellement. Les coefficients de corrélation (débit/conductivité électrique) ont été calculés pour chacune de 2 séries temporelles (ST 1 et ST 5). Ces coefficients sont de -0.68 pour le Triffois et -0.58 pour le Hoyoux Amont, ce qui prouve à nouveau la forte relation entre ces 2 chroniques.

Ces données traduisent la part prépondérante que représentent les eaux souterraines sur le débit des eaux de surface dans les deux bassins étudiés. Ces deux cours d'eau peuvent donc être qualifiés d'alcalins au sens de la classification proposée par le groupe de travail 'Groundwater Associated Aquatic Ecosystems' (European Commission 2015).

Ces données seront utilisées pour des calculs de séparation d'hydrogramme visant à extraire le débit de base des cours d'eau à partir de l'hydrogramme et de l'évolution de la conductivité électrique (ce point sera développé dans le livrable D4.1).

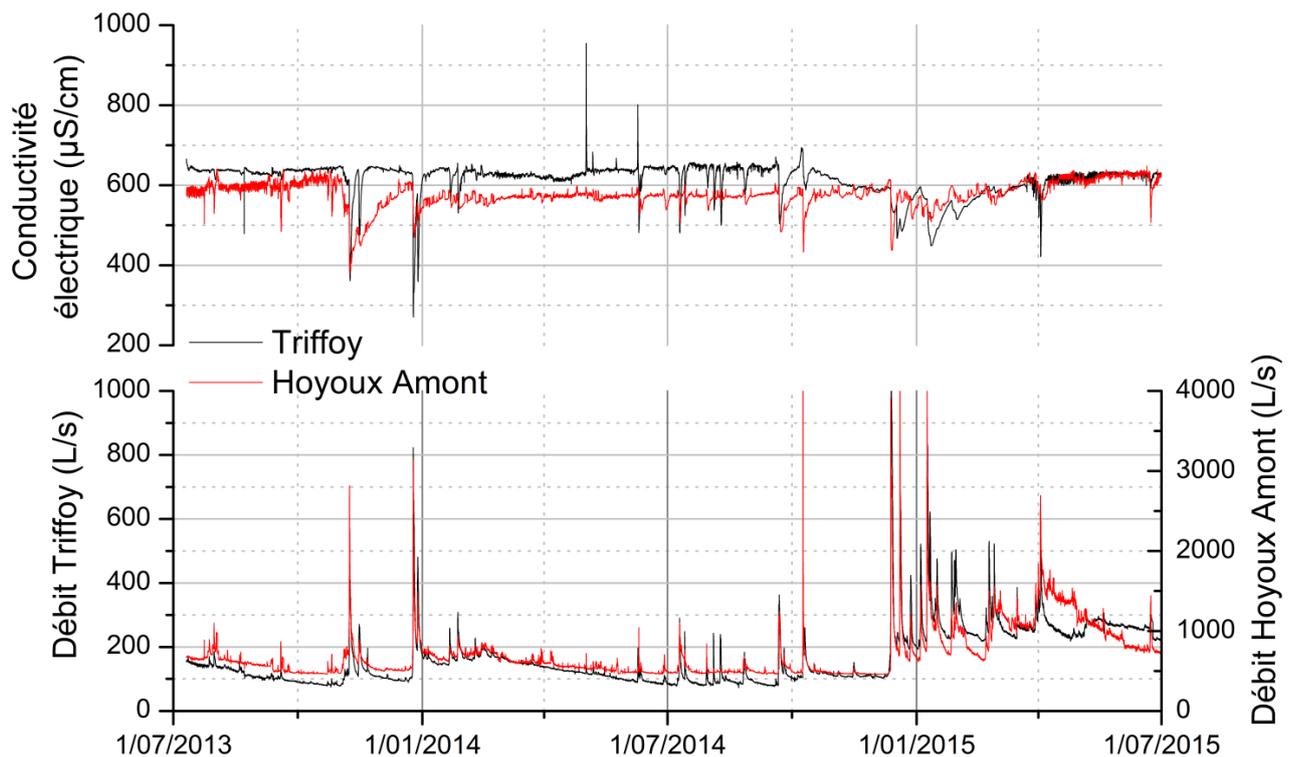


Figure 13 : Hydrogramme et suivi de la conductivité électrique (à 25°C) aux exutoires du Triffoy et du Hoyoux Amont (la conductivité électrique est stable au cours du temps sauf lors d'épisodes de crues)

### Suivi de température aux stations de jaugeage

Les sondes équipant les stations de jaugeage étaient également équipées de capteurs mesurant la température de l'eau. Un suivi temporel des températures aux stations de jaugeage est donc disponible.

L'interprétation des données des sondes se base, comme pour les données du DTS, sur la variation de température due au mélange d'eaux caractérisées par des températures différentes. Au niveau du Triffoy, les stations sont situées 'en long' sur le même cours d'eau. Une comparaison des profils de température est donc possible (Figure 14).

En plus des variations saisonnières (été/hiver) et journalières (jour/nuit), les résultats montrent que la station de Jamagne (la plus en amont du bassin) présente l'amplitude de variation de température la plus importante de toutes les stations (entre 3°C en hiver et 20°C en été). Les 3 autres stations présentent des variations de température moins importantes (entre 7°C en hiver et 14°C en été). Ce contraste de température s'explique par l'apport d'eau souterraine, à température constante, entre Jamagne et State. La station de Jamagne est la moins influencée par la température des eaux souterraines est donc plus fortement en relation avec la température de l'atmosphère. Les apports d'eau souterraine entre Jamagne et State tamponnent les variations de température dues à l'atmosphère. Les apports d'eau souterraine diminuant après la station de State, les températures des 2 autres stations (Calcaire-grès et exutoire) ne sont pas autant tamponnées que pour la station

de State. Elles montrent donc des variations un peu plus marquées qu'à State, toutefois nettement moindres qu'à Jamagne.

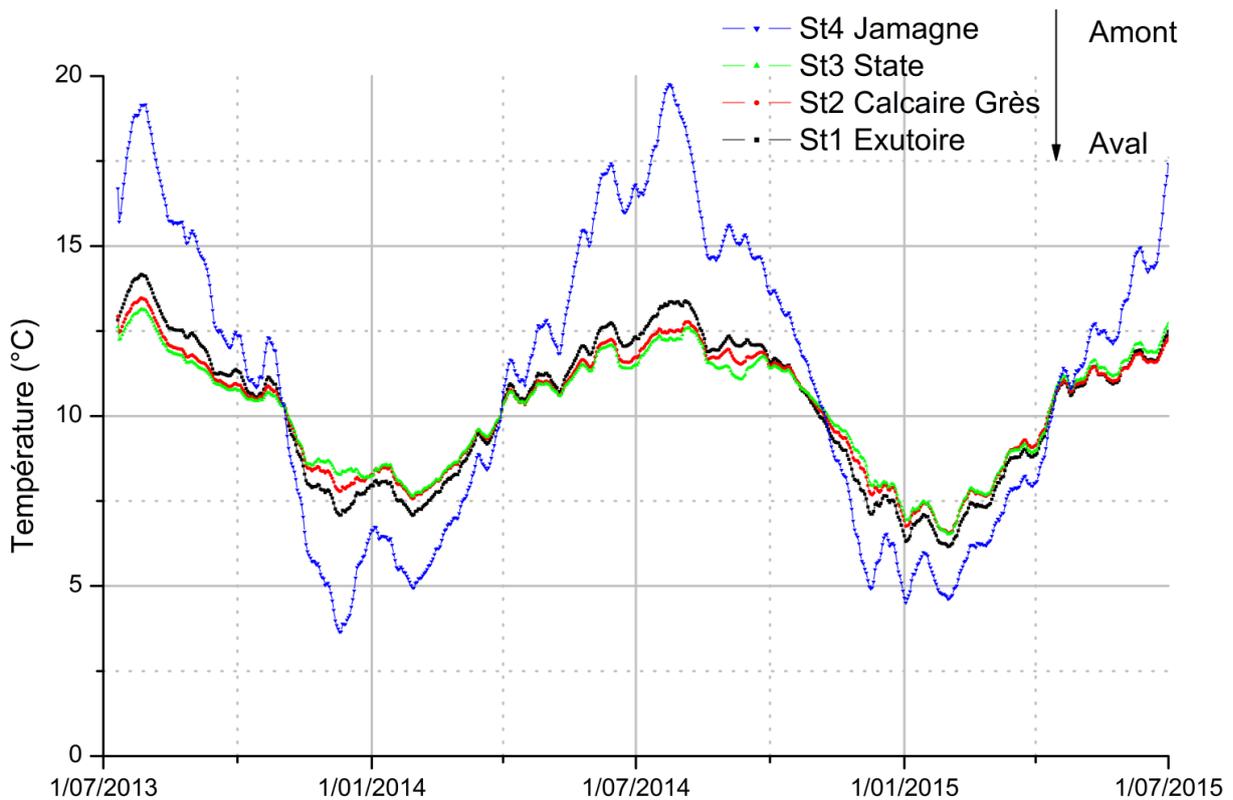


Figure 14 : Suivi temporel des températures au niveau des 4 stations de suivi du Triffoy (la station de Jamagne présente la plus grande amplitude de variation température parce qu'elle est la moins influencée par les apports d'eau souterraine et est donc plus fortement influencée par la température atmosphérique)

#### 4.2.4. *Monitoring hydrochimique par échantillonnage automatique à l'exutoire du Triffoy*

L'échantillonnage à l'exutoire du Triffoy a permis d'effectuer un suivi temporel de l'hydrochimie de l'eau de surface (Figure 15). Il est à noter qu'au vu de la méthodologie de prélèvement adoptée, les échantillons ont séjourné un certain temps en contact avec l'atmosphère et que des phénomènes de dégazage, pouvant partiellement altérer leur composition chimique, se sont produits. De manière générale, les concentrations en éléments majeurs sont relativement constantes (et le reflet de la minéralisation des eaux souterraines dans les formations des calcaires du Carbonifère). Lors des précipitations hivernales conduisant à des crues, tous les éléments chimiques sont dilués par l'apport des eaux de ruissellement, à l'exception du potassium et du sodium qui voient leurs concentrations augmenter. Ces deux éléments semblent donc être de bons traceurs de la composante de ruissellement.

On constate également que malgré l'augmentation significative du débit de base du Triffoy après l'hiver 2014-2015 (passant de  $\pm 100$  L/s avant l'hiver à  $\pm 250$  L/s après), aucune variation importante des concentrations en éléments majeurs n'est observée. Ceci confirme que ces éléments majeurs sont bien associés au débit de base puisqu'ils ne subissent aucun effet de dilution quand ce dernier augmente.

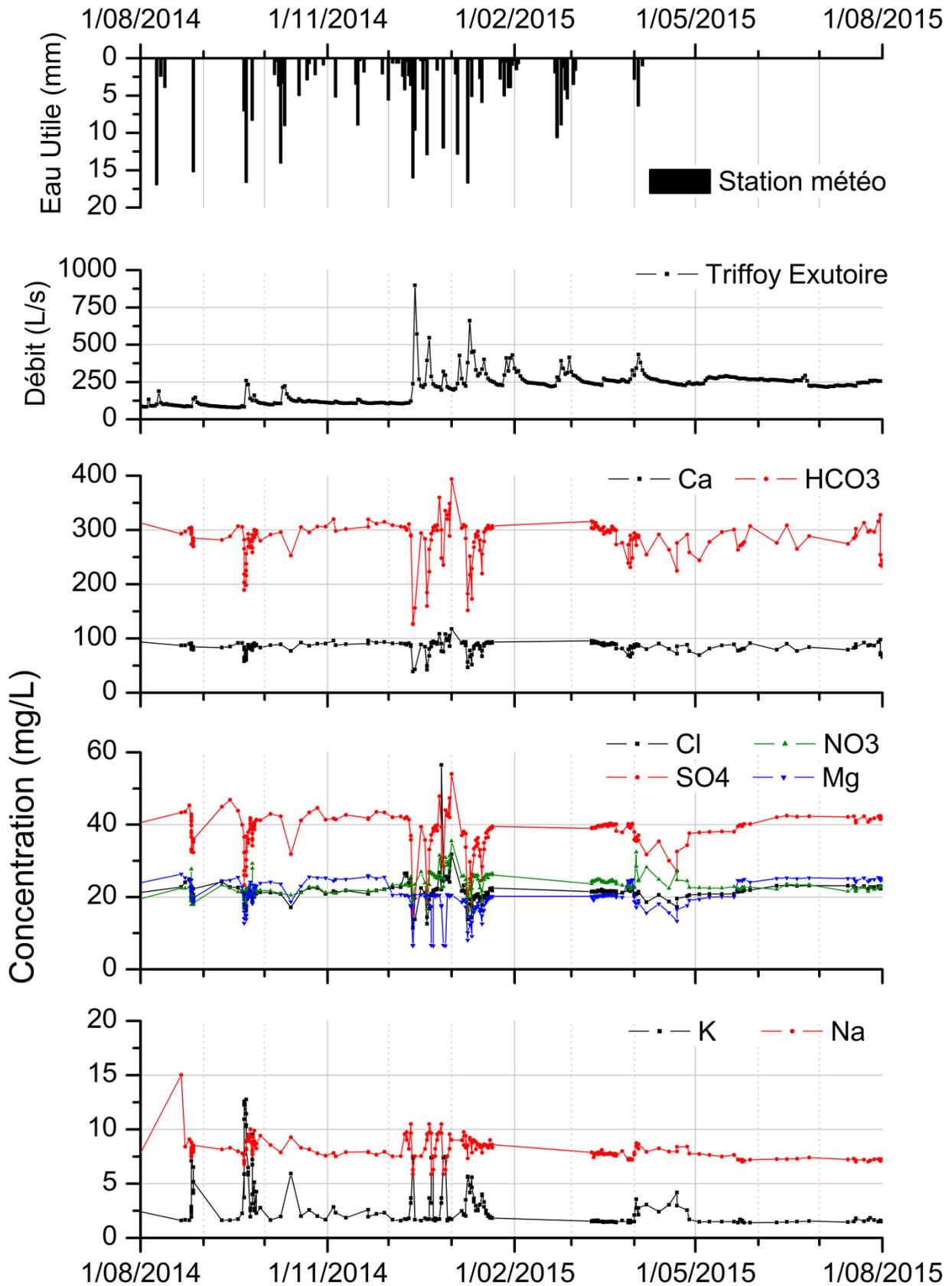


Figure 15 : Suivi hydrochimique (éléments majeurs) et débit à l'exutoire du Triffoy (les concentrations des différents ions sont stables au cours du temps à l'exception des phénomènes de crues qui diluent les concentrations, l'inverse se produit pour le potassium et le sodium qui voient leurs concentrations augmenter lors de crues)

#### 4.2.5. Analyse comparée de l'évolution de la piézométrie de la nappe et du niveau et débit des cours d'eau

Les données et mesures présentées dans les premières parties de ce rapport se sont essentiellement focalisées sur les cours d'eau et elles démontrent à suffisance que ceux-ci (aussi bien le Hoyoux que le Triffoy) sont essentiellement alimentés par des eaux souterraines et ce, quasi tout au long de l'année hydrologique.

L'objectif ici est maintenant de croiser les observations au niveau des cours d'eau avec des mesures et observations dans les eaux souterraines et les précipitations (ou les eaux utiles) en vue d'établir plus précisément les liens de causalité entre les variations observées et les mécanismes et délais de recharge-décharge entre ces différents compartiments du cycle de l'eau dans des petits bassins versants de type calcaires.

Cette analyse repose sur l'examen conjoint de différentes chroniques enregistrées sur le réseau de monitoring mis en place sur les deux bassins tests. Plusieurs études de cas sont proposées à la suite.

##### **Etude de cas n°1 : Relation eau utile – piézométrie et débit dans le Triffoy**

Pour le Triffoy, l'examen porte sur (1) l'eau utile, (2) la piézométrie de la nappe suivie au piézomètre F5 Evelette (foré dans le cadre du projet Synclin'EAU), au puits Jamagne et au piézomètre F1 State (foré dans le cadre de ce projet) et (3) l'hydrogramme de débit à l'exutoire du bassin. Les ouvrages d'Evelette et de Jamagne ne sont pas situés à proximité directe du cours d'eau. Cependant, les données sont regardées dans un but qualitatif notamment du point de vue des réactions et de la synchronicité des chroniques.

Une relation directe est observée entre la piézométrie et le débit du cours d'eau (Figure 16). La nappe et la rivière réagissent rapidement et de manière quasi synchrone aux apports d'eau (eau utile). L'eau utile étant plus abondante en hiver, la recharge de la nappe est donc plus importante durant cette période.

Lors des crues, la composante 'ruissellement' est non négligeable du point de vue du débit de la rivière. Cependant, ces pics de ruissellement sont rapidement évacués du bassin et la rivière se retrouve à nouveau majoritairement alimentée par les eaux souterraines. La recharge de la nappe, se produisant rapidement durant ces précipitations, augmente le niveau piézométrique et ainsi les apports d'eau souterraine vers la rivière. Cette augmentation de la décharge de la nappe vers la rivière se marque par un débit plus important lors des périodes de récession (débit de base) suivant des fortes précipitations.

Les apports d'eau utile se traduisent donc très rapidement par une augmentation du débit du cours d'eau suite au ruissellement, suivie de manière quasi synchrone mais plus prolongée, par un soutien du débit de base associé à la remontée de la nappe suite à la recharge par infiltration.

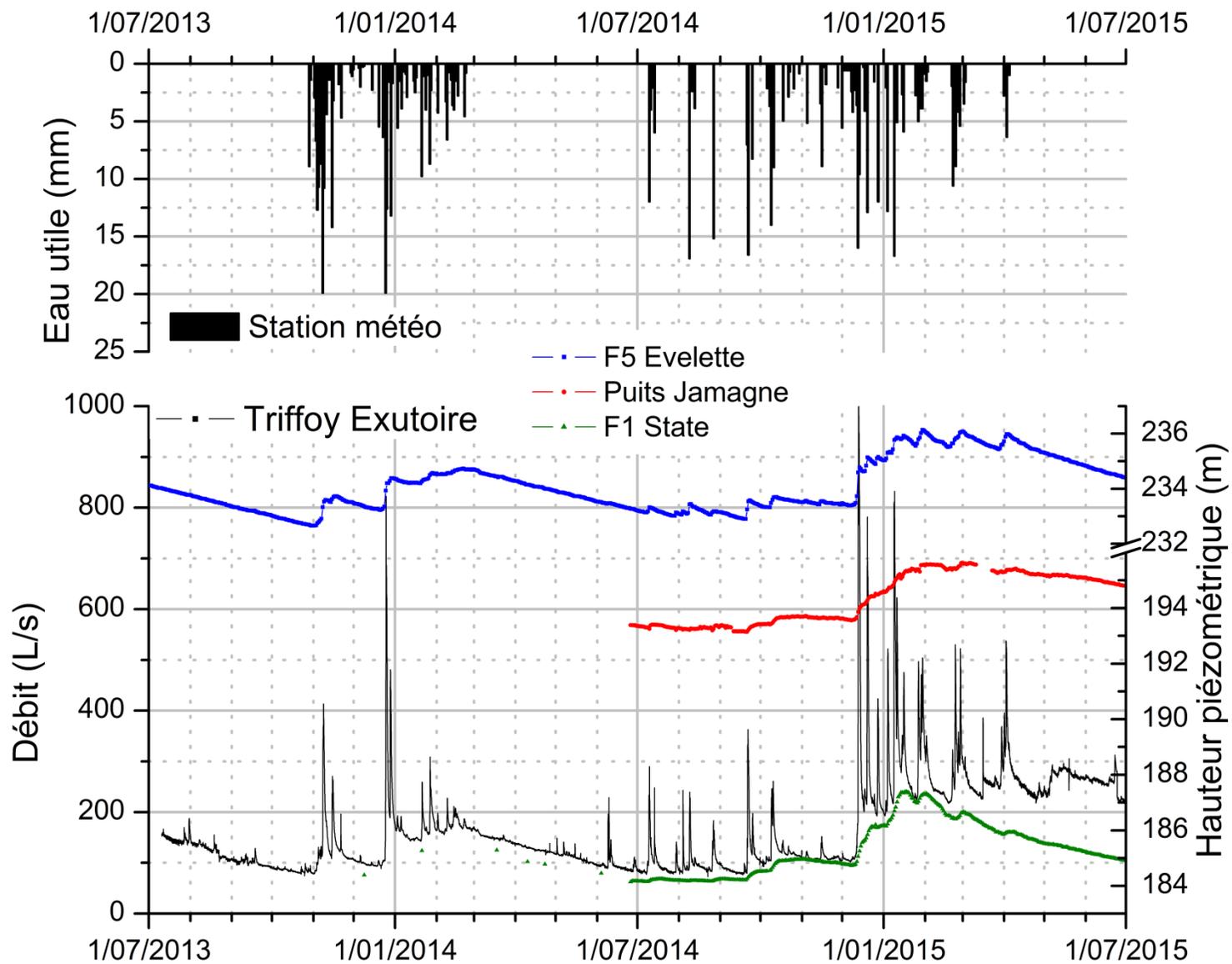


Figure 16 : Relation eau utile, débit et piézométrie du Triffois, les réactions de la nappe et du cours d'eau à l'eau sont rapides et quasi synchrones

## Etude de cas n°2 : Relation piézométrie – niveau d’eau du Triffoy au niveau du site des micropiézo­mètres

Les niveaux piézométriques ont également été suivis au niveau des micropiézo­mètres (Figure 17). Les données sont disponibles à partir d’avril 2015 pour l’ensemble des ouvrages. Une sonde pressiométrique a également été installée dans le Triffoy à proximité directe des micropiézo­mètres, permettant de comparer les niveaux d’eau de la nappe et de la rivière.

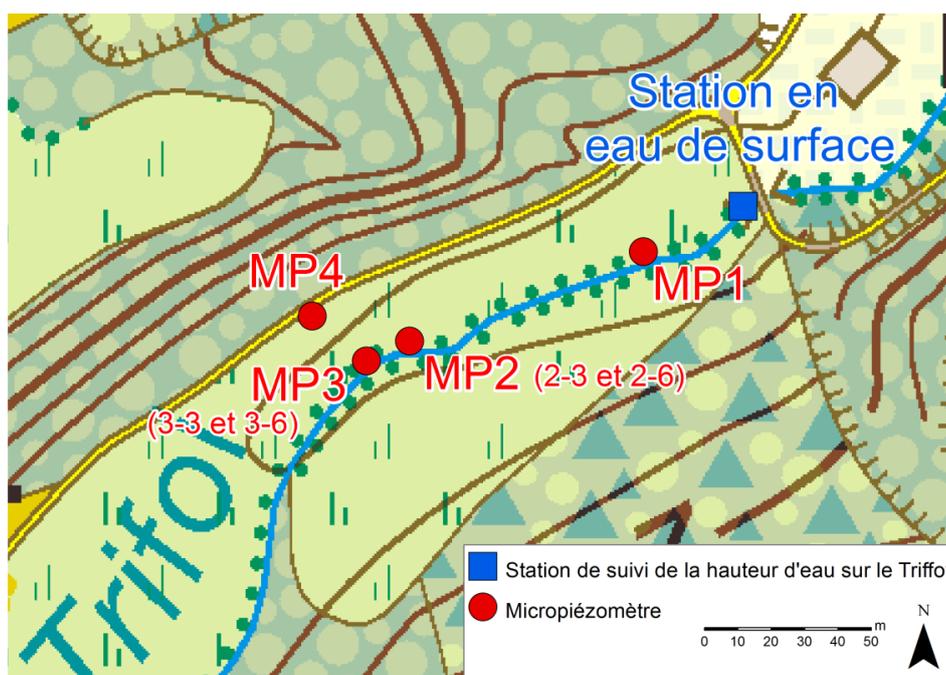


Figure 17 : Implantation des micropiézo­mètres (deux ouvrages de différentes profondeurs ont été forés sur les sites 2 et 3) et de la station de mesure de la hauteur d'eau sur le Triffoy (à proximité du hameau de Vaux)

Pour la période allant d’avril à novembre 2015, les chroniques montrent une diminution quasi régulière, avec des évolutions quasi parallèle des niveaux piézométriques dans les différents ouvrages et le cours d’eau. Par conséquent, les gradients sont relativement constants (Figure 18). Le comportement est normal puisque cette période correspond essentiellement à l’été (absence d’eau utile). A partir de novembre 2015 et de manière plus marquée en janvier et février 2016, on observe des augmentations nettes des niveaux piézométriques et du cours d’eau suite aux précipitations et à la recharge hivernale (zoom sur cette période à la Figure 19). Ces pics sont synchrones avec la remontée du niveau piézométrique sur l’ensemble des ouvrages. Aucune inversion de gradient piézométrique n’est cependant observée. Le niveau d’eau de la nappe reste donc supérieur à celui de la rivière et la nappe continue à alimenter le cours d’eau. Cet état est confirmé par les données de conductivité électrique (non présentées) qui restent stables pendant les phénomènes de crues (pas de diminution de la conductivité électrique de l’eau dans les micropiézo­mètres suite à une infiltration de l’eau de la rivière). Les variations du niveau de la nappe sont donc dues à une recharge suite à l’infiltration des eaux de précipitations et cette remontée du niveau de la nappe soutient à nouveau le débit du cours d’eau après les évènements pluvieux.

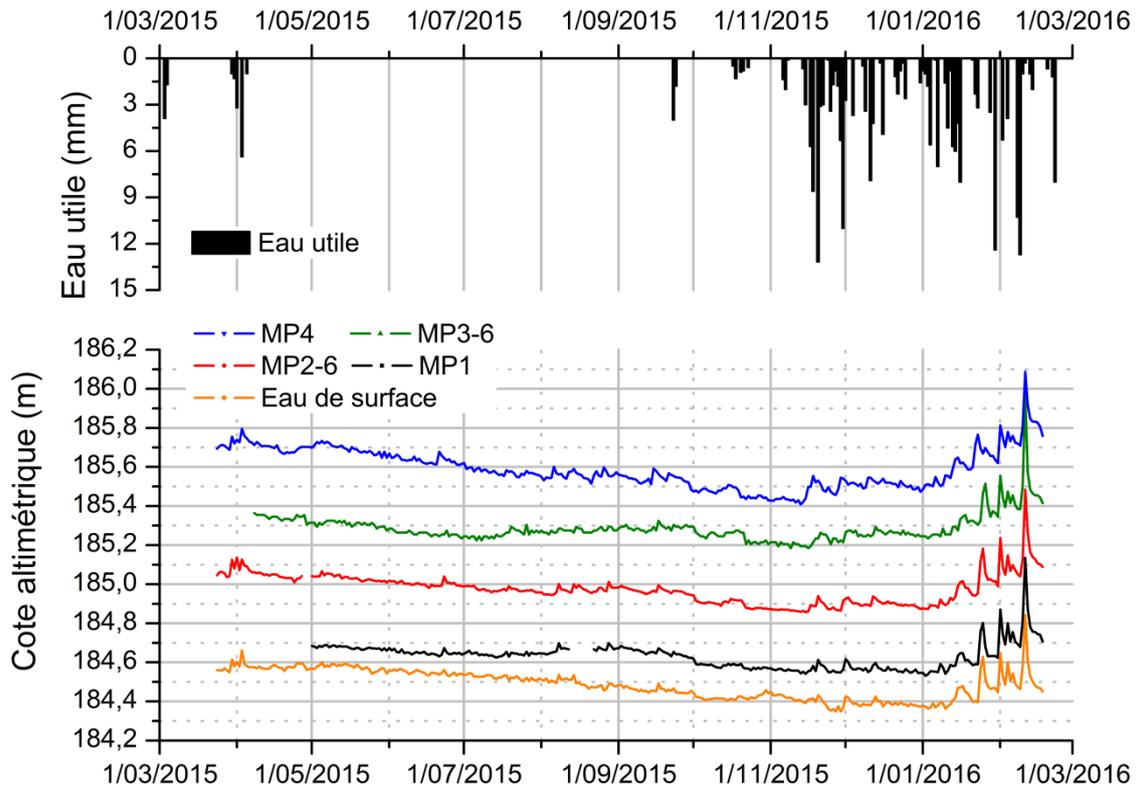


Figure 18 : Evolution des hauteurs piézométriques dans les micropiézomètres et du niveau d'eau dans la rivière, les niveaux piézométriques sont supérieurs au niveau du cours d'eau qui draine donc la nappe

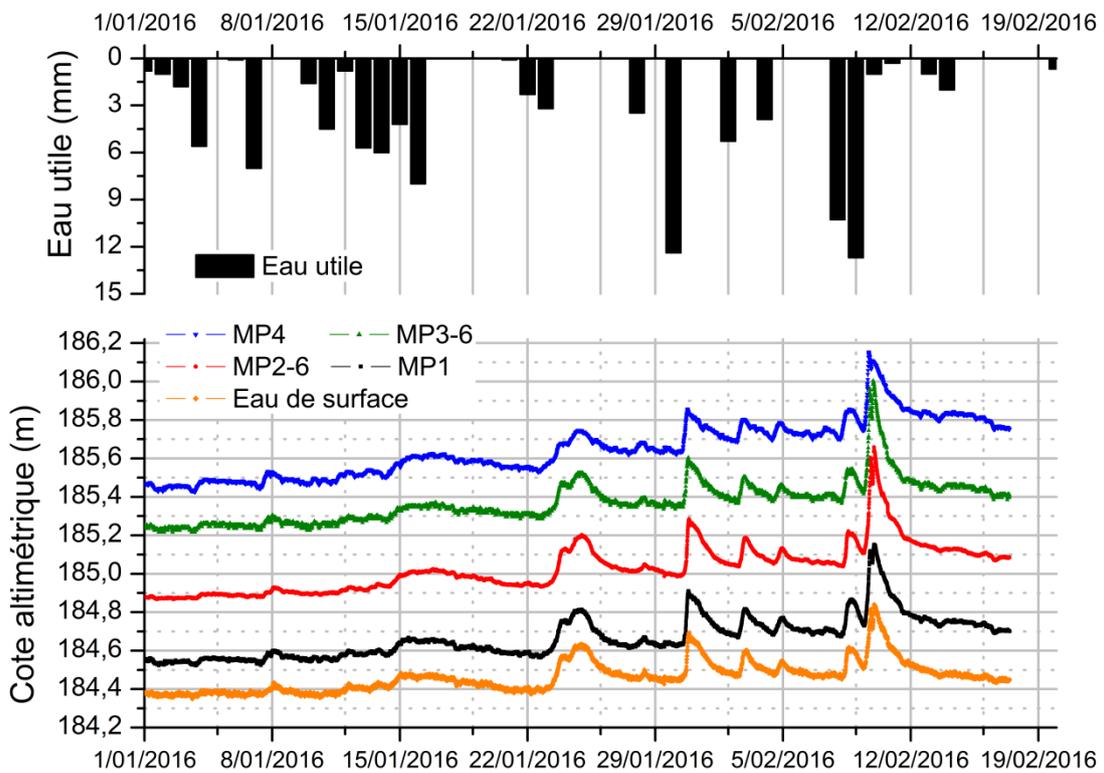


Figure 19 : Zoom sur l'évolution des hauteurs piézométriques dans les micropiézomètres et du niveau de la rivière durant les crues de l'hiver 2015-2016, aucune inversion de gradient n'est observée durant ces crues

### Etude de cas n°3 : Contexte de nappe perchée au niveau du ruisseau d'Havelange

Deux piézomètres ont été forés dans le vallon d'Havelange, à proximité directe avec le ruisseau d'Havelange (Figure 20). Une station de suivi de la hauteur d'eau de surface a été installée à l'exutoire du vallon (ST 9). Comme expliqué dans le livrable bilan (*'D3.3 Bilans hydrogéologiques'*), le débit de ce ruisseau est en général extrêmement faible et il réagit seulement aux événements pluvieux importants. La rivière est asséchée sur une grande partie de son cours et l'eau qui s'écoule à l'exutoire provient d'une source située à 200m à l'amont de la station limnimétrique. Ces observations sur le ruisseau, ainsi que les mesures piézométriques réalisées après le forage des deux piézomètres, indiquent que le ruisseau d'Havelange est perdant sur l'essentiel de son cours. Ce cas d'étude permet donc de s'intéresser au cas où l'eau de surface alimente les eaux souterraines.

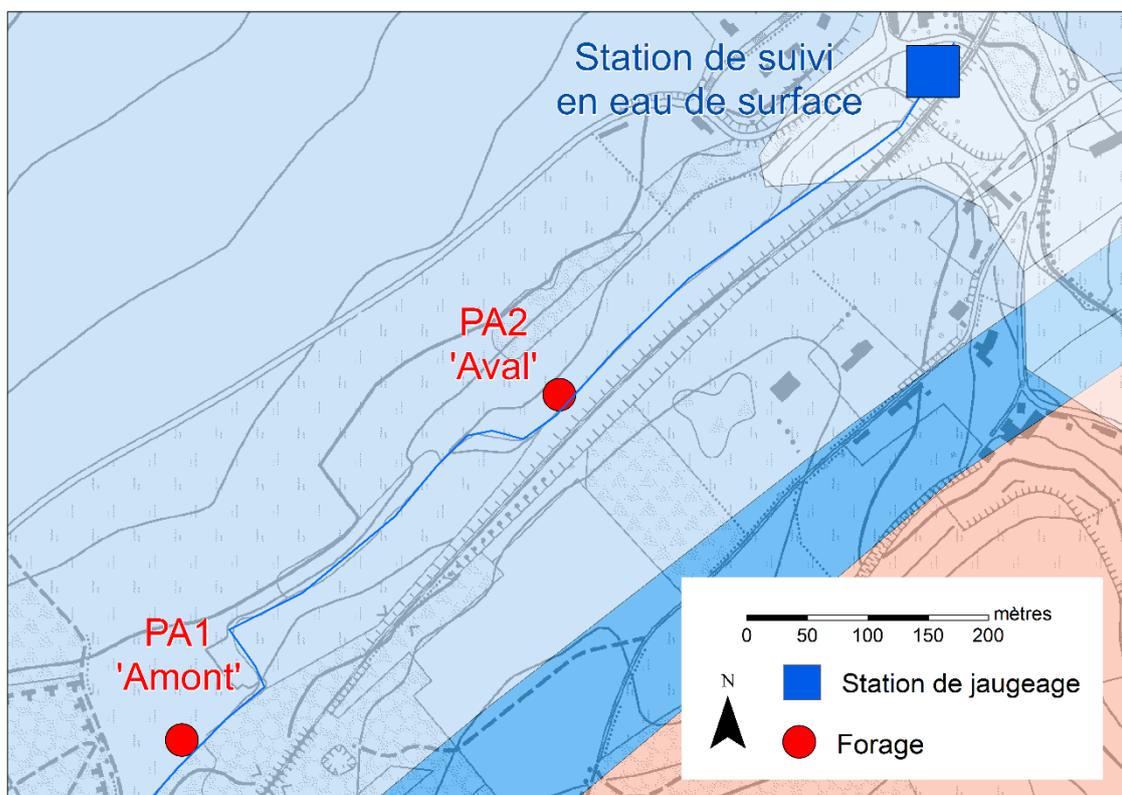


Figure 20 : Localisation des ouvrages à Petit-Avin (PA1 'Amont' et PA2 'Aval') et de la station de suivi en eau de surface sur le ruisseau d'Havelange (ST 9)

La nappe et la rivière réagissent de manière très rapide et de manière synchrone aux précipitations (Figure 21). Cependant, la remontée du niveau piézométrique dans le vallon d'Havelange ne contribue pas à un soutien du débit de base du cours d'eau du fait que la rivière est perchée (contrairement au Triffoy). Le piézomètre 'PA2 Aval' présente une moins grande amplitude de variations du niveau piézométrique du fait de sa proximité avec le Hoyoux (niveau de base régional).

Vu l'alimentation du cours d'eau par une source, la température de la rivière est constante tout au long de l'année. Seuls les phénomènes de crues viennent diminuer cette température suite à un apport d'eau de ruissellement. La variation de température dépend de la saison, une augmentation est observée lors des crues d'été tandis qu'une diminution est observée durant les crues d'hiver.

Au point de vue de la température des eaux souterraines, le 'PA1 Amont' présente des variations de température sur le long terme, de l'ordre de 6 mois. Deux phases sont distinguées sur la chronique. La première phase correspond à une augmentation générale des températures jusque mi-janvier. La deuxième phase correspond à une diminution des températures. A la transition, une stabilisation des températures se marque pendant quelques jours. Malgré le manque d'information sur une partie de la chronique, le 'PA2 Aval' semble présenter la même variation de température à long terme que le 'PA1 Amont'.

Des variations de température plus ponctuelles sont également observées. Ces variations de température sont plus ou moins inversement corrélées entre les 2 ouvrages. Ces variations sont plus marquées pour l'ouvrage 'PA2 Aval' et elles « démarrent » à chaque pic de crue sur la rivière. Ces variations de température pourraient être dues à un mélange d'eau suite à l'infiltration des eaux de précipitations ou à l'infiltration de la rivière. L'ouvrage étant localisé après un coude à angle droit du cours d'eau, l'infiltration de la rivière peut être favorisée. Cependant, une diminution de température en eau de surface est observée à l'exutoire du bassin lors de chaque crue.

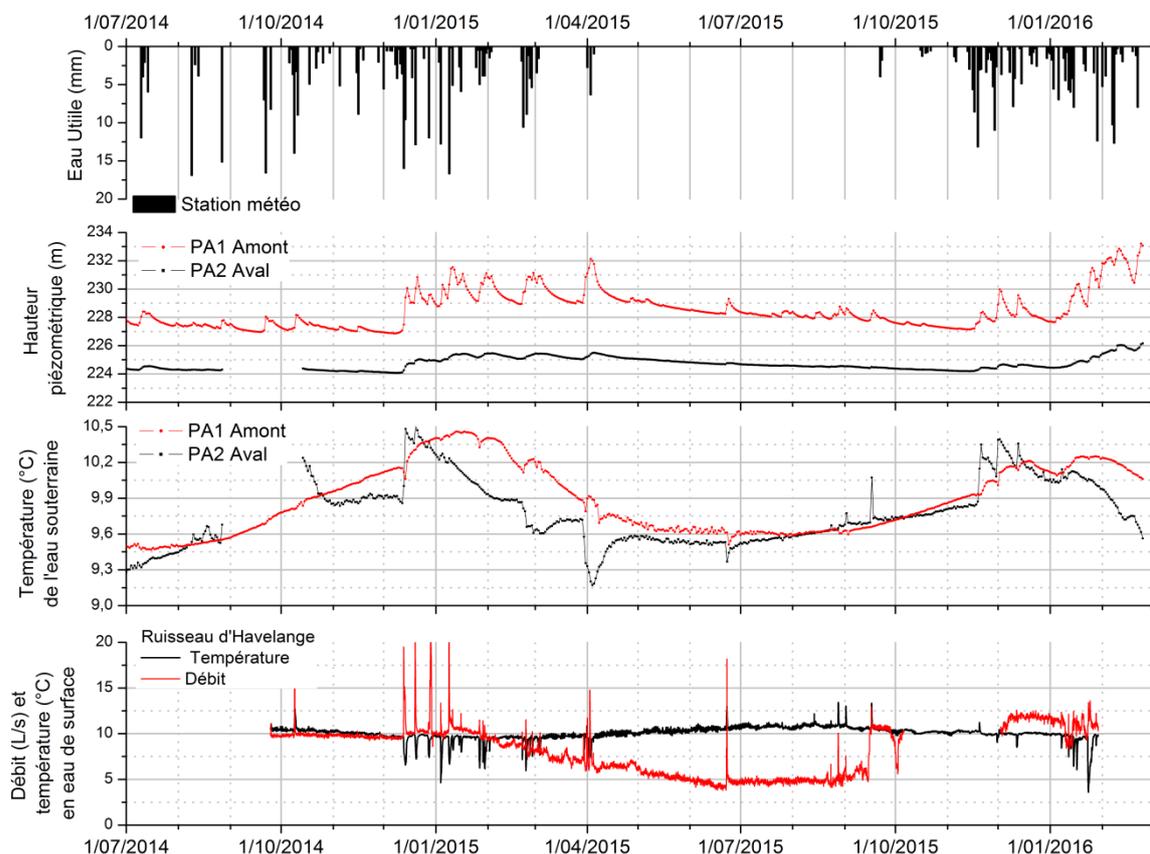


Figure 21 : Evolution de la piézométrie et de la température de l'eau dans les 2 forages de Petit Avin et du débit et de la température du ruisseau d'Havelange

### 4.3. Premières conclusions relatives à l'étude des interactions nappe-rivière

Sur base de l'ensemble des résultats obtenus dans cette étude des interactions nappe-rivière et avant d'aller vers une analyse plus quantitative, on peut déjà tirer quelques premières conclusions

ainsi que décrire conceptuellement le fonctionnement de ces interactions. L'ensemble des données concernant le suivi de la piézométrie et des débits des cours d'eau montrent clairement que le cas de figure idéal du point de vue de la caractérisation des interactions nappe-rivière est le cas où le cours d'eau est alimenté par les eaux souterraines (cours d'eau drainant). Les relations sont beaucoup plus claires que dans le cas inverse.

Lors de périodes où il y a peu de variations des niveaux d'eau (dans la nappe ou dans la rivière), peu d'information est disponible et il est assez difficile de tirer des conclusions. Une fois de plus, l'apport des données de conductivité électrique permet de confirmer ou non l'inversion du gradient piézométrique. Dans le cas de figure d'une rivière perchée, le monitoring des interactions est plus compliqué car il est difficile de faire la part entre la recharge de la nappe venant directement du cours d'eau et celle venant des précipitations. Dans ce cas, une analyse combinée des variations de hauteur d'eau et de température permet d'affiner l'analyse même s'il n'est pas toujours évident de tirer des conclusions définitives.

Les 2 cas de figure sont représentés de manière schématique et selon une approche de type « cause à effet » (Figure 22).

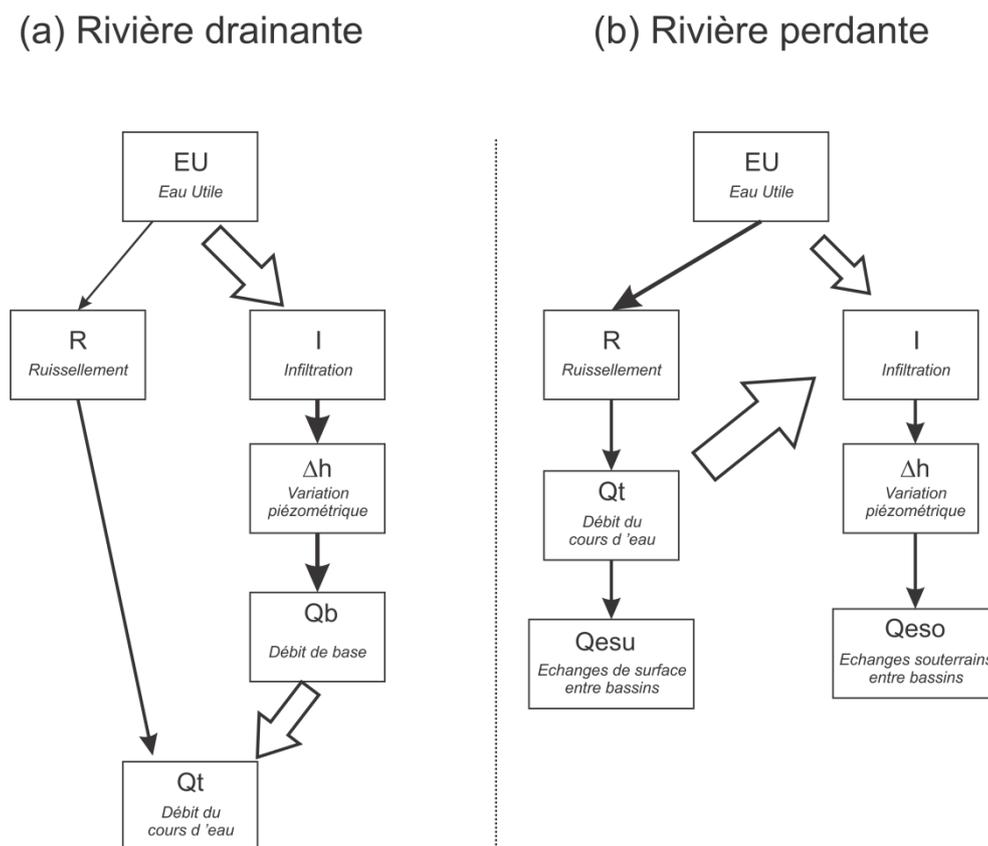


Figure 22 : Lien entre les différents compartiments du cycle hydrologique pour le cas (a) d'une rivière drainante et (b) d'une rivière perdante, les flèches sont proportionnelles à l'importance de l'interaction entre compartiments

#### 4.4. Quantification des échanges nappe-rivière

Dans les chapitres précédents, on s'est essentiellement focalisé sur la mise en évidence des interactions nappe-rivière et des échanges d'eau entre ces deux compartiments. On y a examiné l'intérêt et l'efficacité de différentes approches. Dans ce chapitre, l'objectif est d'aller plus loin et de quantifier au mieux les volumes échangés et ainsi que de déterminer plus quantitativement la variabilité spatiale et temporelle de ces échanges. Pour ce faire, différentes approches ont été tentées et sont comparées.

Cette partie du travail a été consacrée en particulier à des sections de rivières drainantes. Les résultats présentés au §4.2 ont en effet clairement montré que, dans des contextes de petits cours d'eau tels que ceux du bassin du Hoyoux, il est extrêmement difficile de quantifier l'échange rivière-nappe dans des contextes de rivière perdante.

Ces approches plus quantitatives sont essentiellement basées sur deux méthodes de calcul :

- un calcul des débits échangés entre la nappe et la rivière sur base de la variation de débit mesurée sur le cours d'eau entre deux stations ;
- une quantification des flux d'eau souterraine au voisinage des cours d'eau sur base de mesures et d'essais spécifiques.

##### 4.4.1. Calcul des débits échangés entre la nappe et la rivière sur base de mesures de débits entre deux stations

L'objectif de ces calculs de variations de débit est de localiser et de quantifier les apports d'eau sur le cours d'eau ainsi que de suivre leur évolution temporelle.

La méthodologie appliquée a consisté à calculer les variations de débit entre stations successives amont et aval du cours d'eau (appelées par la suite 'changement de débit  $\Delta Q_{aval}^{amont}$ '). Ces changements de débit ont été divisés par la longueur du tronçon de rivière entre les stations utilisées afin de pouvoir effectuer une comparaison entre tronçons (ils sont donc exprimés en litre par seconde et par mètre de cours d'eau). Afin de s'affranchir autant que possible des débits extrêmes, peu précis et souvent au-delà du maximum jaugé, un débit médian mensuel a été calculé sur base des données des hydrogrammes pour chaque station de jaugeage (Figure 23 pour le Triffoiy et Figure 24 pour le Hoyoux Amont). Une influence du ruissellement en hiver reste probablement présente malgré l'utilisation d'une médiane plutôt que d'une moyenne arithmétique mais cela n'affecte au plus que les mois d'hiver.

La période considérée au niveau des calculs s'étale de juillet 2013 à juin 2015, 24 valeurs mensuelles ont donc été calculées. Afin de les rendre représentatives de tendance plus générale, ces valeurs médianes mensuelles de débit sont ensuite regroupées par saison (printemps : de mars à mai, été : de juin à août, automne : de septembre à novembre et hiver : de décembre à février). Cette manière de procéder permet de disposer d'intervalles de valeurs de débits par saison et par section de cours

d'eau plutôt que de travailler avec des valeurs instantanées beaucoup plus sensibles aux diverses erreurs qui affectent ces mesures et leurs extrapolations.

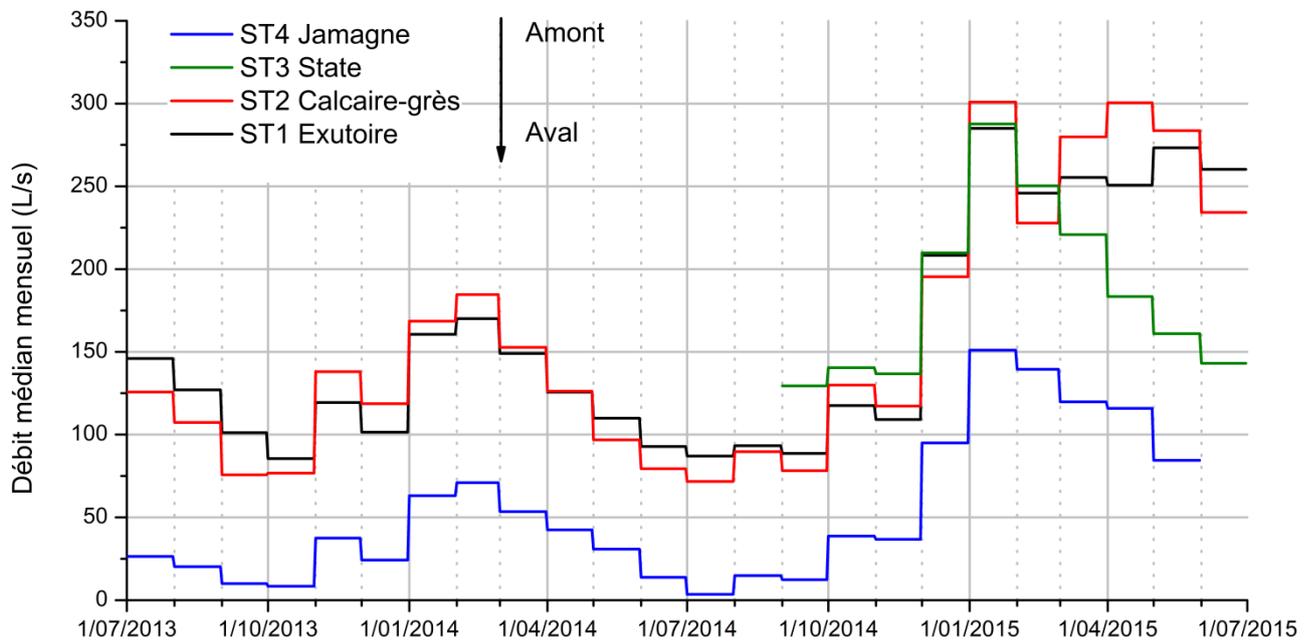


Figure 23 : Evolution des débits médians mensuels aux différentes stations de jaugeage du Triffoiy

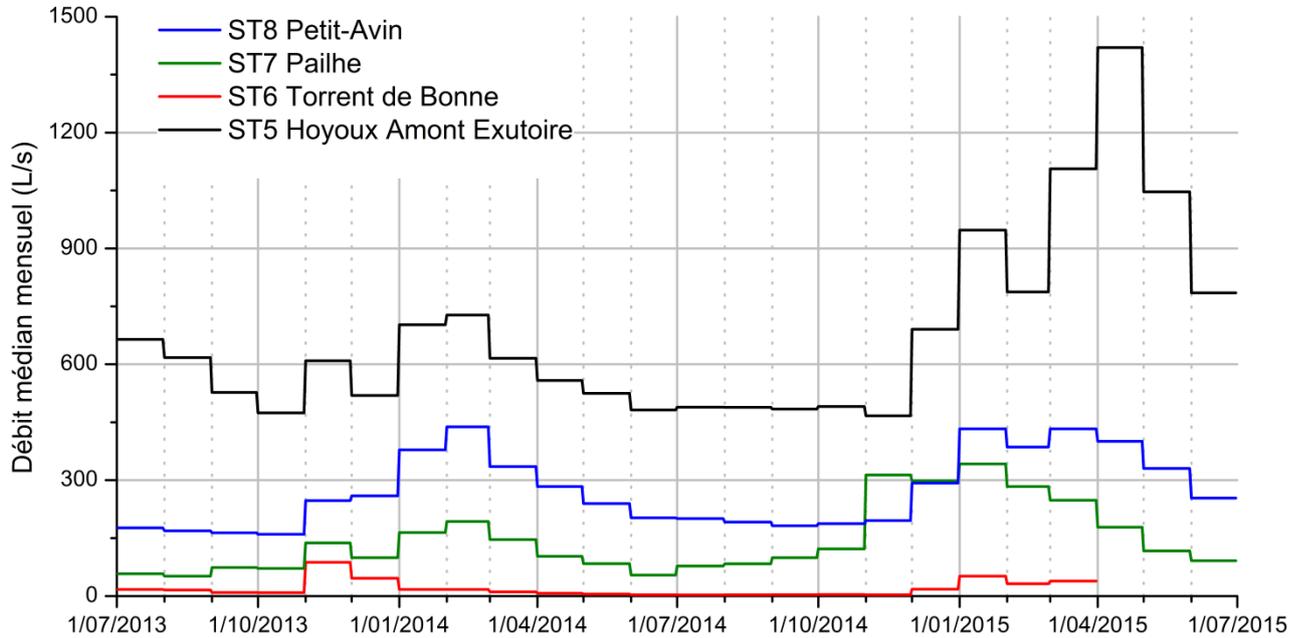


Figure 24 : Evolution des débits médians mensuels aux différentes stations de jaugeage du Hoyoux amont

## Débits échangés entre les stations de jaugeage du Triffoy

Au niveau du Triffoy, les stations de jaugeage sont positionnées de manière amont-aval sur le cours d'eau. Des changements de débit ( $\Delta Q_{aval}^{amont}$ ) par tronçon et par saison ont donc été calculés pour l'ensemble des stations. Ces changements de débit ont été divisés par la longueur du tronçon de rivière afin de pouvoir effectuer une comparaison entre tronçons. Suite à un problème instrumental, les données de la station de State ne sont disponibles qu'à partir du mois de septembre 2014. Le fait de travailler avec des médianes et des valeurs par saison permet en partie de s'affranchir de cette lacune.

Suite à des travaux au niveau des lignes d'adduction, les volumes prélevés au niveau du captage de Jamagne ont été mis en décharge entre les stations de State et Calcaire-grès à partir de mars 2015. Les données issues des stations Calcaires-grès et Exutoire présentent donc une surestimation du débit durant cette période (de l'ordre de 70 L/s).

Dans un premier temps, une analyse des variations de débits aux différentes stations en fonction des saisons est réalisée (Figure 25). La station de Jamagne (ST 4) présente les débits médians saisonniers les plus faibles de l'ensemble des stations. Les maxima sont observés au printemps et en hiver (entre 30 et 150 L/s). Les débits médians en été et en automne varient entre 3 et 40 L/s. Les débits médians saisonniers calculés pour les 3 autres stations (State ST 3, Calcaire-grès ST 2 et Exutoire ST 1) présentent des variations de débit relativement similaires variant entre 100 et 300 L/s. Seules les données d'automne présentent des variations moins importantes variant entre 75 et 140 L/s, confirmant les faibles débits en fin de période estivale. La station de State (ST 3) présente une moins grande amplitude de variation de débit en raison du nombre plus restreint de données disponibles.

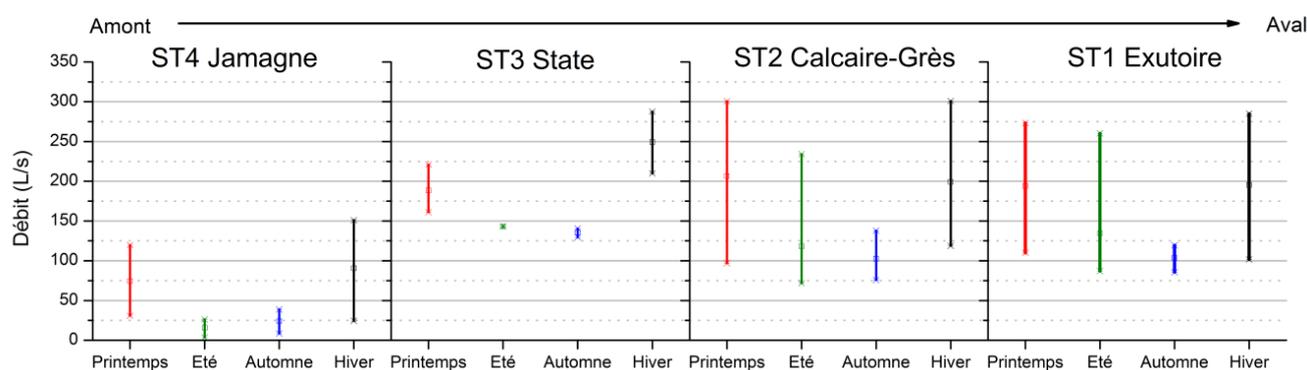


Figure 25 : Comparaison des débits médians mensuels (regroupés par saisons) aux différentes stations de jaugeage du Triffoy

L'analyse des changements de débit ( $\Delta Q_{aval}^{amont}$ ) permet de quantifier les apports d'eau sur les tronçons amont-aval (Figure 26). Vu le peu de données disponibles pour la station de State (ST3), la différence de débit avec la station de Jamagne (ST4) a également été calculée par rapport à la station suivante sur le profil (Calcaire-grès ST2).

De manière générale, les résultats de changements de débit ( $\Delta Q_{aval}^{amont}$ ) entre les stations Jamagne (ST4) - calcaire-grès (ST2) et Jamagne (ST4) – State (ST3) sont semblables et correspondent à des augmentations de débit. Ces changements de débit sont constants dans le temps et de l'ordre de 0.025 à 0.07 L s<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup> pour le tronçon State-Jamagne. Au niveau du tronçon Calcaire-grès – Jamagne, ces variations sont de l'ordre de 0.015 à 0.075 L s<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup> et présentent une plus grande amplitude au printemps et en été.

Les changements de débit ( $\Delta Q_{aval}^{amont}$ ) entre la station State (ST3) et Calcaire-Grès (ST2) présente de grandes différences entre saisons. Les changements de débit au printemps varient entre 0.06 L s<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup> et 0.12 L s<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>. Une seule valeur est disponible pour l'été et est dans la gamme des valeurs des changements de débit du printemps, à savoir 0.09 L s<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>. Ces changements de débit sont plus faibles pour l'automne et l'hiver et sont de l'ordre de 0.015 L s<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>. La mise en décharge complète du captage de Jamagne au printemps et été 2015 explique ces apports importants d'eau entre ces stations (apport de la décharge du captage de l'ordre de 0.07 L s<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>).

Peu de changements de débit ( $\Delta Q_{aval}^{amont}$ ) sont observés entre les stations Calcaire-grès (ST2) et Exutoire (ST1) : entre 0 et 0.03 L s<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>. Ce tronçon présente donc peu d'échanges d'eau entre stations.

L'ensemble de ces données confirment à nouveau l'importance des apports d'eau souterraine entre les stations de Jamagne (ST4) et State (ST3) sur le débit total du Triffoiy et le caractère drainant de ce secteur. Le débit du cours d'eau ne varie plus de manière significative en aval de ce tronçon à l'exception des périodes (printemps et en été 2015) où le captage de Jamagne était complètement mis en décharge. Du point de vue temporel, les apports d'eau ne présentent pas de diminution significative en fonction des saisons. L'alimentation de la rivière est donc constant quel que soit la période de l'année.

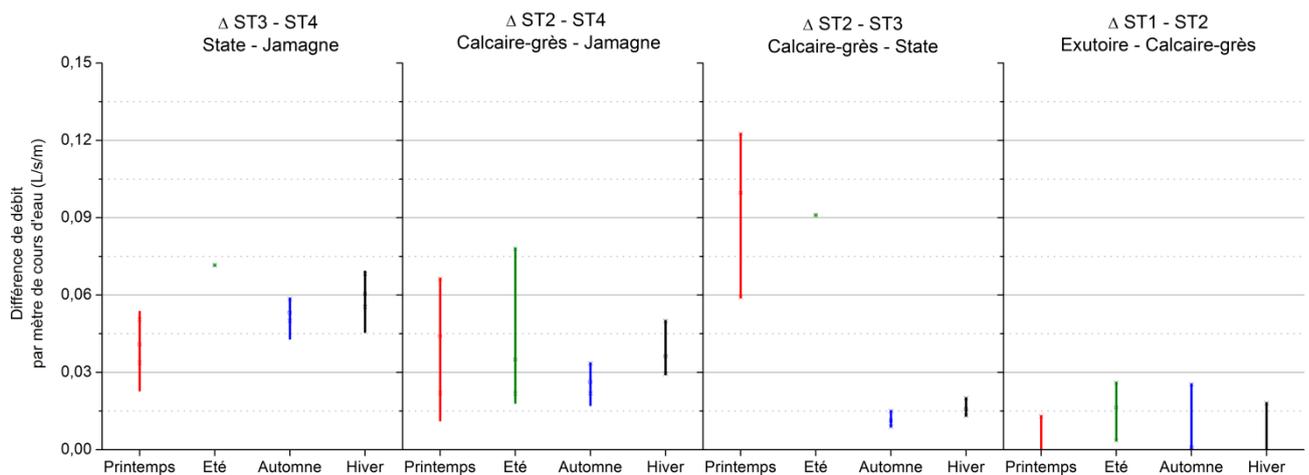


Figure 26 : Différence de débits (regroupées par saisons) entre les stations de jaugeage ; les débits ont été divisés par la longueur du tronçon entre les stations de mesures afin d'être comparables

## Débits échangés entre les stations de jaugeage du Hoyoux amont

La même méthodologie de travail a été effectuée au niveau du Hoyoux amont. Comme décrit au point 4.1.1, les stations de jaugeage du Hoyoux Amont Exutoire (station 5) et de Petit-Avin (station 8) sont disposées en long sur le cours d'eau principal (Figure 11). Deux autres stations sont situées sur des affluents, à savoir le ruisseau de Pailhe (station 7) et le ruisseau d'Havelange (station 8).

Le débit à l'exutoire du bassin du Hoyoux Amont est donc la résultante du débit transitant par la station amont (Petit-Avin), du débit du ruisseau de Pailhe (Havelange étant négligé vu ses faibles débits), d'apports d'eau souterraine vers le cours d'eau (notamment du sous-bassin du Torrent de Bonne) et de la décharge du captage de Vivaqua. Une quantification des apports d'eau souterraine le long du Hoyoux amont est donc possible en retranchant les débits de la station amont du Hoyoux et des affluents du débit à l'exutoire du bassin du Hoyoux Amont.

Les volumes de décharge des captages étant faibles en comparaison au débit de la rivière, ils sont donc négligés à l'exception d'une partie de l'année 2015 (de mars à octobre) durant laquelle le captage de Modave a été mis en décharge complète. Les données utilisées s'arrêtant en juin 2015, seules les valeurs du printemps et d'été 2015 sont affectées par cette décharge (apports variant entre 0.043 et 0.09 L s<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>). Afin de ne pas biaiser l'analyse, les débits du printemps 2015 ont été séparés des débits du printemps 2014.

De manière générale, des apports d'eau sont observés sur l'ensemble des périodes étudiées (Figure 27). Les données de printemps présentent des changements de débit ( $\Delta Q_{aval}^{amont}$ ) fort différents si l'on considère la période avec la décharge du captage. Ainsi des variations de l'ordre de 0.02 L s<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup> sont observées lorsque le captage n'était pas en décharge tandis que des changements de débit de 0.05 à 0.105 L s<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup> sont observés lorsque le captage était en décharge complète (apports venant de la décharge variant entre 0.043 et 0.09 L s<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>).

L'été voit une gamme de changements de débit intermédiaire de l'ordre de 0.025 et 0.055 L s<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>. La valeur la plus importante correspond à juin 2015, période durant laquelle le captage était également en décharge complète. L'automne présente un changement de débit compris entre 0 et 0.035 L s<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>. Finalement, l'hiver correspond aux plus petits écarts de changements de débit. Ceux-ci varient entre 0.01 et 0.02 L s<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>.

Ces données montrent clairement que des apports d'eau existent entre les stations amont et aval du Hoyoux. A l'exception du printemps où des apports d'eau venant de la décharge du captage étaient présents, les variations de débits sont du même ordre de grandeur.

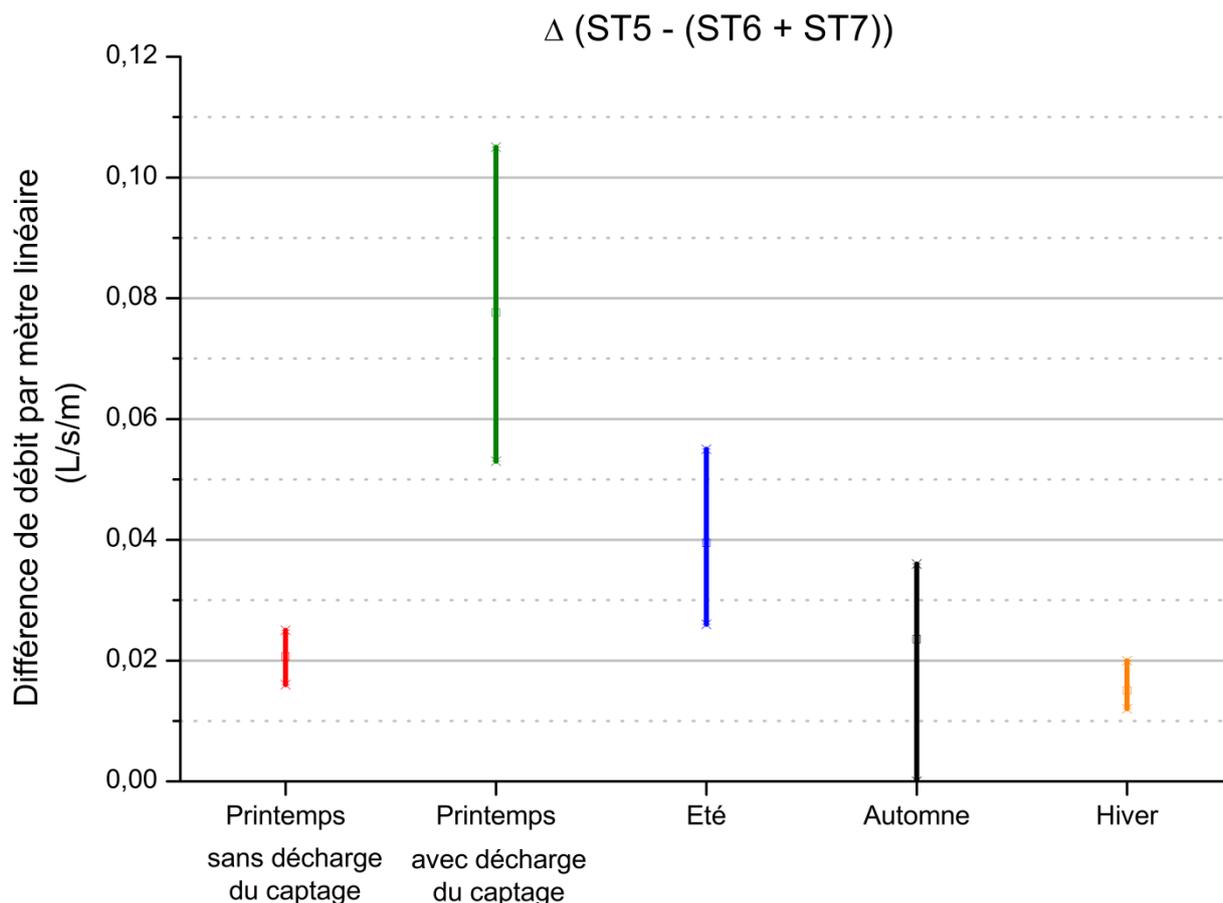


Figure 27 : Différence des débits (regroupés par saison) entre la station à l'exutoire du Hoyoux Amont (débit sortant du bassin) et les stations à Petit-Avin et Pailhe (débits entrants dans le bassin), une différence est effectuée au niveau du printemps lorsque le captage était mis en décharge complète suite aux travaux; les débits ont été divisés par la longueur du tronçon entre les stations de mesures

#### 4.4.2. Quantification des flux d'eau souterraine par essais et mesures spécifiques

Au point 4.4.1, on a évalué les apports d'eau souterraine uniquement sur base des variations de débits sur le cours d'eau. Moyennant l'acquisition des données requises pour le faire, il est également possible de quantifier les flux d'eau souterraine sur base de mesures et d'observations hydrogéologiques directes, par application 'simple' de la loi de Darcy.

Dans cette optique, une série d'investigations complémentaires ont été menées sur le site des micropiézomètres dans la vallée du Triffoy (Figure 28). Ces essais ont visé à calculer les flux d'eau souterraines à partir des observations (mesures piézométriques) et d'essais spécifiques (*slug-tests*) mais également à mesurer directement ces flux à l'aide de la méthode de traçage en puits unique 'FVPDM' (Finite Volume Point Dilution Method).

Les résultats de ces investigations de quantification des flux d'eau souterraine sont d'abord décrits. Ces résultats sont ensuite comparés entre eux et par rapport aux estimations de débits échangés entre la nappe et le Triffoy dans le même secteur.

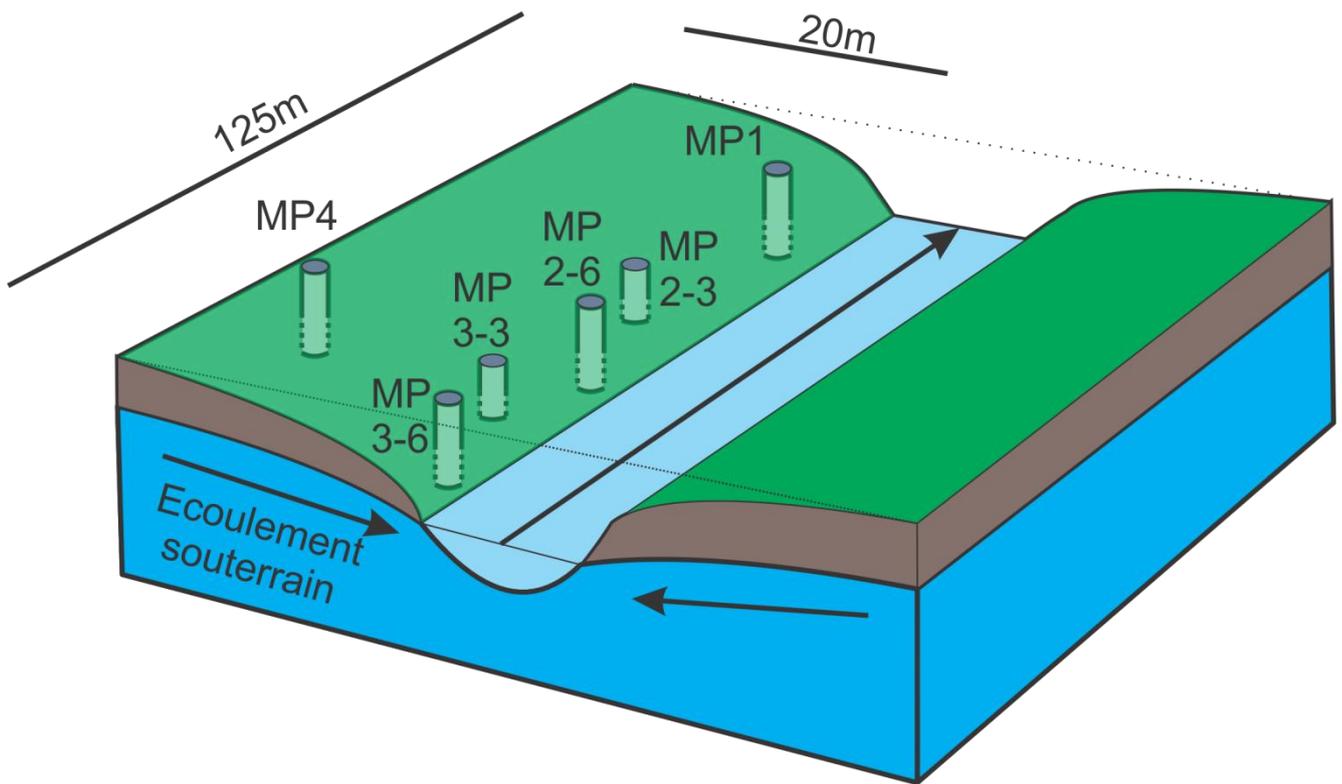


Figure 28 : Représentation simplifiée du site des micropiézomètres dans le bassin du Triffoiy

### Evaluation de la conductivité hydraulique des terrains au voisinage du Triffoiy par essais 'Slug'

Les *slug-tests* sont des essais hydrauliques réalisés sur des piézomètres afin d'estimer la conductivité hydraulique de l'aquifère de manière locale, au voisinage immédiat de l'ouvrage testé. Le principe de l'essai consiste à enfoncer un « *slug* » (tube plein équivalent au rayon de l'ouvrage testé) ou à ajouter un volume d'eau dans le piézomètre afin de créer une montée instantanée du niveau d'eau. L'essai inverse peut également être réalisé par le retrait instantané du « *slug* » ou la diminution du niveau d'eau (Figure 29).

Montée du niveau d'eau  
Introduction du slug

Descente du niveau d'eau  
Retrait du slug

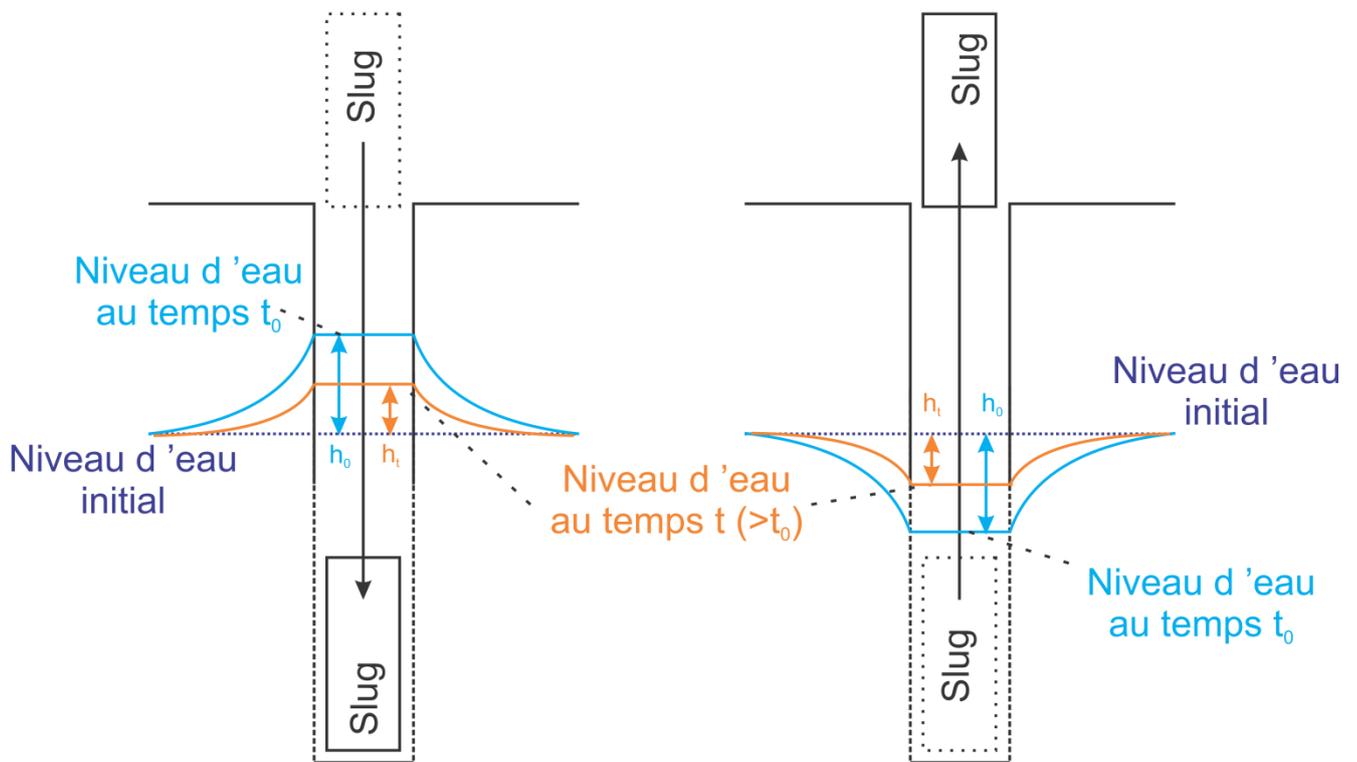


Figure 29 : Schéma théorique de réalisation d'un slug-test (introduction et retrait du slug)

L'interprétation de l'essai se base sur la théorie de Bouwer and Rice (1976) qui propose une solution semi-analytique applicable pour les aquifères libres ou partiellement confinés dans les conditions suivantes (Buttler 1998) :

- Aquifère homogène d'épaisseur constante et d'extension infinie ;
- Variation instantanée du niveau d'eau lors de l'essai ;
- Mécanismes d'emmagasinement élastique négligé ;
- Pas de variation du niveau de la nappe durant la durée de l'essai (hormis dans l'ouvrage testé et aux abords directs) ;
- Piézomètre partiel ou complet.

La solution utilisée est :

$$K = \frac{r^2 \ln \frac{R_{\text{cont}}}{R}}{2L} \frac{1}{t} \ln \left( \frac{h_0}{h_t} \right) \quad [3]$$

Avec

$K$  ( $LT^{-1}$ ) : conductivité hydraulique ;  $r$  (L) : rayon du tubage ;  $R$  (L) : rayon total de l'ouvrage, y compris massif filtrant ;  $R_{\text{cont}}$  (L) : distance radiale d'atténuation de l'onde de pression (i.e. distance au-delà de

laquelle la variation du niveau d'eau n'a pas d'impact) ;  $L$  (L) : longueur crépinée ;  $h_t(L)$  : variation du niveau d'eau au cours du temps ;  $h_0(L)$  : déplacement initial du niveau d'eau.

La distance radiale d'atténuation de l'onde de pression ( $R_{cont}$ ) étant difficile à estimer, un rapport  $R_{cont}/R$  théorique est utilisé. La pente de la droite du graphe  $h_t/h_0$  en fonction du temps permet d'estimer la conductivité hydraulique.

Les deux phases des essais (montée et décroissance du niveau d'eau) ont été réalisées sur l'ensemble des ouvrages. Pour le micropiédomètre MP2-3, les résultats de ces essais sont illustrés à la Figure 30 tandis que l'interprétation est illustrée à la Figure 31. L'ensemble des interprétations pour les autres ouvrages sont présentées en annexe (de l'Annexe 7 à l'Annexe 17).

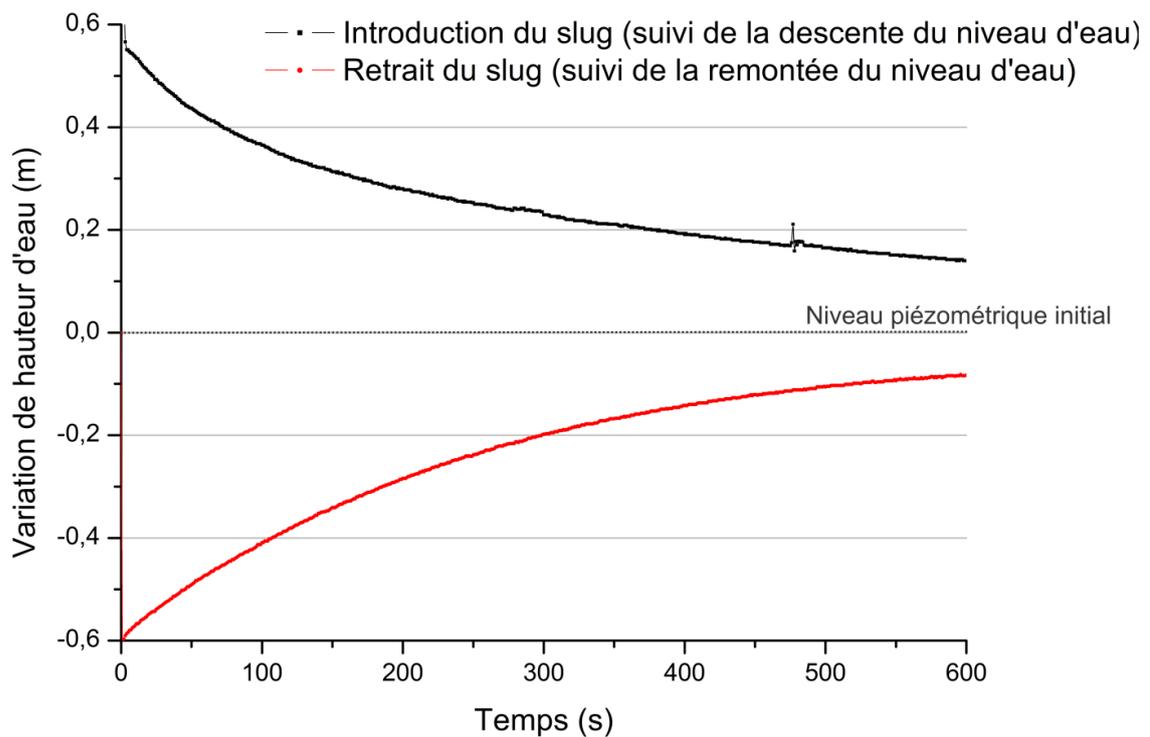


Figure 30 : Variation du niveau d'eau au MP2-3 lors du slug-test (introduction du slug/montée du niveau d'eau et retrait du slug/descente)

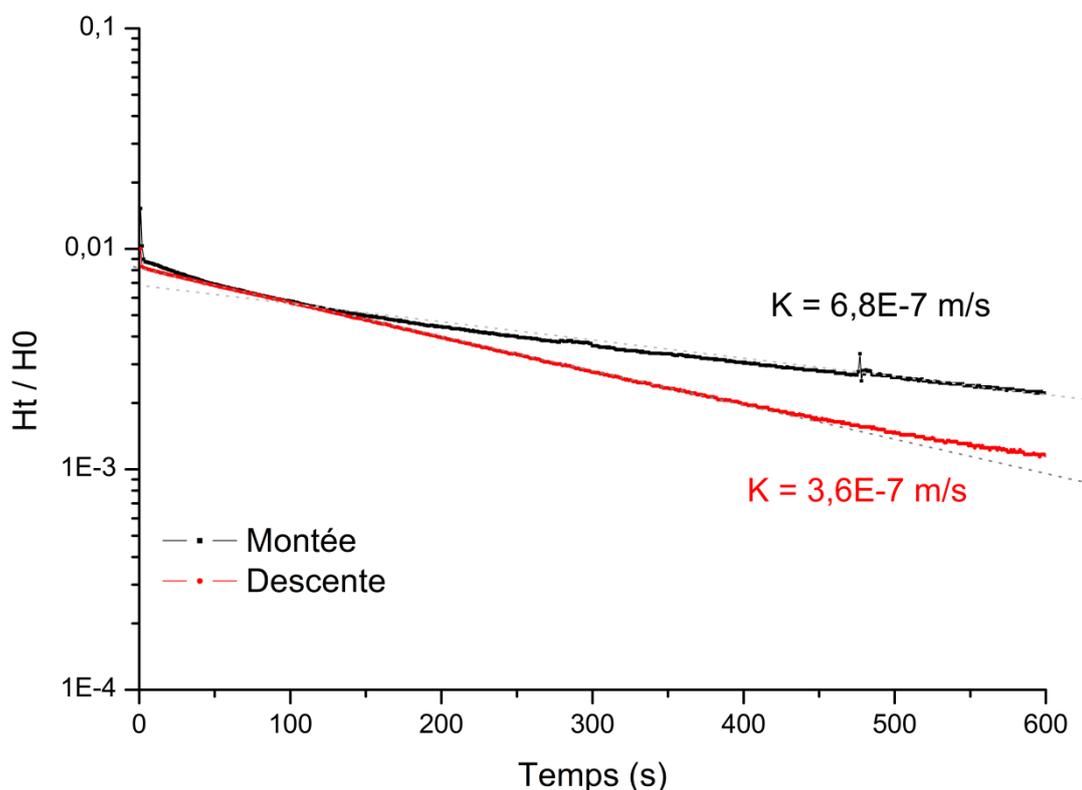


Figure 31 : Interprétation des essais slug réalisés sur le micropiézomètre MP2-3

Les conductivités hydrauliques aux abords des ouvrages ont ainsi pu être calculées pour chacun des essais (Tableau 5). Elles présentent une grande variabilité, entre  $8 \times 10^{-8}$  et  $1,39 \times 10^{-4}$  m/s.

Tableau 5 : Synthèses des informations et des résultats des essais slug

Ouvrage	1	2-3	2-6	3-3	3-6	4
Lithologie	Gravier et calcaire	Limon	Gravier et sable	Limon	Calcaire	Calcaire et gravier
Profondeur des crépines (m)	3-4	2-3	3-4	2-3	5-6	5-6
Variation de niveau d'eau ( $h_0$ ) lors de l'introduction du slug (m)	0,61	0,55	0,23	0,66	1,0	0,43
Durée de redescente (s)	1000	600	30	2500	30	110
Variation de niveau d'eau ( $h_0$ ) lors de l'introduction du retrait slug (m)	/	0,6	0,24	0,56	0,3	0,32
Durée de remontée (s)	/	600	30	1000	25	80
K décroissance du niveau d'eau (m/s)	$8,00 \times 10^{-8}$	$6,80 \times 10^{-7}$	$4,04 \times 10^{-5}$	$7,70 \times 10^{-7}$	$1,39 \times 10^{-4}$	$5,80 \times 10^{-6}$
K remontée niveau d'eau (m/s)	/	$3,63 \times 10^{-7}$	$6,69 \times 10^{-5}$	$5,00 \times 10^{-8}$	$2,87 \times 10^{-5}$	$4,70 \times 10^{-6}$

Une différence de conductivité hydraulique se marque en fonction de la lithologie dans laquelle l'ouvrage est crépiné. A l'exception du MP1, les ouvrages crépinés dans les calcaires ou les graviers présentent des valeurs de conductivité hydraulique plus importantes, de l'ordre de  $4.7 \times 10^{-6}$  à  $1.39 \times 10^{-4}$  m/s par rapport aux ouvrages crépinés dans les limons (2 à 3m de profondeur :  $5 \times 10^{-8}$  et  $7.7 \times 10^{-7}$  m/s).

De plus, une variation en fonction de la distance à la rivière semble également se marquer. Le micropiezomètre 4 présente des valeurs de conductivité hydraulique d'un ordre de grandeur inférieur par rapport à ceux crépinés à la même profondeur à proximité directe de la rivière (2-6 et 3-6). Cependant, un seul essai réalisé au MP4 ne permet pas de tirer des conclusions définitives en la matière.

On peut toutefois supposer que les terrains proches du cours d'eau sont localement plus perméables parce qu'ils sont régulièrement soumis aux variations de niveau d'eau du cours d'eau qui, par l'effet dynamique que cela engendre, tend à lessiver les particules plus fines qui colmatent en partie les pores et fractures aux seins desquels l'eau circule.

### **Quantification directe des flux d'eau souterraine par la méthode FVPDM**

L'essai 'FVPDM' est une méthode de quantification des flux d'eau souterraine par essai de traçage en puits unique développée par Brouyère *et al.* (2008). L'essai consiste en une injection continue d'un traceur dans un puits, à débit faible et contrôlé, avec un système de recirculation afin d'homogénéiser sa concentration sur toute la colonne d'eau (Figure 32a). Du fait de l'écoulement dans la nappe, l'eau souterraine transite à travers les crépines de l'ouvrage testé. Il en résulte une dilution du traceur qui est d'autant plus importante que les flux dans la nappe sont élevés. La concentration en traceur dans le puits est donc suivie au cours du temps. En vue de déterminer cette dilution et en déduire le flux d'eau souterraine dans la nappe, trois phases sont distinguées (Figure 32b) :

- Une phase transitoire au démarrage de l'essai avec une augmentation progressive de concentration en traceur ;
- Une phase stationnaire atteinte lorsqu'il y a équilibre entre l'injection et le lessivage du traceur ;
- Une phase de décroissance de la concentration de traceur après l'arrêt de l'injection du traceur.

A partir d'une solution analytique développée par Brouyère (2001), on peut ajuster la courbe d'évolution de concentration et calculer le débit d'eau souterraine transitant à travers les crépines ( $Q_{out}$ ). Connaissant la section d'écoulement au droit des crépines, on peut alors obtenir une estimation du flux de Darcy ( $q_d$ ) dans la nappe.

$$C_w(t) = \frac{Q_{in} \cdot C_{in} - (Q_{in} \cdot C_{in} - Q_{out} \cdot C_{w,0}) \cdot e^{-\frac{Q_{out}}{V_w}(t-t_0)}}{Q_{out}} \quad [4]$$

et

$$q_d = \frac{Q_{out}}{2 r_{scr} e_{scr}} \quad [5]$$

Avec :

$C_w(t)$  ( $ML^{-3}$ ) : concentration en traceur dans le puits,  $C_{in}$  ( $ML^{-3}$ ) : concentration en traceur dans la solution d'injection,  $C_{w,0}$  ( $ML^{-3}$ ) : concentration initiale en traceur dans l'ouvrage (avant l'injection),  $Q_{in}$  ( $L^3T^{-1}$ ) : débit d'injection du traceur,  $Q_{out}$  ( $L^3T^{-1}$ ) : débit de transit au travers des crépines de l'ouvrage,  $V_w$  ( $L^3$ ) : volume d'eau dans le puits (considéré comme constant),  $q_d$  ( $MT^{-1}$ ) : flux de Darcy,  $r_{scr}$  (M) : rayon du tubage crépiné,  $e_{scr}$  (M) : hauteur crépinée.

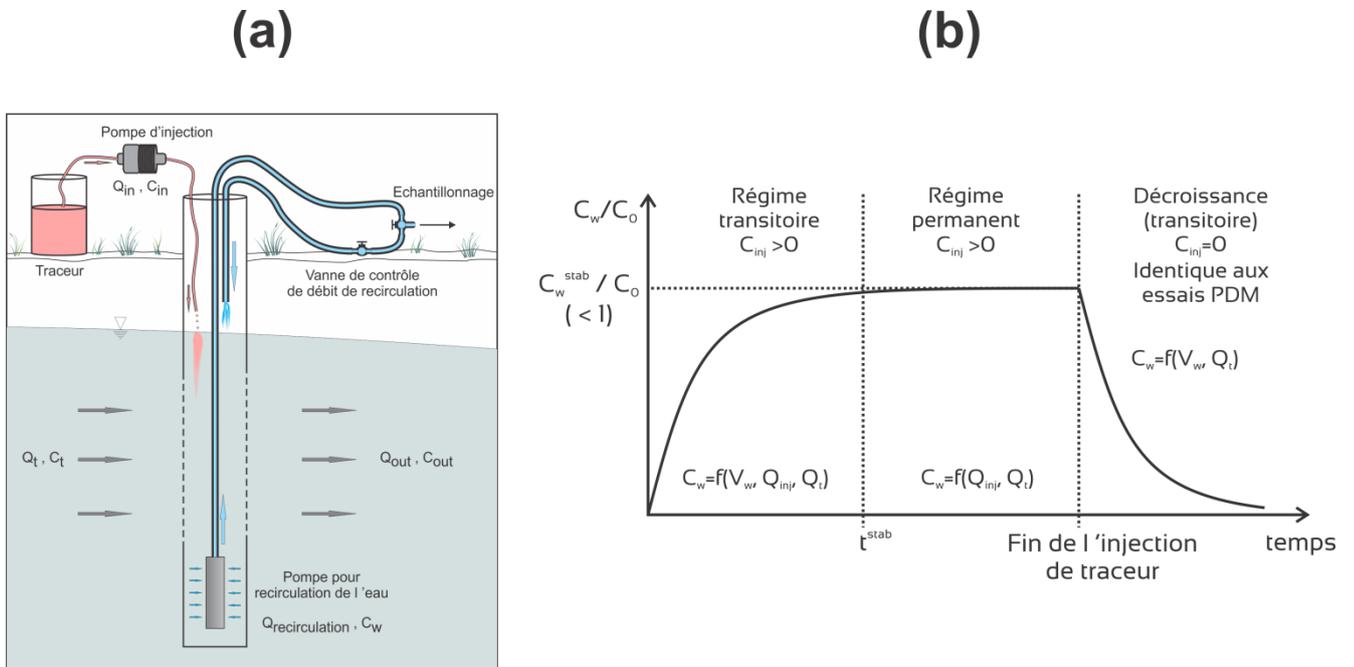


Figure 32 : (a) Description du matériel expérimental et (b) résultat théorique d'un essai FVPDM (Brouyère et al. 2008, modifié)

Un essai FVPDM a été réalisé sur le micropiézomètre 3-6 (Tableau 6). Différentes paramétrisations de la solution analytique ont été utilisées afin de représenter l'évolution des concentrations en traceur (Figure 33). Les débits de transit ainsi calculés sont de  $6.35 \times 10^{-6}$  et  $6.71 \times 10^{-6}$   $m^3/s$  tandis que les vitesses de Darcy sont de  $1.25 \times 10^{-4}$  et de  $1.32 \times 10^{-4}$   $m/s$  en fonction de la paramétrisation choisie. Ces valeurs représentent des écoulements relativement importants au droit du piézomètre.

Tableau 6 : Données techniques de l'essai FVPDM réalisé sur le MP3-6

Traceur	Masse de traceur injectée Minj	Volume d'injection Vinj	Concentration Cinj	Débit d'injection Qinj	Durée d'injection Tinj	Durée totale
Fluorescéine	mg	L	ppb	L/s	min	min
	2,37	11,4	208	1,00E-03	190	227

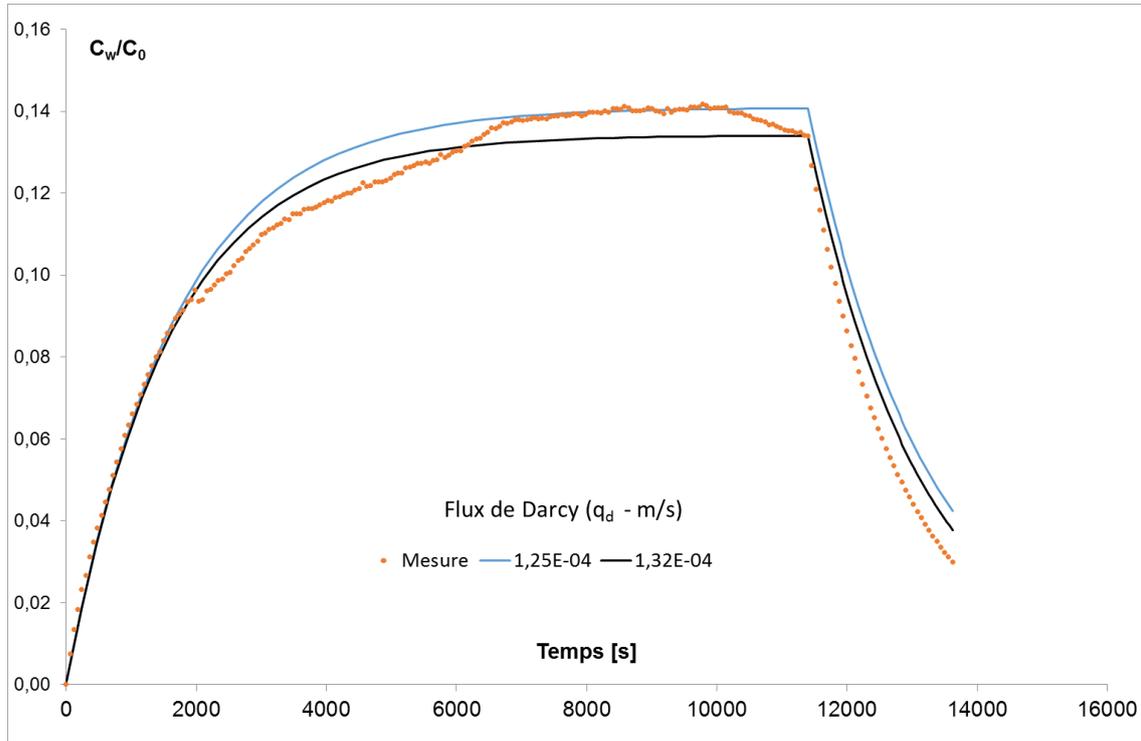


Figure 33 : Résultats expérimental et modélisé de l'essai FVPDM réalisé sur le MP3-6

#### 4.4.3. Calculs et comparaison des flux d'eau souterraine obtenus par les différentes méthodes mises en œuvre

Les méthodes mises en œuvre pour quantifier les écoulements souterrains se rapportent potentiellement à des échelles spatiales assez différentes (à l'échelle locale pour les slug-test et les essais FVPDM, à l'échelle de la section de rivière pour la différence de débit entre stations de jaugeages). Il n'en demeure pas moins que leur comparaison reste intéressante à faire. Pour que celle-ci soit possible, les résultats seront systématiquement ramenés à des flux de Darcy équivalent ( $q_d$ ) suivant des procédures de conversion décrites par la suite.

L'estimation du flux de Darcy équivalent ( $q_{slug}$ ) à partir des résultats des essais slug repose sur une application simple de la loi de Darcy :

$$q_{slug} = K \times grad(h) \quad [6]$$

- $K$  ( $LT^{-1}$ ) : Conductivité hydraulique déduites des essais slug ;
- $grad(h)$  : Gradient piézométrique estimé à partir des données piézométriques mesurées sur les micropiézomètres.

Le gradient piézométrique utilisé correspond au gradient existant entre le niveau d'eau dans l'ouvrage investigué et le niveau d'eau dans la rivière à proximité directe de l'ouvrage. Les flux de Darcy équivalent ont été calculés pour chacun des ouvrages testés lors des essais slug (Tableau 7). Les résultats présentent une gamme de valeurs comprise entre  $4.2 \times 10^{-10}$  et  $2.1 \times 10^{-5}$  m/s.

L'estimation du flux de Darcy à partir de l'essai FVPDM repose sur l'application de la relation :

$$q_{FVPDM} = \frac{Q_t}{2 r_{scr} e_{scr}} \quad [7]$$

- $q_d$  ( $MT^{-1}$ ) : flux de Darcy ;
- $Q_t$  ( $L^3T^{-1}$ ) : débit de transit au travers des crépines de l'ouvrage ;
- $r_{scr}$  (M) : rayon du tubage crépiné ;
- $e_{scr}$  (M) : hauteur crépinée.

Sur base des deux ajustements obtenus avec l'essai FVPDM, les valeurs de flux de Darcys obtenues sont  $1.25 \times 10^{-4}$  et  $1.32 \times 10^{-4}$  m/s (Tableau 7).

L'estimation du flux de Darcy équivalent à partir des données de jaugeage sur la rivière repose sur la formule suivante :

$$q_{\Delta Q} = \frac{\Delta Q_{aval}^{amont}}{S_{drainage}} \quad [8]$$

- $\Delta Q_{aval}^{amont}$  ( $L^3T^{-1}$ ) : différence de débit entre 2 stations ;
- $S_{drainage}$  ( $L^2$ ) : section de drainage de la rivière sur le tronçon investigué

Les données de débits médians mensuels précédemment décrits ont été utilisées. La section de drainage équivaut à la longueur du tronçon investiguée (distance entre les stations de jaugeage amont-aval) multiplié par la section mouillée. Vu les faibles profondeurs d'eau de la rivière, la section mouillée est assimilée à la largeur du cours d'eau (Figure 34). Ce calcul fait l'hypothèse que les arrivées d'eau sont homogènes sur l'ensemble de la section de rivière. Les débits médians mensuels entre les stations de State et de Jamagne ont été utilisés pour les calculs. Ces flux de Darcy sont relativement stables et varient entre  $1.7 \times 10^{-5}$  et  $3.6 \times 10^{-5}$  m/s (Tableau 7).

Tableau 7 : Résultats des flux de Darcy équivalents calculés selon les différentes méthodes

$q_{\text{slug}} \text{ (m/s)}$						$q_{\text{FVPDM}} \text{ (m/s)}$	$q\Delta Q_{\text{aval}}^{\text{amont}} \text{ (m/s)}$
MP1	MP2-3	MP2-6	MP3-3	MP3-6	MP4		
$4,3 \times 10^{-10}$	$1,2 \times 10^{-7}$	$7,1 \times 10^{-6}$	$1,2 \times 10^{-7}$	$2,1 \times 10^{-5}$	$2,7 \times 10^{-7}$	$1,25 \times 10^{-4}$	$1,69 \times 10^{-5}$
/	$6,4 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-5}$	$7,6 \times 10^{-9}$	$4,4 \times 10^{-6}$	$2,2 \times 10^{-7}$	$1,32 \times 10^{-4}$	$1,91 \times 10^{-5}$
							$2,50 \times 10^{-5}$
							$2,53 \times 10^{-5}$
							$2,54 \times 10^{-5}$
							$2,77 \times 10^{-5}$
							$2,87 \times 10^{-5}$
							$2,93 \times 10^{-5}$
							$3,42 \times 10^{-5}$
							$3,58 \times 10^{-5}$

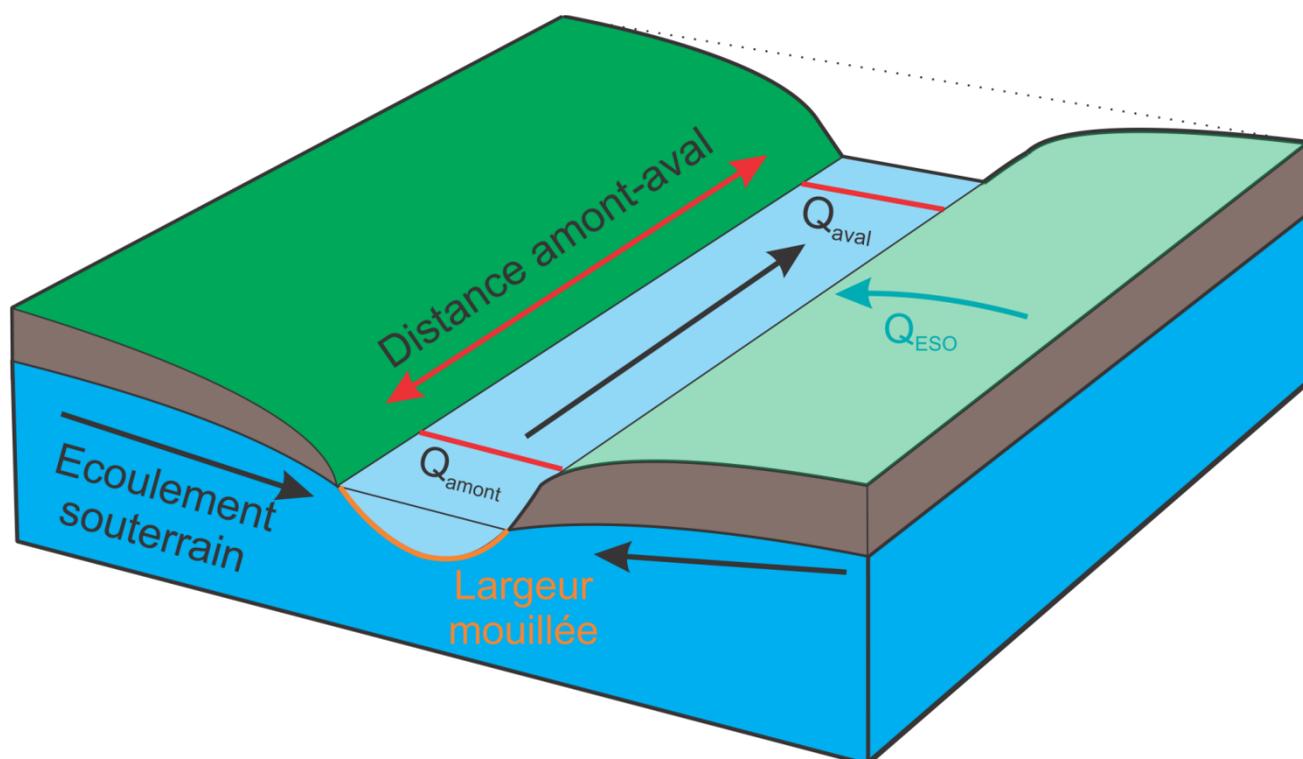


Figure 34 : Section de drainage pour le calcul du flux de darcy selon la méthode des différences de débits entre stations de jaugeage

L'ensemble de ces flux ont donc été comparés et présentent des valeurs calculées relativement similaires à l'exception des valeurs issues des essais de type slug (Figure 35). L'essai FVPDM (ouvrage MP3-6) présente les flux de Darcy les plus importants. Les valeurs calculées sur base de la différence

débit amont/aval est d'un ordre de grandeur inférieur par rapport au flux FVPDM. Les flux pour ces essais varient entre  $1.69 \times 10^{-5}$  et  $3.58 \times 10^{-5}$  m/s.

Au niveau des essais slug, si l'on tient compte de l'ensemble des valeurs basées, les résultats présentent une variation de 5 ordres de grandeurs. Cette large gamme de valeurs est avant tout le reflet de la variabilité des conductivités hydrauliques estimées à partir des essais slug (Tableau 5). Néanmoins, si on se focalise sur les slugs réalisés dans les micropiédomètres les plus profonds (MP2-6, MP3-6 et MP4), la différence des flux par rapport aux autres méthodes est déjà moindre.

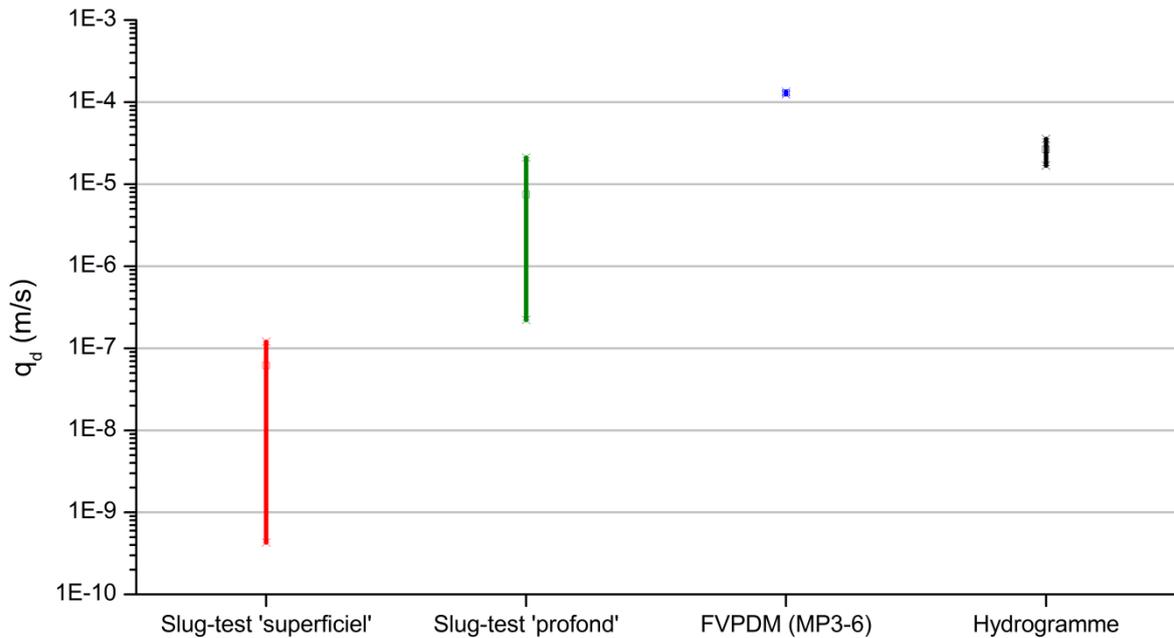


Figure 35 : Gamme de valeur des flux de Darcy (m/s) calculés selon les différentes investigations menées (les valeurs pour les essais slug profonds ont été séparées de ceux des essais superficiels)

## 5. Dynamique du nitrate entre nappe et rivière

Un des objectifs majeurs du projet ESO-ESU était d'acquérir des données et de nouvelles connaissances, basées sur de la mesure et de l'expérimentation, concernant la dynamique et les temps de transfert des polluants, en particulier le nitrate, dans le milieu souterrain et à l'interface nappe-rivière.

Une série d'investigations ont été menées sur le site expérimental d'Hodoumont en vue de mieux caractériser les temps de transfert dans la zone non saturée des formations calcaires (*D3.2 Rapport technique relatif à la réalisation [mode opératoire et premiers résultats] des essais de traçage dans le continuum sol – zone non saturée – eau souterraine – rivière*) et sur la distribution spatiale du nitrate dans ces formations aquifères (*D3.4 Campagne isotopique pour la discrimination des sources de pollution ponctuelles et diffuses*).

Dans le cadre des investigations menées ici sur les interactions nappe-rivière, une partie du travail s'est également concentré sur l'évolution des concentrations en nitrate dans les eaux de surface, eu égard à leur évolution dans les eaux souterraines. Ce chapitre du rapport décrit les résultats de ces travaux et les conclusions qui en ont été tirées.

### 5.1. Evolution temporelle des concentrations en nitrate dans les eaux de surface

Un monitoring des concentrations en nitrate a été effectué au niveau de 3 stations de suivi en eau de surface. Pour rappel, le suivi a été effectué à l'aide d'un échantillonneur automatique à l'exutoire du Triffoiy et à l'aide de sondes multiparamètres équipées de capteurs nitrate au niveau du Hoyoux Amont (Petit Avin et Petit Modave). Un échantillonnage ponctuel a été réalisé durant l'hiver 2013/2014 à l'exutoire du Triffoiy avant de devenir régulier (bihebdomadaire) à partir de juillet 2014. Moins de données sont donc disponibles pour l'hiver 2013/2014. Une analyse de l'ensemble des éléments majeurs a été effectuée sur les échantillons prélevés à l'exutoire du Triffoiy. Les évolutions de concentrations en nitrate sont présentées aux Figure 36, Figure 37 et Figure 38 avec les données hydrodynamiques (eau utile et débit du cours d'eau qui s'y rapportent).

De manière générale, les concentrations en nitrate sont relativement constantes au cours du temps (aux alentours de 22 mg/L) sur l'ensemble des stations et sont inférieures à la limite du bon état (25 mg/L). Un effet de dilution se marque lors des épisodes pluvieux/ de crues.

Les variations de concentration sont beaucoup plus irrégulières en hiver/début du printemps. Après l'hiver 2013-2014, une augmentation des concentrations (aux alentours de 24 et 27 mg/L) est observée aux stations de Petit Avin et de Petit-Modave. Cette augmentation n'est pas détectée au niveau du Triffoiy du fait du nombre insuffisant de mesures. Cette augmentation passagère est encore plus marquée lors de l'hiver 2014-2015, cette fois également sur le Triffoiy. Les concentrations en nitrate varient entre 27 et 30 mg/L et dépassent la limite du bon état. Le suivi s'est poursuivi jusque février 2016 à l'exutoire du Triffoiy. L'augmentation des concentrations en nitrate se marque à nouveau durant l'hiver 2015/2016.

Sur l'ensemble des deux hivers, au-delà de la cyclicité annuelle, une tendance générale à la hausse est observée (de l'ordre de 4-5 mg/L) mais cette tendance pluriannuelle n'est peut-être que le reflet d'un hiver 2014-2015 plus humide.

Il est également intéressant d'observer que le rapport nitrate/chlore (Figure 39), qui est pratiquement égal à un, augmente durant l'hiver 2014-2015. Cette période correspond à l'augmentation de la concentration en nitrate alors que la concentration en chlore reste plus ou moins constante tout au long de la période d'échantillonnage. Le chlore étant un élément relativement conservatif dans l'eau souterraine, l'augmentation du rapport  $\text{NO}_3/\text{Cl}$  est indicatif d'apports excédentaires de nitrate vers et via l'eau souterraine lorsque la nappe est rechargée en hiver, et ce relativement indépendamment de la dilution observée durant les crues.

Le nombre assez faible d'échantillons disponible à l'exutoire du Triffoy durant l'hiver 2013/2014 montre clairement l'importance d'avoir un réseau de suivi à haute fréquence afin d'acquérir des données représentatives de la dynamique des systèmes étudiés.

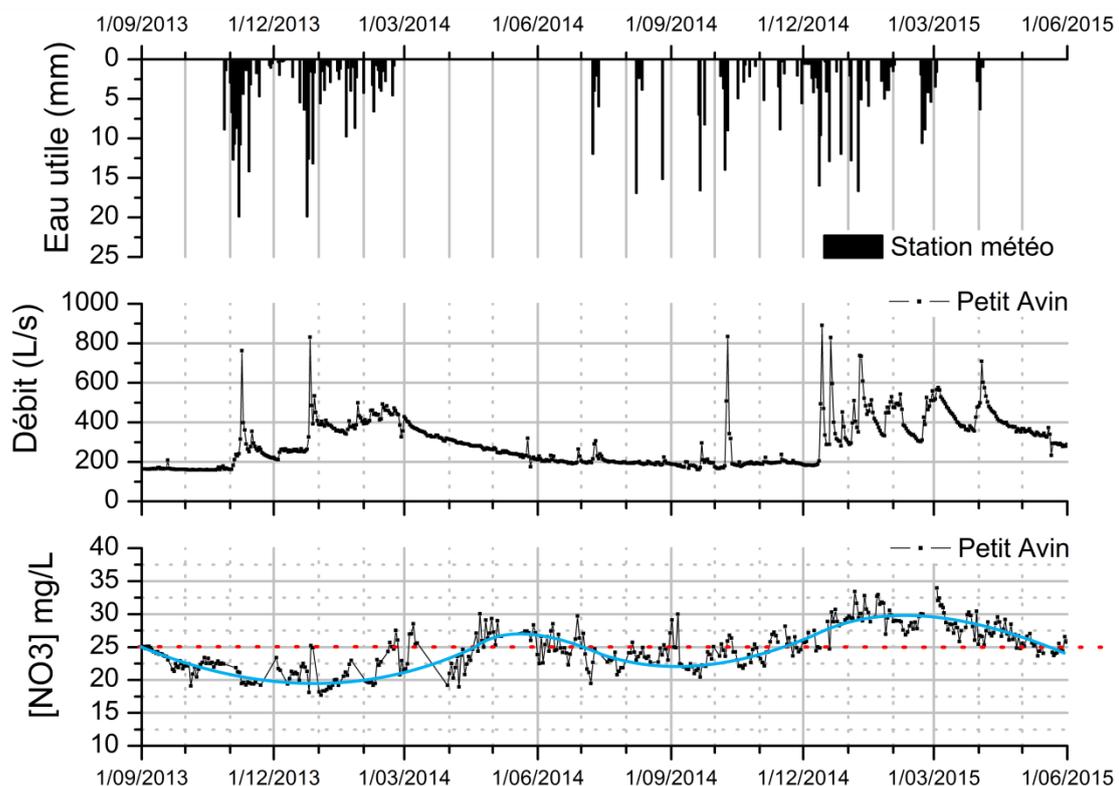


Figure 36 : Evolution des concentrations en nitrate en eau de surface et du débit à Petit-Avin ainsi que de l'eau utile (la limite du bon état, 25mg/L, est indiquée par le trait rouge tandis que la tendance générale est indiquée par le trait bleu)

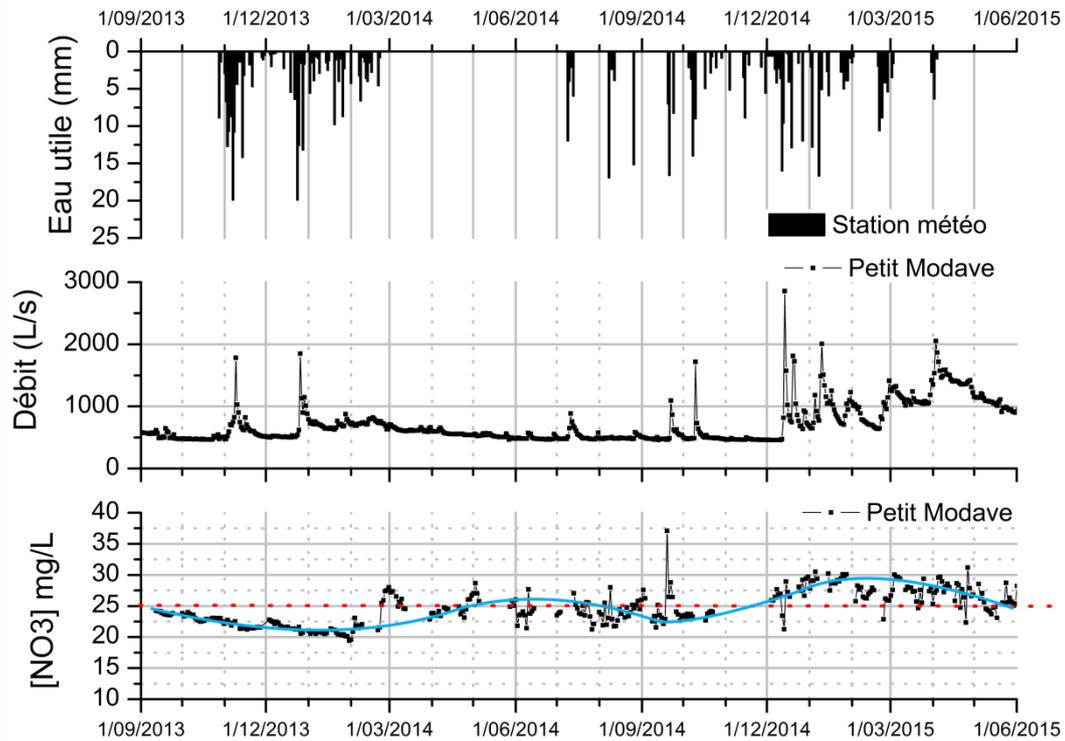


Figure 37 : Evolution des concentrations en nitrate en eau de surface à Petit Modave et du débit à l'exutoire du Hoyoux Amont (pas de station de jaugeage installée à Petit Modave) ainsi que de l'eau utile (la limite du bon état, 25mg/L, est indiquée par le trait rouge tandis que la tendance générale est indiquée par le trait bleu)

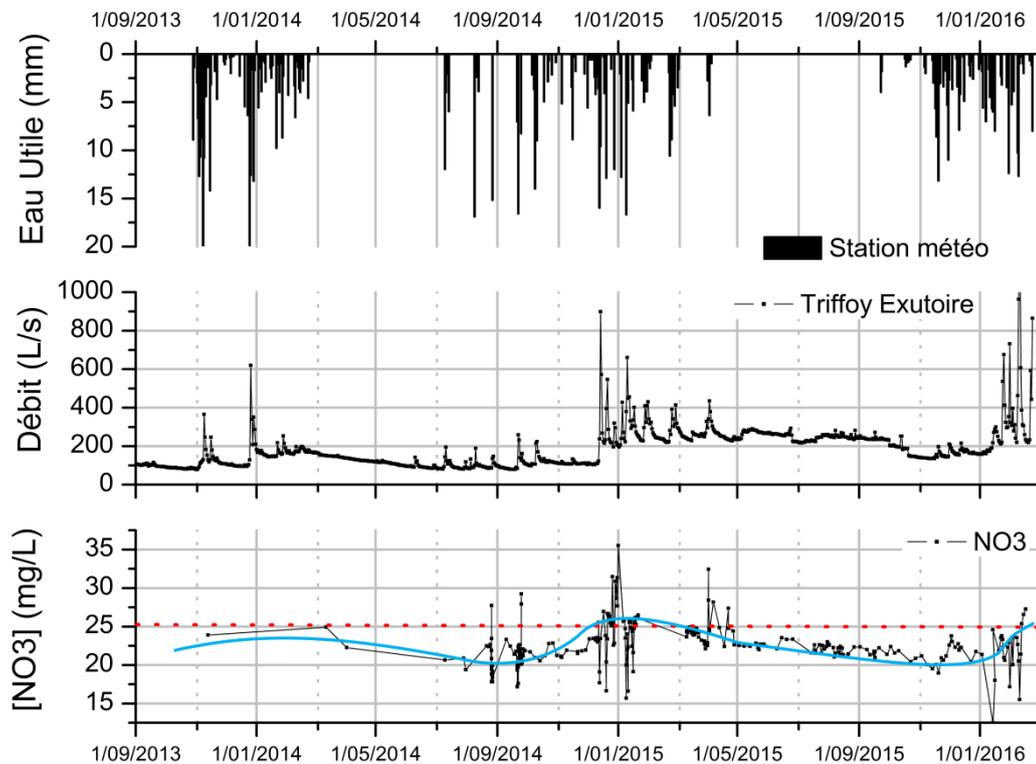


Figure 38 : Evolution des concentrations en nitrate en eau de surface et du débit à l'exutoire du Triffoy ainsi que de l'eau utile (la limite du bon état, 25mg/L, est indiquée par le trait rouge tandis que la tendance générale est indiquée par le trait bleu)

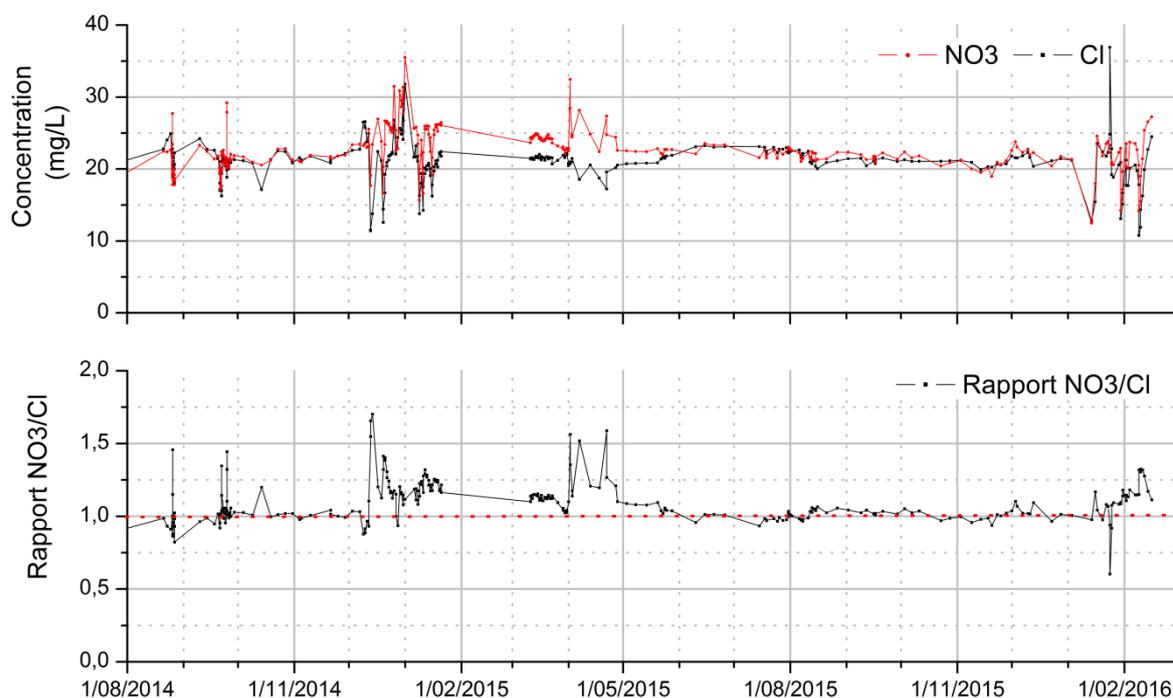


Figure 39 : Evolution des concentrations en nitrate et en chlore et de leur rapport en eau de surface à l'exutoire du Triffoy durant l'année 2014/2015

## 5.2. Evolution amont-aval des concentrations en nitrate dans les eaux de surface

Lors des différents profils en long réalisés sur le Triffoy (cf. §4.1.1), des échantillons d'eau ont été prélevés sur la rivière afin d'analyser les éléments majeurs. Ces prélèvements ont également permis de faire une caractérisation de l'évolution des concentrations en nitrate le long du cours d'eau. En complément à ces profils en eau de surface, un échantillonnage d'eau souterraine a également été réalisé lors de la campagne d'avril 2015.

Les résultats des évolutions de concentrations en nitrate dans les eaux de surface sont présentés à la Figure 40. Pour la campagne d'avril 2015, l'évolution des concentrations dans les eaux de surface et dans les eaux souterraine est disponible à la Figure 41. Une cartographie globale des concentrations en nitrate pour cette campagne d'avril est également disponible à la Figure 42.

Au point de vue des eaux de surface, chaque campagne de mesures indique une diminution des concentrations en nitrate d'amont en aval (entre Jamagne et State), d'environ 1 à 2 mg/L (Figure 40). Ces diminutions de concentrations semblent correspondre aux zones d'augmentation du débit du cours d'eau.

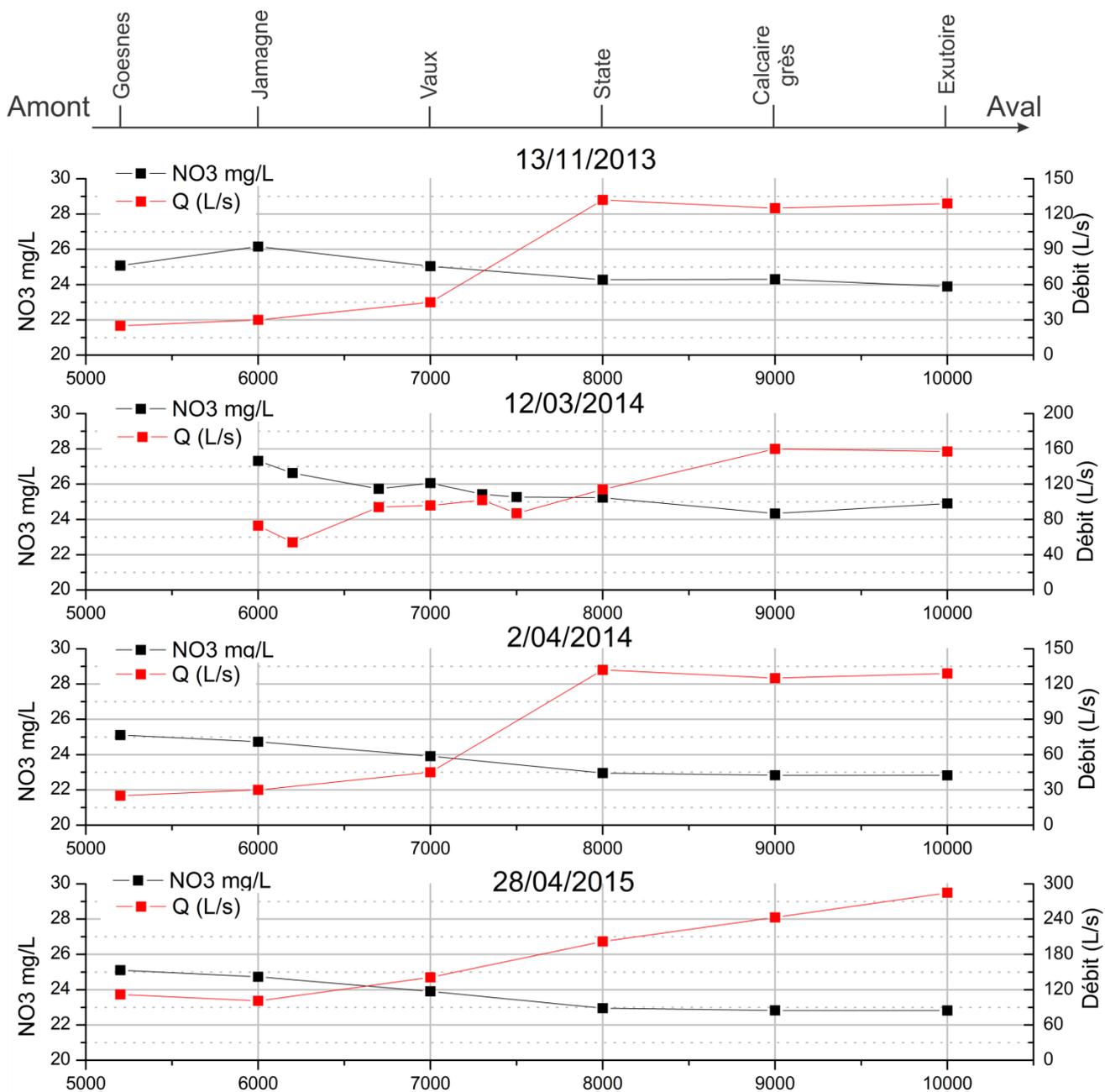


Figure 40 : Evolution amont-aval du débit du Triffoy et des concentrations en nitrate dans les eaux de surface

Au niveau des eaux souterraines, les analyses présentent également une diminution des concentrations en nitrate d'amont en aval (Figure 41 et Figure 42). En tête de bassin, le piézomètre d'Evelette présente une concentration de l'ordre de 35 mg/L. A Hodoumont, les concentrations en nitrate varient légèrement entre les ouvrages (autour de 32 mg/L). L'ensemble des ouvrages situés à l'aval du village de Jamagne présente des concentrations inférieures à 25 mg/L. De grandes différences de concentrations y sont cependant observées. Ainsi, le piézomètre State (situé en rive droite du secteur drainant) présente une concentration de l'ordre de 6 mg/L tandis que la concentration au niveau de la décharge de Jamagne (située en rive gauche) est de 23 mg/L. Les micropiézomètres présentent également des concentrations différentes, variant entre 4 mg/L au MP1 et 23 mg/L MP3-6.

L'ensemble de ces données montre que les concentrations en nitrate dans les eaux souterraines dans la partie amont sont supérieures à celles de la partie aval. Le cours d'eau étant majoritairement alimenté par les eaux souterraines, les concentrations en nitrate dans les eaux de surface suivent logiquement cette tendance. Les concentrations sont plus élevées dans la partie amont et diminuent lors de l'alimentation de la rivière par des eaux souterraines moins chargées en nitrate, essentiellement entre Jamagne et State.

Cette variation spatiale s'explique vraisemblablement par l'occupation du sol. Il y a en effet plus de terres cultivées dans la partie amont du bassin, sur les plateaux. A l'opposé, la partie aval du bassin, plus encaissée, comporte plus de zones boisées et de prairies.

Par ailleurs, les concentrations très basses observées sur certains micropiézomètres semblent indiquer qu'il pourrait y avoir un peu de dénitrification dans la partie du bassin où la nappe est localement captive dans les dépôts alluviaux.

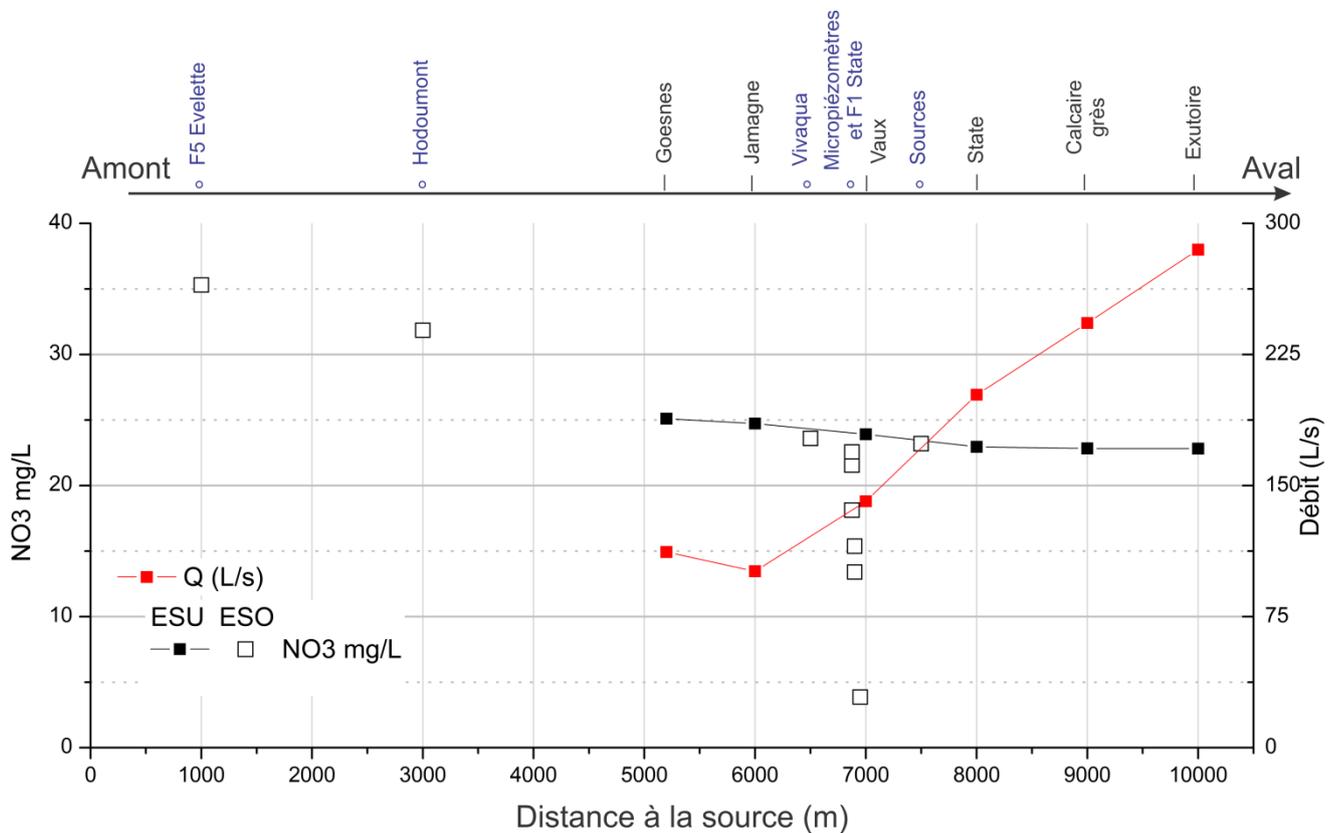


Figure 41 : Evolution amont-aval du débit du Triffoy et des concentrations en nitrate dans les eaux de surface et dans les eaux souterraines ; le nom des stations de mesure se trouve sur l'axe présenté en haut du graphe (avec un point flottant pour les eaux souterraines et un trait lié à l'axe pour les eaux de surface)

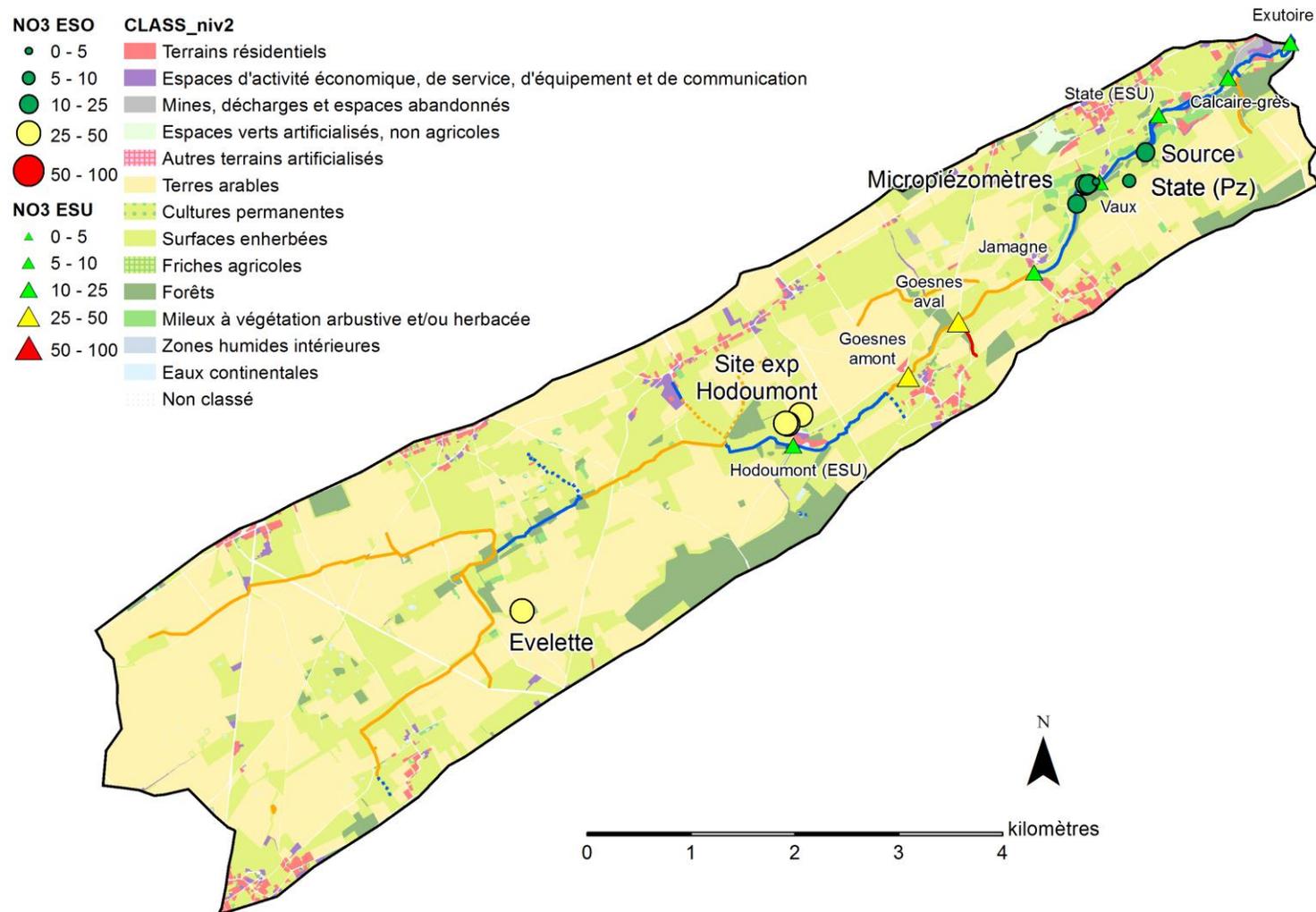


Figure 42 : Concentration en nitrate dans les eaux de surface et les eaux souterraines lors de la campagne de mai 2015 (données d'occupation du sol provenant de la Carte d'Occupation du Sol de Wallonie - SPW)

### 5.3. Informations complémentaires fournies par les mesures de nitrate réalisées sur le site expérimental d'Hodoumont

Même si aucun suivi systématique n'y avait été envisagé (la finalité du site expérimental était toute autre), des échantillons d'eau ont régulièrement été prélevés au puits de pompage d'Hodoumont (P1), notamment pendant les essais de traçage, et analysés pour les éléments majeurs.

Les résultats pour le nitrate (Figure 43) montrent des concentrations qui varient globalement entre 27 et 32 mg/L avec toutefois une forte augmentation en hiver (jusqu'à 45 mg/L). La chronique disponible est cependant incomplète entre octobre 2014 (campagne hydrochimie régionale) et le début des essais de traçage de l'hiver 2014/2015.

L'examen conjoint des chroniques d'eau utile et de nitrate montrent toutefois des augmentations fortes des concentrations en nitrate lors des gros événements pluvieux de fin janvier 2015 et fin février/début mars 2015 (cf. zone encadrée en rouge). Par la suite, les concentrations en nitrate diminuent progressivement pour retrouver des niveaux d'avant l'hiver (aux alentours de 30 mg/L). Une augmentation des concentrations en nitrate se marque à nouveau durant le mois de février 2016.

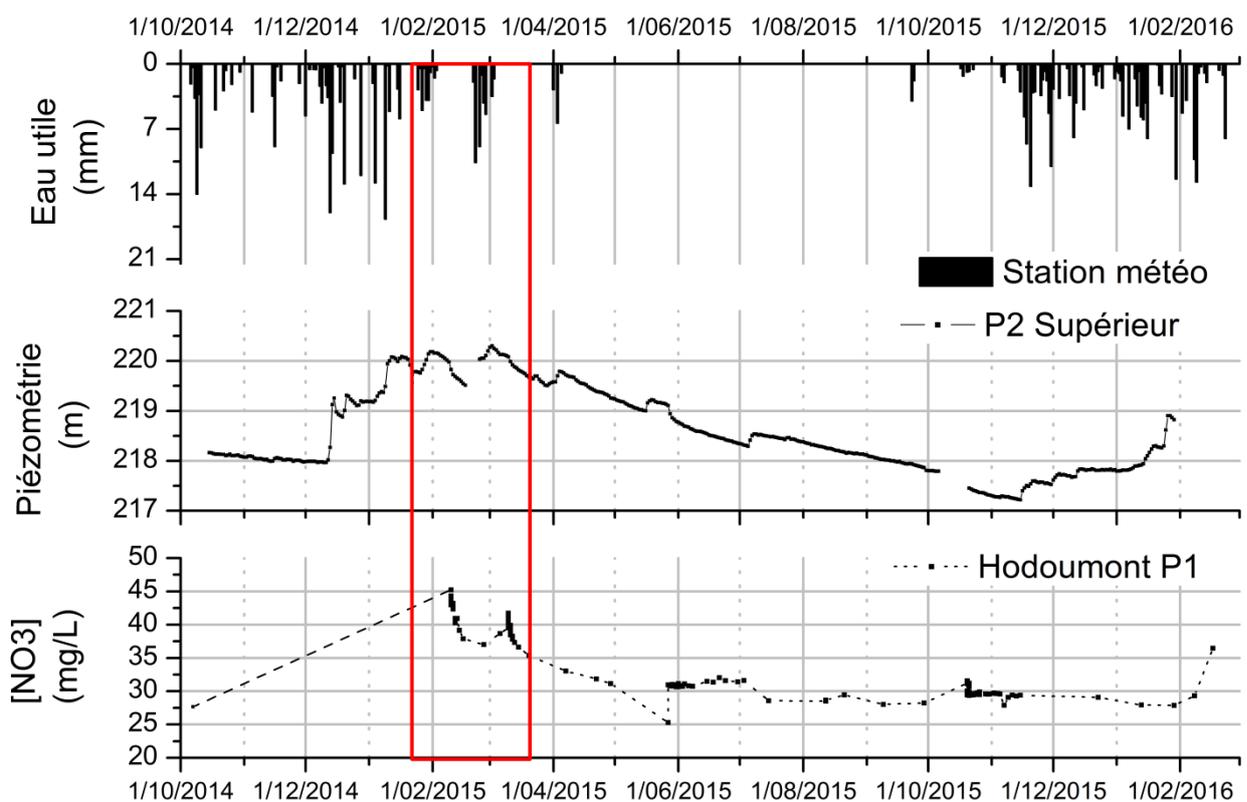


Figure 43 : Evolution de la piézométrie au P2 SUP et des concentrations en nitrate au P1 à Hodoumont en fonction de l'eau utile

Vu l'augmentation des concentrations en nitrate observées dans les eaux souterraines durant l'hiver 2014-2015 au P1 à Hodoumont, un échantillonnage régulier a également été effectué sur le piézomètre P2 à partir du 23/12/2015 (Figure 44). Pour rappel, cet ouvrage présente un double

équipement et est crépiné à 2 profondeurs différentes, à savoir 8-18 m de profondeur pour la partie supérieure (P2 Sup) et 30-45 m de profondeur pour la partie profonde (P2 Prof). Ce double équipement permet donc d'échantillonner la nappe aux 2 profondeurs des crépines et d'obtenir ainsi des échantillons provenant de différentes profondeurs de la nappe.

Les concentrations en nitrate présentent globalement peu de variation jusque fin janvier 2016. Une légère diminution des concentrations est observée au niveau du P1 et du P2 Prof tandis qu'elles restent stables pour le P2 Sup. Une augmentation nette des concentrations se marquent début février tant au niveau du P1 (augmentation de 1 mg/L) que du P2 Sup (augmentation de 2 mg/L). Cette augmentation de concentration fait suite à de gros événements pluvieux. Aucune variation des concentrations en nitrate n'est observée à cette période dans la partie profonde de la nappe (P2 Prof). L'augmentation des concentrations se poursuit mi-février et se marque cette fois sur l'ensemble des ouvrages, y compris donc dans la partie profonde de la nappe.

Ces données montrent clairement qu'une différenciation des concentrations en nitrate se marque entre la partie supérieure et la partie profonde de la nappe. La partie supérieure de la nappe réagit en premier lieu et un décalage de l'ordre de 15 jours semble se marquer avant que la partie profonde de la nappe ne réagisse.

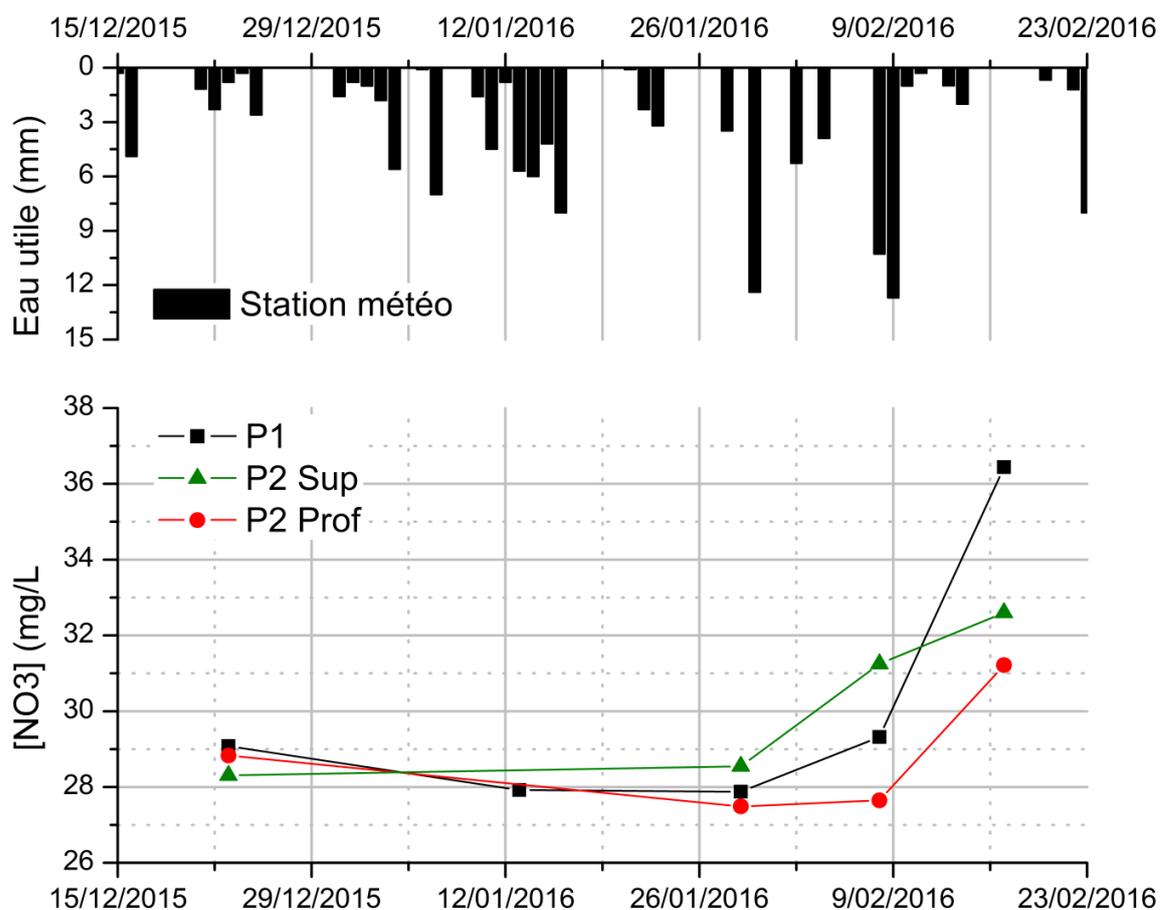


Figure 44 : Evolution de l'eau utile et des concentrations en nitrate entre les différents ouvrages du site expérimental d'Hodoumont

#### 5.4. Synthèse globale et interprétation relative au comportement du nitrate dans les eaux souterraines et à l'interface nappe-rivière

De manière générale, à l'échelle du temps du projet (30 mois) les concentrations en nitrate sont relativement constantes dans les eaux souterraines. Il ne faut toutefois pas perdre de vue qu'une augmentation des concentrations est observée au cours des dernières décennies. Cette évolution sur le long terme est illustrée à la Figure 45 par les données nitrate disponibles pour les 2 captages du bassin du Triffoy (Vivaqua Jamagne et Galerie CILE). Cette figure indique toutefois qu'une inversion de tendance semble se marquer depuis le début des années 2000. On y remarque une fois encore que les concentrations sont plus basses ( $\pm 4$  mg/L de différence) en fin de bassin (captage de la CILE) par rapport à l'amont (captage de Jamagne).

Les niveaux de concentrations restent cependant assez élevés ( $\sim 35$  mg/L dans le Triffoy –  $\sim 25$  mg/L dans le Hoyoux) même si des concentrations nettement plus basses peuvent être observées, notamment en fond de vallée (entre 4 et 23 mg/L dans les micropiezomètres du Triffoy).

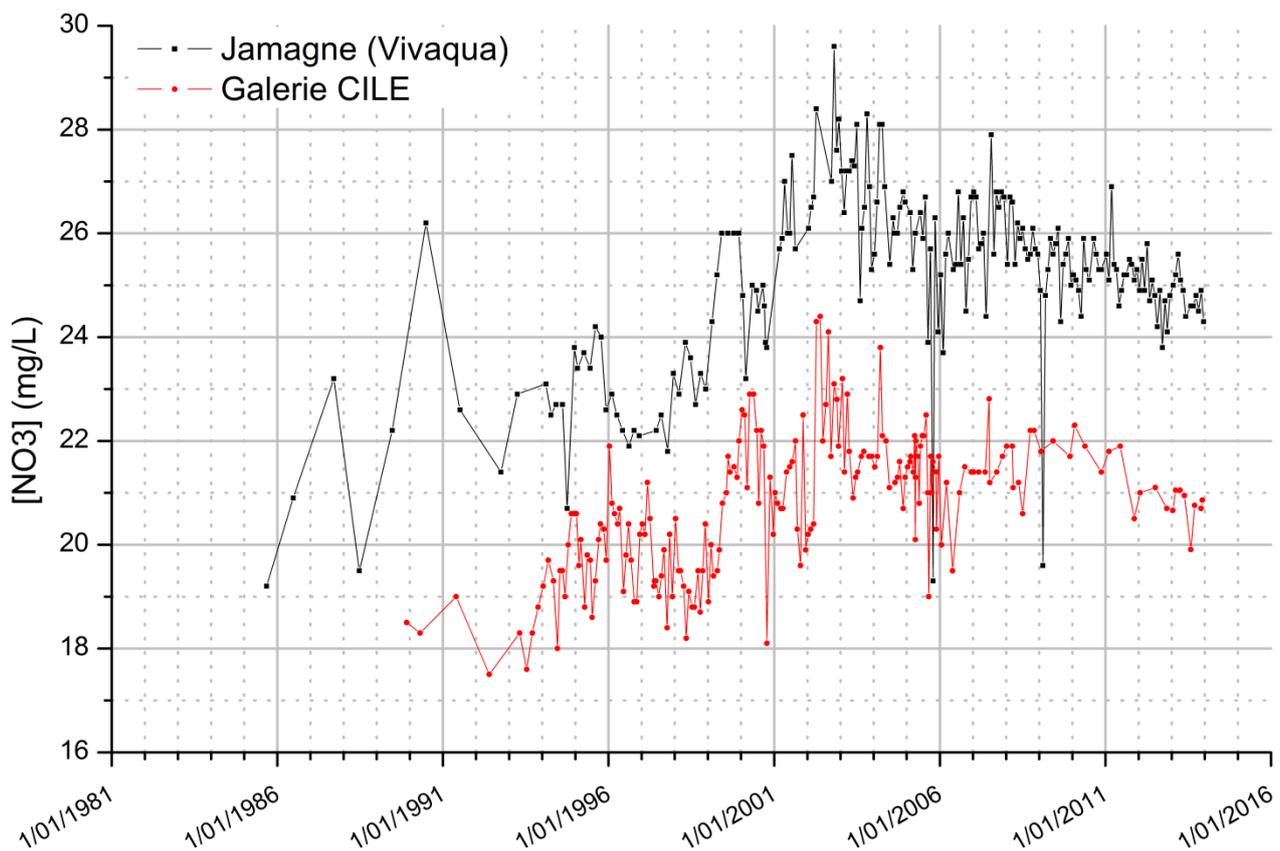


Figure 45 : Evolution des concentrations en nitrate dans les eaux souterraines des captages de Jamagne (Vivaqua) et de Royseux (CILE)

Au niveau des eaux de surface, les concentrations en nitrate sont également relativement constantes au cours du temps et ce, à des valeurs proches de la limite (25 mg/L) mais conformes avec le bon état de la masse d'eau. Ces concentrations varient substantiellement par rapport à ce niveau constant lors

des épisodes de crues où une dilution des concentrations par l'eau de ruissellement est observée. A l'inverse, une augmentation des concentrations en nitrate et du rapport nitrate/chlore est assez systématiquement observée durant l'hiver. Un lessivage du nitrate résiduel des sols agricoles s'effectue lors de la reprise de l'infiltration pendant les épisodes pluvieux hivernaux. Cette infiltration amène du nitrate vers les eaux souterraines (mis en évidence par les analyses effectuées sur les ouvrages à Hodoumont) lesquelles alimentent ensuite les eaux de surface, provoquant augmentation quasi immédiate des concentrations en nitrate dans le cours d'eau.

Aucune indication d'apports ponctuels de nitrate n'a été détectée dans les eaux de surface. Il est donc difficile de juger de l'importance de la composante anthropique sur la contamination en nitrate. Il semble toutefois clair, au vu de la concordance des concentrations et de la simultanéité des évolutions, que l'essentiel de la contamination en nitrate des cours d'eau est d'origine agricole.

## 6. Conclusions et perspectives

L'ensemble des mesures de terrain ont permis de caractériser les échanges nappe-rivière sur base de méthodes variées et essentiellement basées sur des données de terrain (mesures de débits, de température, de flux, hydrochimie, physico-chimie, tests hydrogéologiques ...).

Les conclusions et perspectives sur l'ensemble des données et observations disponibles sont proposées en trois temps :

- la proposition d'un modèle conceptuel global décrivant la dynamique de l'eau et des solutés (nitrate) dans des bassins calcaires du Condroz en interaction avec les eaux de surface ;
- un retour sur les moyens d'investigations mis en œuvre et leur adéquation pour mettre en évidence une série de processus relationnels entre compartiments ;
- des perspectives visant à élargir le champ d'application des études nappe-rivière à d'autres contextes hydrologiques et hydrogéologiques.

### 6.1. Proposition d'un modèle conceptuel décrivant la dynamique des interactions nappe-rivière

Sur les deux bassins étudiés (Triffoy et Hoyoux amont), l'hydrodynamique des cours d'eau est fortement influencée par la composante eau souterraine (écoulement de base). Sur les deux années de monitoring, on constate en effet que les cours d'eau présentent des signatures essentiellement « eau souterraine », avec l'écoulement de base qui domine sur une majeure partie de l'année et qui n'est supplanté par d'autres composantes que lors des événements pluvieux hivernaux (chose plus marquée durant l'hiver 2014-2015 que lors de l'hiver 2013-2014). D'un point de vue de l'hydrochimie des cours d'eau, on retrouve encore essentiellement la signature de l'eau souterraine, avec une minéralisation relativement élevée (reflétée notamment par la conductivité électrique) et assez constante sur une majeure partie de l'année, à l'exception une fois encore des épisodes de crues. L'échantillonnage régulier mené à l'exutoire du Triffoy confirme ce constat, avec des compositions très constantes en éléments majeurs.

Les résultats obtenus montrent également que la dynamique des échanges d'eau et de solutés est très grande aux interfaces sol/zone non saturée – nappe et nappe – rivière. Les observations de terrain indiquent que, lors des précipitations hivernales, l'eau s'infiltré très rapidement et atteint quasi instantanément la nappe d'eau souterraine dans les calcaires (par contraste à ce qui est observé dans d'autres contextes géologiques, voire même dans la zone d'étude au droit des poches de sable). A l'interface nappe – rivière, les données disponibles indiquent que les zones de transfert d'eau peuvent être très localisées et que des corrélations fortes sont observées entre la dynamique des cours d'eau et de la nappe (variations quasi synchrones des niveaux d'eau).

Un suivi régulier des concentrations en nitrate en eau de surface et en eau souterraine a été effectué. De manière générale, les eaux souterraines sont relativement contaminées mais conformes aux normes de qualité relatives à leurs principaux usages, avec un bruit de fond de 20 à 30 mg/L NO<sub>3</sub> relativement constant (à l'échelle de la période d'observation du projet, à savoir deux cycles

hydrologiques). Les cours d'eau qui drainent ces eaux souterraines montrent des teneurs en  $\text{NO}_3$  également relativement constantes du printemps à l'automne (hors périodes de crues). Durant la période hivernale, on observe toutefois une augmentation significative des concentrations en  $\text{NO}_3$  dans les eaux souterraines et dans le cours d'eau.

Sur base de ces données, un modèle conceptuel de transfert d'eau et du nitrate est proposé (Figure 46). De manière générale, le cours d'eau est alimenté par la décharge relativement continue des eaux souterraines au cours de l'année hydrologique (Figure 46(a) cas d'un cours d'eau drainant). Cette décharge des eaux souterraines s'effectue soit via un drainage diffus le long du cours d'eau soit via des venues d'eau ponctuelles et/ou des sources dans les berges. Cette alimentation continue du cours d'eau est associée à une concentration en nitrate globalisant l'ensemble des eaux d'infiltration du bassin au cours de l'année. Les temps de transfert sont assez difficiles à déterminer et l'isotopie semble a priori peu adaptée.

Lors de la reprise de l'infiltration, un lessivage du nitrate résiduel des sols agricoles s'effectue pendant les épisodes pluvieux hivernaux. Ces apports d'eau rechargent en partie la nappe mais circulent également en crête de nappe, vraisemblablement par la frange superficielle plus altérée des formations calcaires. Ces apports d'eau plus chargés en nitrate se déversent de manière rapide dans les eaux de surface provoquant une augmentation des concentrations en nitrate dans le cours d'eau.

Dans le cas de figure d'une rivière perchée (Figure 46(b) cas d'une rivière perdante), le monitoring des interactions nappe-rivière est plus complexe car l'obtention des données est plus compliquée que dans le cas de rivières drainantes. Il est donc également plus difficile de faire la part entre la recharge de la nappe venant directement du cours d'eau et celle venant des précipitations. Dans le cas de portions de rivières perchées étudiées ici (ex : Torrent de Bonne, ruisseau d'Havelange), on peut cependant déduire des faibles écoulements observés en surface que l'essentiel de l'eau utile s'infiltré dans ces sous-bassins, sans véritable apport additionnel provenant du cours d'eau.

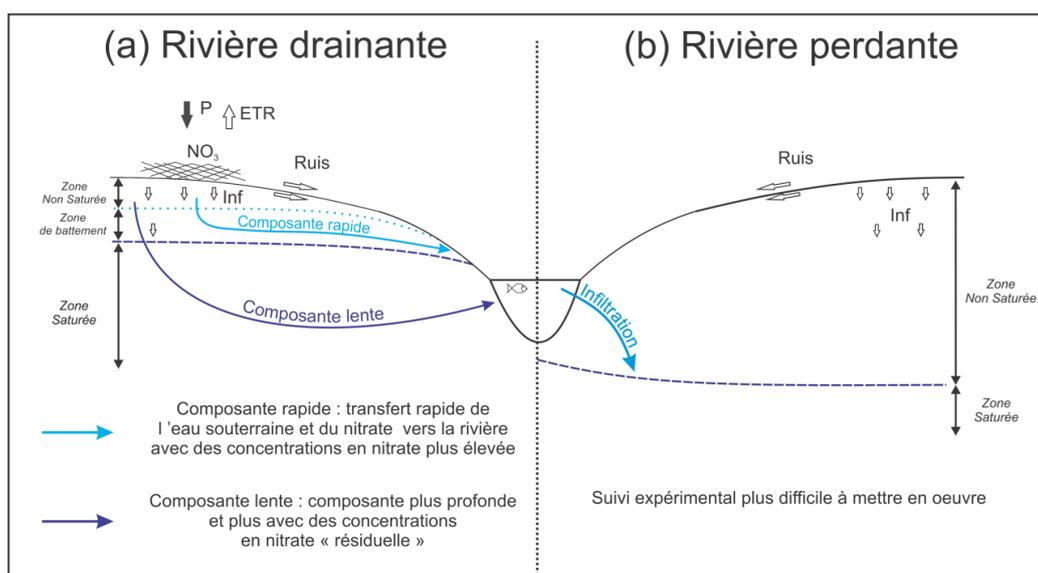


Figure 46 : Modèle conceptuel des transferts d'eau et du nitrate dans les bassins étudiés (a) rivière drainante (b) rivière perdante

Sur base de toutes les informations récoltées et du modèle conceptuel établi, la Figure 47 présente les échanges entre compartiments sous la forme d'un logigramme. Les méthodes appliquées lors du projet afin de caractériser/quantifier les échanges seront développées au point suivant et sont synthétisés sous forme de numéro au niveau du logigramme. Au niveau de la recharge de la nappe, un suivi régulier du niveau d'eau et de la température apporte des informations quant à la dynamique d'infiltration des précipitations. Dans le cadre de rivière perchée ou lorsque des inversions de gradient entre la nappe et la rivière sont à priori possible, le monitoring de la conductivité électrique est également intéressant. Dans tous les cas, un nivellement précis (en altitude) de l'ensemble des points de mesure (station de jaugeage, hauteur d'eau de la rivière à proximité de chaque (micro)piézomètre, ...) est nécessaire.

Au niveau des interactions nappe-rivière, les méthodes appliquées sont adaptées par rapport à l'objectif de mise en évidence, de caractérisation et de quantification des échanges d'eau (cf. chapitre 3).

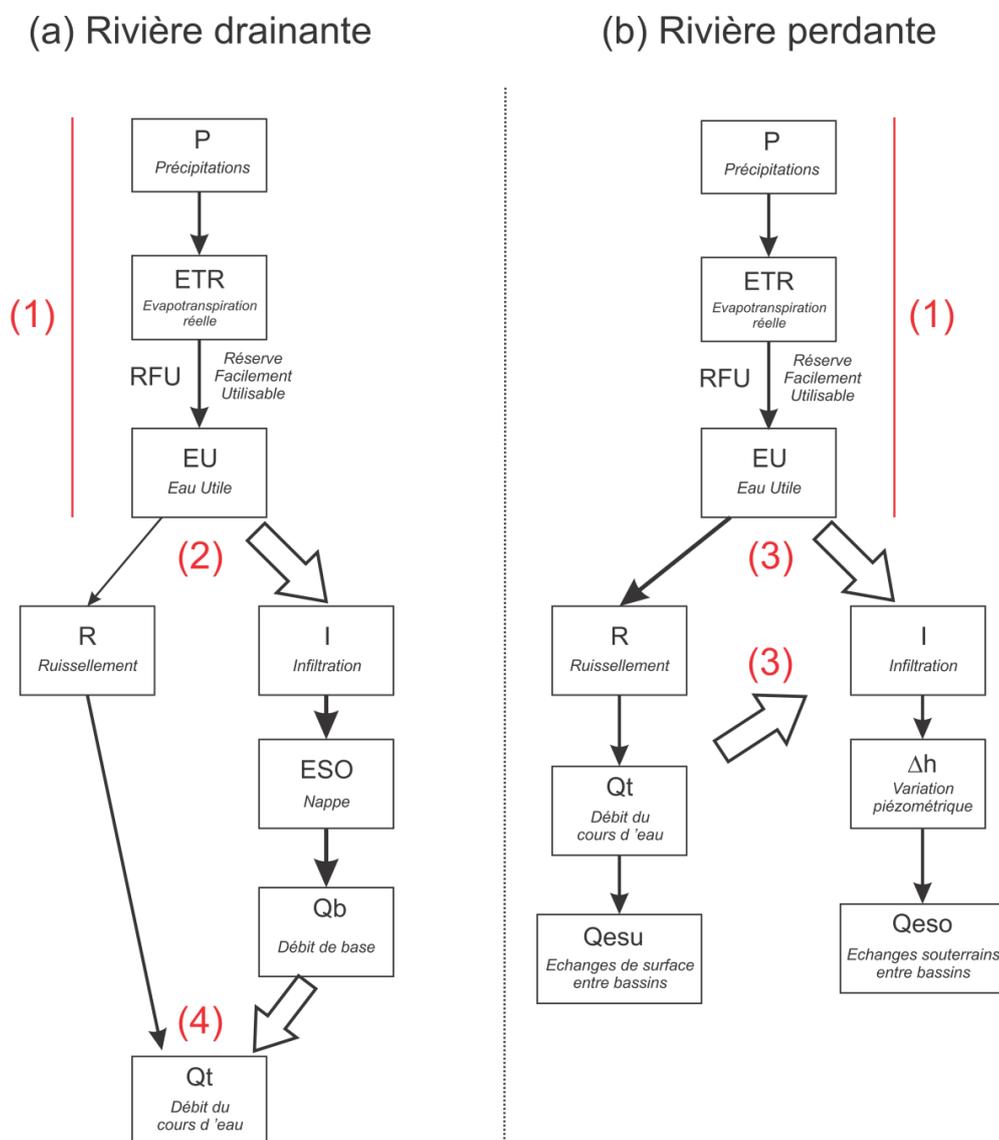


Figure 47 : Logigramme du fonctionnement d'un bassin type du projet, les numéros, développés au §6.2, correspondent aux méthodes appliquées afin de caractériser les échanges entre compartiments

## **6.2. Discussion sur les moyens d'investigations mis en œuvre et de leur adéquation par rapport aux objectifs du projet**

Les méthodes d'investigations appliquées pour caractériser les échanges entre compartiments sont reprises sous une forme synthétique de numéros (1, 2, 3 et 4) à la Figure 47. Elles sont décrites pas à pas dans la suite de cette partie.

En premier lieu, un suivi météorologique adapté est primordial afin d'obtenir les données d'entrées d'eau dans les bassins étudiés (1). Ces données sont nécessaires pour la réalisation des bilans hydrologiques (calcul de l'évapotranspiration réelle et de la réserve facilement utilisable) mais également pour quantifier l'eau disponible pour le ruissellement et l'infiltration (eau utile). Dans le cadre du projet, une station climatique complète a été mise en place dans le bassin du Triffoiy. Cette station mesure de manière horaire la température de l'air, la pluviométrie, l'humidité relative de l'air, la radiation solaire, la direction et la vitesse du vent. L'ensemble de ces données est nécessaire afin d'utiliser l'équation de Penman-Montheith pour calculer l'évapotranspiration de manière journalière. Ce calcul au pas de temps journalier est indispensable dans le cadre de bassin présentant une réaction rapide aux précipitations. La différence de précipitations mesurées entre les différentes années de suivi des données climatiques montrent également l'importance d'un suivi à long terme afin de s'affranchir d'années climatiques 'extrêmes' et non représentatives.

La séparation de l'eau utile en ses composantes de ruissellement et d'infiltration (2) a essentiellement été effectuée sur base du suivi de la piézométrie et de la température de l'eau souterraine ainsi que de la conductivité électrique de l'eau de surface. A nouveau, au vu de la rapidité d'infiltration des eaux de précipitations, un suivi à haute fréquence temporelle, au minimum journalier, de la piézométrie est nécessaire afin de rendre compte de la dynamique d'échanges sol-nappe.

Dans le cas de figure d'une rivière perchée, le monitoring des interactions est plus compliqué car il est difficile de faire la part entre la recharge de la nappe venant directement du cours d'eau et celle venant des précipitations (3). Dans ce cas, une analyse combinée des variations de hauteur d'eau et de température permet d'affiner l'analyse même s'il n'est pas toujours évident de tirer des conclusions définitives. L'apport des données de conductivité électrique permet de confirmer ou non l'infiltration d'eau venant de la surface.

Dans le cas de rivière drainante, de nombreuses méthodes, complémentaires entre elles, ont été effectuées afin de quantifier l'importance du débit de base sur le débit total du cours d'eau (4). Ces méthodes ont permis de mettre en évidence les échanges nappe-rivière (jaugeages successifs, profils chimiques et physico-chimiques) et de différencier les apports diffus et ponctuels d'eau souterraine (mesures de température par DTS). La dynamique temporelle des échanges a été mise en évidence par le monitoring de traceur des eaux souterraines (dont la température, la conductivité électrique et l'hydrochimie). La quantification de ces échanges s'est effectuée grâce à des méthodes directes (différence de débit amont-aval) et indirectes (mesures de flux au voisinage du cours d'eau par FVPDM et slug-test).

Une séparation d'hydrogramme a été réalisée sur base des mesures de conductivité électrique de l'eau afin de calculer les différentes composantes intervenant dans les flux d'eau des bassins (débit de base, ruissellement, infiltration ...). Un calcul et un développement d'indicateurs des interactions nappe/rivière a été effectué sur base de ces données et sera développé dans le livrable D4.1 (*'Développement d'indicateurs des interactions entre eaux souterraines et eau de surface'*).

Au point de vue soluté (nitrate), une caractérisation a été effectuée sur base d'échantillonnage en eau de surface et en eau souterraine. Le suivi temporel des concentrations tant en eau de surface qu'en eau souterraine montre clairement l'importance d'adapter la fréquence d'échantillonnage à la dynamique du système étudié. Un échantillonnage au minimum hebdomadaire est nécessaire dans le cadre de bassin réactif comme ceux étudiés dans le projet. De plus, l'utilisation de sondes automatiques munies de capteurs nitrate nécessitent une calibration sur base de nombreux échantillons manuels (quasi journaliers) dans lesquels le nitrate est mesuré par une technique spectrophotométrique. Au vu du travail que cela représente, un échantillonnage manuel est peut-être suffisant pour un suivi de la contamination des eaux de surface. En effet, en ce qui concerne le nitrate, une acquisition de données à haute résolution temporelle (horaire par exemple) ne se justifie pas vraiment ; une acquisition de valeurs journalières, voire bi-hebdomadaires, serait suffisante pour l'étude des processus impliqués dans les variations de concentration en eau de surface.

### **6.3. Perspectives visant à élargir le champ d'applications des études nappe-rivière à d'autres contextes**

Comme mentionné précédemment, l'hydrodynamique des deux bassins étudiés est essentiellement influencée par la composante eau souterraine, avec l'écoulement de base qui domine sur une majeure partie de l'année et qui n'est supplanté par d'autres composantes que lors des événements pluvieux hivernaux. Ce comportement se reflète par une minéralisation relativement élevée (conductivité électrique) et assez constante sur une majeure partie de l'année. Ceci nous positionne donc dans un cas où l'écoulement de surface est majoritairement dépendant des eaux souterraines. La méthodologie de séparation du débit de base du débit total sur base de la conductivité électrique, utilisée dans les bassins étudiés, est applicable dans des contextes de bassins plus ruisselants où l'écoulement de base représente une moindre proportion du débit total du cours d'eau. Ceci nécessite l'acquisition des données de conductivité électrique aux points de mesure du débit ainsi qu'au niveau des composantes de débit de base et de ruissellement. Cette méthodologie reste d'application tant qu'un contraste de conductivité existe entre les différentes composantes du débit du cours d'eau (ruissellement et débit de base).

Les cas de figure de rivières perdantes ont clairement montré que l'acquisition de données est plus complexe que dans le cas de rivières drainantes. Dans ces contextes, un suivi amont-aval de l'évolution du débit sur le tronçon perdant est nécessaire. Les investigations de terrain doivent être programmées en fonction des conditions météorologiques afin de s'assurer de la présence d'eau dans la rivière. En parallèle à cette quantification des pertes d'eau, un suivi des variations de hauteur d'eau, de température et de la conductivité électrique dans la nappe au niveau du secteur perdant apportera des informations sur la dynamique d'infiltration de ces eaux de surface.

## 7. Bibliographie

- Bouwer, H., & Rice, R.C., 1976, A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells, *Water Resources Research*, 12 (3).
- Brouyère, S., 2001, Etude et modélisation du transport et du piégeage des solutés en milieu souterrain variable saturé, Faculté des Sciences Appliquées, laboratoire de géologie et de géologie de l'ingénieur, d'Hydrogéologie et de Prospection géophysique, Université de Liège, Liège, Belgique, p.640.
- Brouyère, S., Batlle-Aguilar, J., Goderniaux, P., & Dassargues, A., 2008, A new tracer technique for monitoring groundwater fluxes: The Finite Volume Point Dilution Method, *Journal of contaminant hydrology*, 95 (3), p.121-140.
- Butler, J. J. J., 1998, The design, performance and analysis of slug tests, CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Cook, P. G., 2015, Quantifying river gain and loss at regional scales, *Journal of Hydrology*, 531, p.749-758.
- European Commission, 2015, Technical report on groundwater associated aquatic ecosystems, Technical report n°9, Unit C1 Water.
- Fleckenstein, J. H., Krause, S., Hannah, D. M., Boano, F., 2010, Groundwater-surface water interactions: New methods and models to improve understanding of processes and dynamics, *Advances in Water Resources*, 33 (11), p.1291-1295.
- Kalbus, E., Reinstorf, F., & Schirmer, M., 2006, Measuring methods for groundwater-surface water interactions: a review, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 10 (6), p.873-887.
- McCallum, J. L., Cook, P. G., Berhane, D., Rumpf, C., & McMahon, G. A., 2012, Quantifying groundwater flows to streams using differential flow gaugings and water chemistry, *Journal of Hydrology*, 416, p.118-132.
- Selker, J. S., Thevenaz, L., Huwald, H., Mallet, A., Luxemburg, W., Van De Giesen, N., Stejskal, M., Zeman, J., & Parlange, M. B., 2006, Distributed fiber-optic temperature sensing for hydrologic systems, *Water Resources Research*, 42 (12).
- Sophocleous, M., 2002, Interactions between groundwater and surface water: the state of the science, *Hydrogeology journal*, 10(1), p.52-67.
- Winter, TC., Harvey, JW., Franke, OL., Alley, WM., 1998, Groundwater and surface water – a single resource, US Geological Survey, Circular 1139

## 8. Annexes

### 1. Unités hydrogéologiques

	AQUICLUDE A NIVEAUX AQUIFERES DU HOULLER
	AQUIFERE DES CALCAIRES DU CARBONIFERE
	AQUIFERE, AQUITARD ET AQUICLUDE DE L'HASTARIEN
	AQUIFERE DES GRES DU FAMENNIEN
	AQUICLUDE DU FAMENNIEN - FRASNIEN
	AQUIFERE DES CALCAIRES DU GIVETIEN - FRASNIEN
	AQUITARD A NIVEAUX AQUICLUDES DU DEVONIEN INFERIEUR

Annexe 1 : Légende des unités hydrogéologiques utilisées dans les documents cartographiques

### 2. Informations concernant les piézomètres suivis dans le cadre du projet

Annexe 2 : Synthèse des informations concernant les micropiézomètres

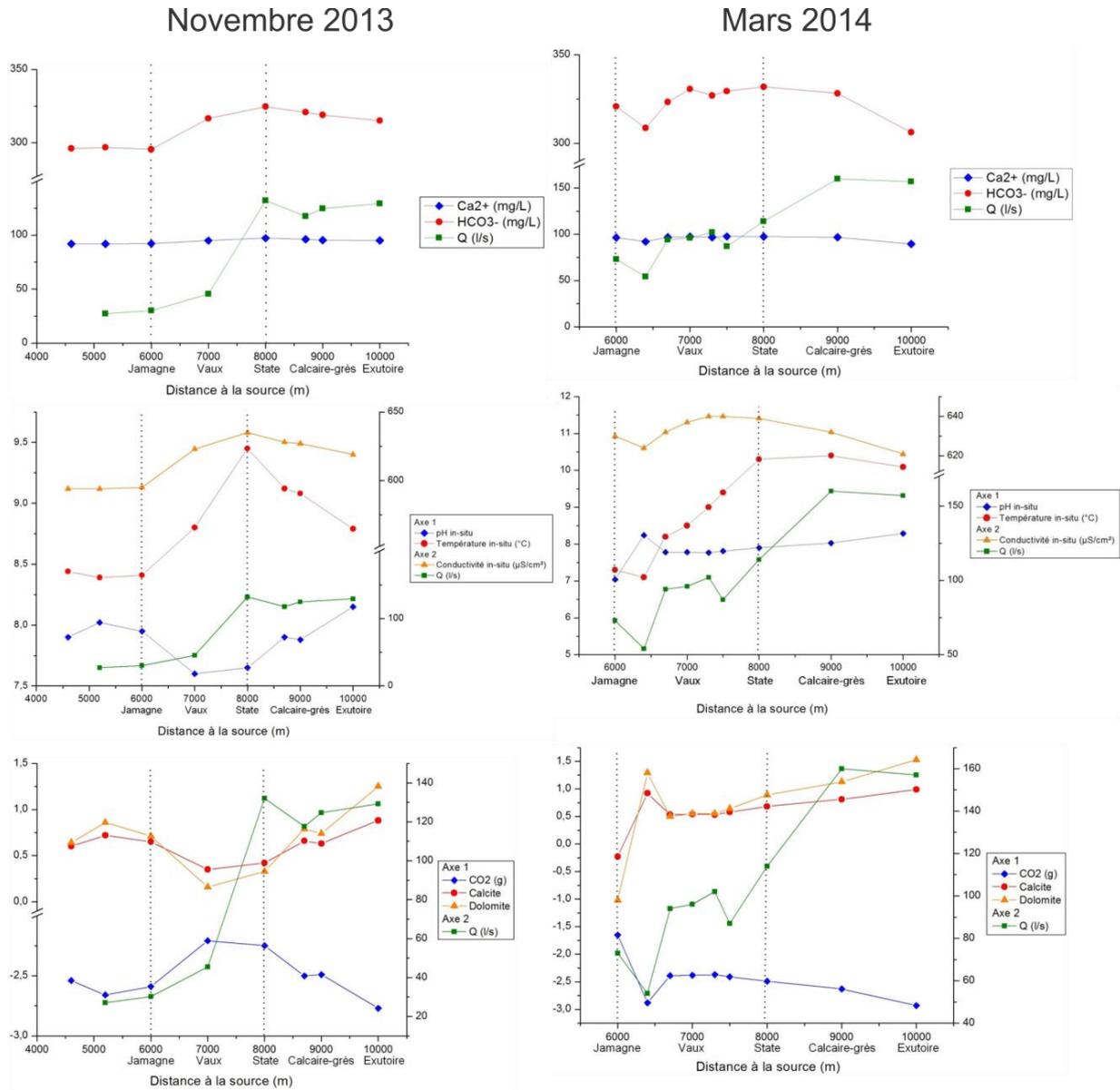
Nom	Bassin	X	Y	Z tubage	Prof	H min (m)	H max (m)	Lithologie principale	Période couverte	Mode de suivi	Fréquence
MP1	Triffooy	211856	127856	185,7	5	184,5	185,1	Gravier	04/2015 - 02/2016	Automatique	10min
MP2-3	Triffooy	211781	127829	186,5	3	184,9	185,5	Limon	04/2015 - 02/2016	Automatique	10min
MP2-6	Triffooy	211781	127829	186,4	4	184,9	185,5	Gravier et sable	10/2014 - 02/2016	Automatique	10min
MP3-3	Triffooy	211768	127823	186,2	3	185,2	186,0	Limon	04/2015 - 02/2016	Automatique	10min
MP3-6	Triffooy	211768	127823	186,5	6	185,2	186,0	Calcaire	04/2015 - 02/2016	Automatique	10min
MP4	Triffooy	211751	127837	186,2	6	185,4	186,1	Calcaire et gravier	04/2015 - 02/2016	Automatique	10min

Annexe 3 : Synthèse des informations concernant les piézomètres suivant durant le projet

Nom	Bassin	X	Y	Z tubage	Z sol	Profondeur	H min (m)	H max (m)	Lithologie principale	Période couverte	Mode de suivi	Fréquence
F1 CILE	Triffof	213488	128459	~ 210	/	71	157,8	165,5	Calcaire	06/2006 - 06/2015	Manuel	Bimensuel
F1 State	Triffof	212181	127889	211,8	211,2	42	184,13	187,39	Calcaire	06/2014 - actuel	Automatique	Horaire
Puits Jamagne	Triffof	210790	127159	218,8	218,28	/	193,11	195,64	/	06/2014 - 06/2015	Automatique	Horaire
P1 Hodoumont	Triffof	208897	125544	224,9	224,3	32,5	217,01	219,77	Calcaire	10/2014 - 01/2016	Automatique	10min
P2 Hodoumont	Triffof	208876	125543	225,4	224,8	45	217,78	220,3	Calcaire	10/2014 - 01/2016	Automatique	10min
P5 Hodoumont	Triffof	208994	125658	228,4	227,9	26	214,46	217,28	Sable	10/2014 - 01/2016	Automatique	10min
F5 Evelette	Triffof	206338	123763	245,4	244,1	65	230,1	236,0	Calcaire	10/2010 - actuel	Automatique	Journalière
PA1 AMONT	Hoyoux Amont	214482	121242	236,8	236,0	21,5	226,61	232,16	Calcaire	06/2014 - 01/2016	Automatique	Horaire
PA1 AVAL	Hoyoux Amont	214794	121529	229,4	228,8	18	224,06	225,49	Calcaire	06/2014 - 01/2016	Automatique	Horaire
F12 Clavier	Hoyoux Amont	218444	122476	262,3	Taque au sol	53	223,3	237,0	Calcaire	03/2011 - actuel	Automatique	Journalière
PP2	Hoyoux Amont	216720	126210	210,25	/	/	200,32	205,45	/	01/2013 - 06/2015	Manuel	Mensuel
PT 04	Hoyoux Amont	214380	119250	212,25	/	15	194,25	194,85	/	01/2013 - 06/2015	Manuel	Mensuel
PP 05	Hoyoux Amont	214370	118610	250,94	/	/	213,94	214,94	/	01/2013 - 06/2015	Manuel	Mensuel
PT 03	Hoyoux Amont	213310	124150	220	/	/	190,97	194,26	/	01/2013 - 06/2015	Manuel	Mensuel
PZ 1	Hoyoux Amont	215788	126080	237,2	236,6	70	184,64	187,17	Calcaire	01/2013 - 06/2015	Manuel	Mensuel
PZ6	Hoyoux Amont	216088	125150	205,5	Taque au sol	34	191	192,52	Calcaire	01/2013 - 06/2015	Manuel	Mensuel
PZ8	Hoyoux Amont	214904	126403	221,2	220,6	65	173,13	173,34	Calcaire	01/2013 - 06/2015	Manuel	Mensuel
PZ10	Hoyoux Amont	214608	125543	227	226,5	62	184,93	186,14	Calcaire	01/2013 - 06/2015	Manuel	Mensuel
F6 Tinlot	Hoyoux Amont	221473	128117	266,8	266,4	63	210,4	225,54	Calcaire	03/2011 - actuel	Manuel	Journalière

### 3. Profils débimétriques et physico-chimiques

Différents profils ont été réalisés durant la convention. Des mesures de débit, de physico-chimie et un échantillonnage en vue d'analyse des éléments majeurs ont été réalisés lors de chaque campagne.

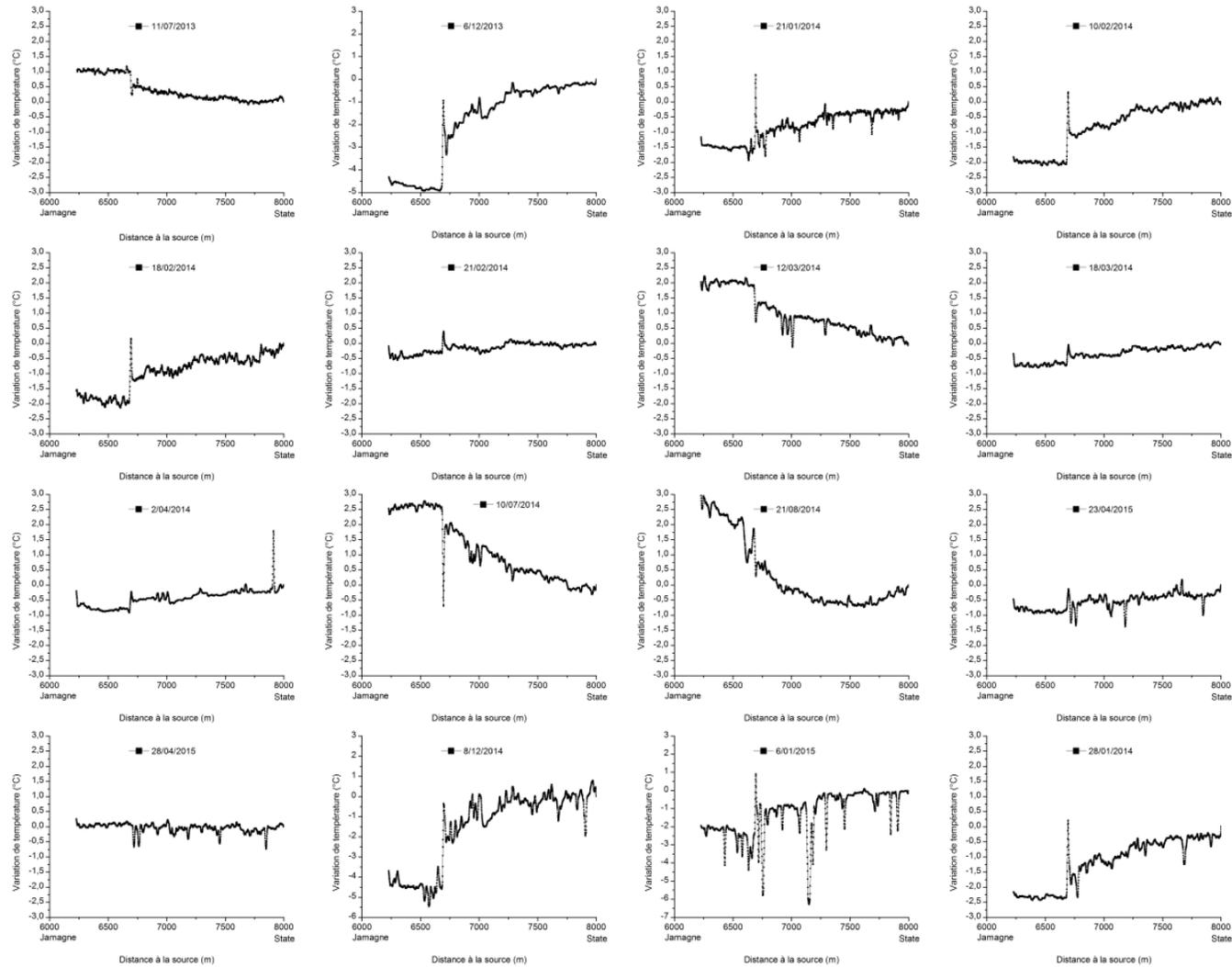


Annexe 4 : Exemple de 2 autres campagnes de profils en long sur Le Triffoy (débimétriques, physico-chimique et hydrochimiques)

Annexe 5 : Résultats de débits (L/s) des différents profils en long réalisés sur le Triffoiy

Distance à la source (m)	5200	6000	6200	6500	7000	7300	7500	8000	9000	10000
Date	Goesnes	Jamagne	Début DTS	Béton	Vaux	Ferme	Bief	State	Calcaire-grès	Exutoire
2013_07_11		38			87			98	131	127
2013_10_02		6						84	87	91
2013_11_13	25	30			45			132	125	129
2014_02_18		86	67		82			155	177	174
2014_03_05		64	57	90	123	125	123	134	177	163
2014_03_12		73	54	94	96	102	87	114	160	157
2014_03_18	38	56			96			147	160	148
2014_04_02	55	49	44	75	57	90	82	103	127	138
2015_04_28	112	101			141			202	243	285

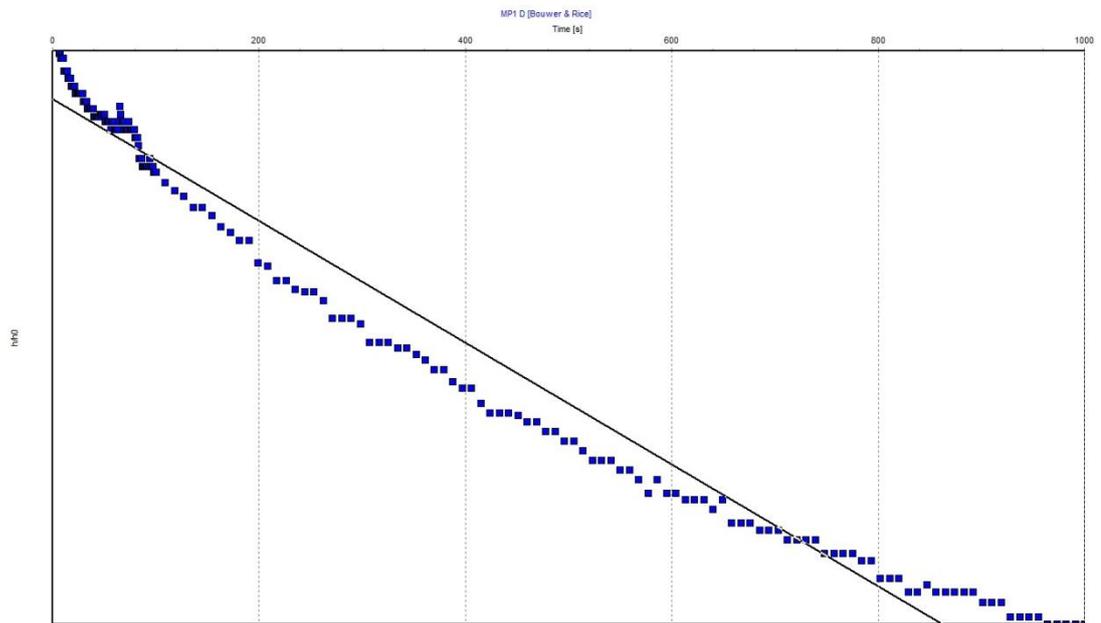
## 4. Profil de température réalisé par Distributed Temperature Sensing



Annexe 6 : Résultats des différents profils de température réalisés par DTS

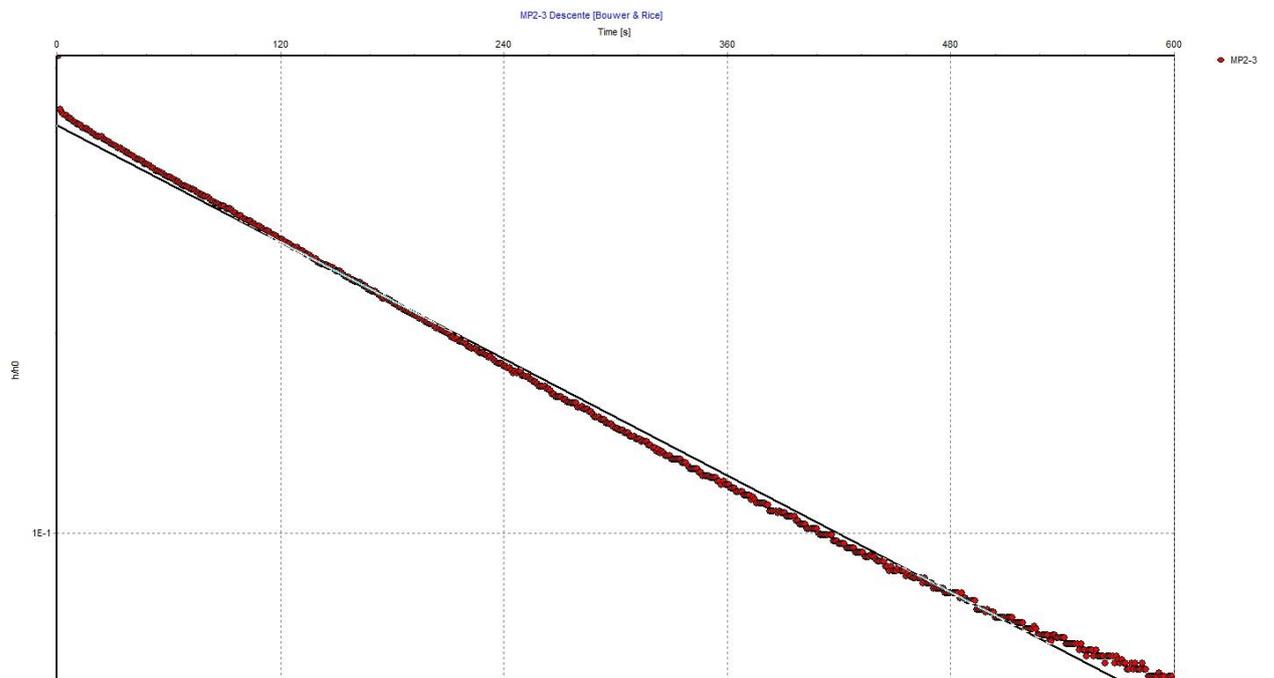
## 5. Slug-tests

Interprétation de l'ensemble des slug-tests réalisés sur les micropiézomètres



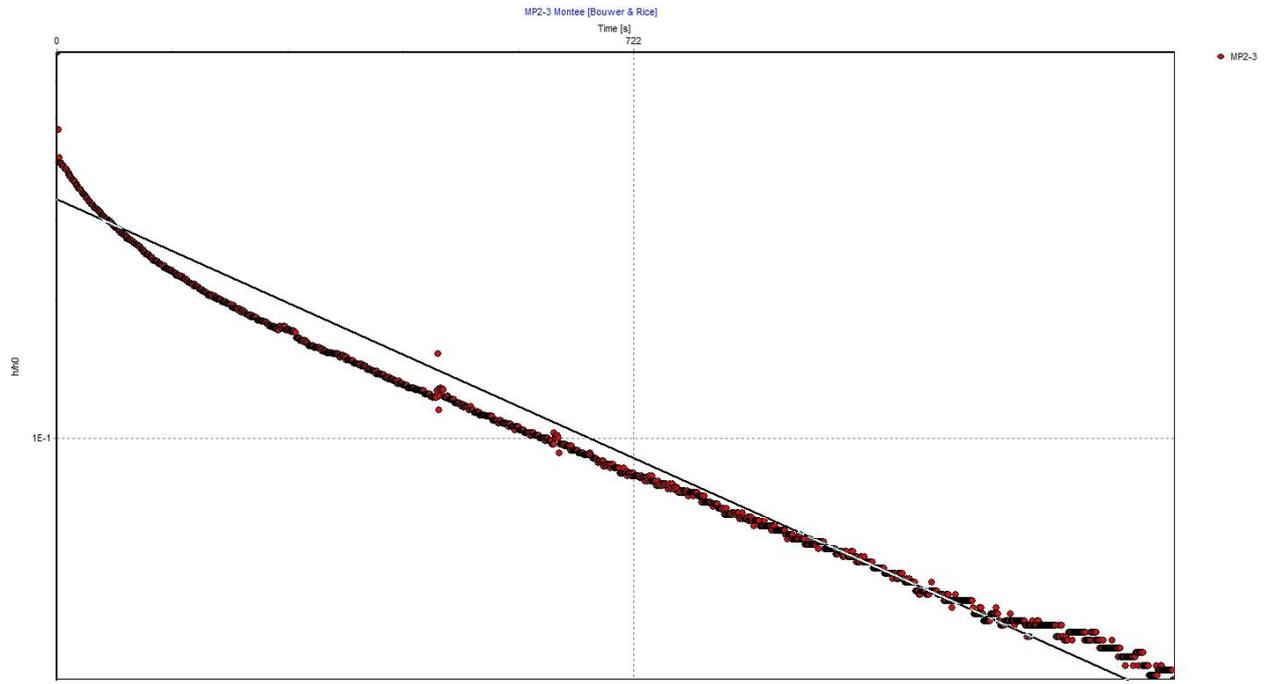
Conductivity:  $6.11E-8$  m/s

**Annexe 7 : Interprétation des résultats du slug-test sur le micropiézomètre 1 (redescente du niveau d'eau)**



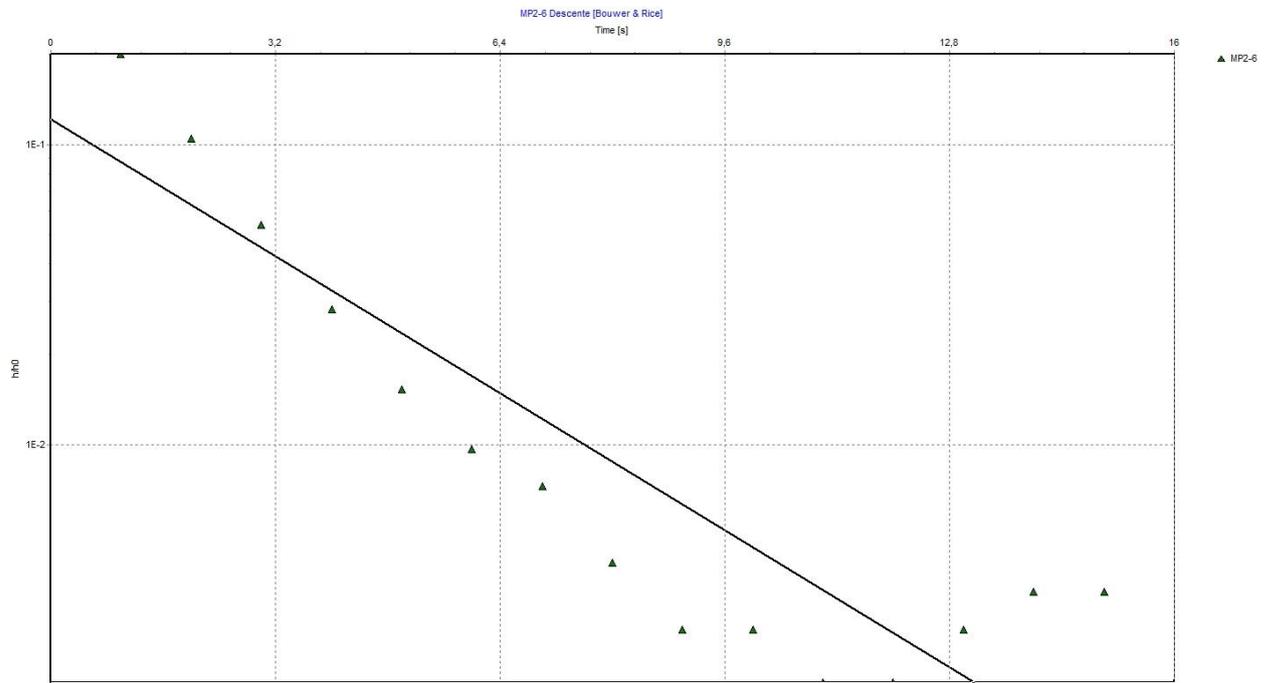
Conductivity:  $6.79E-7$  m/s

**Annexe 8 : Interprétation des résultats du slug-test sur le micropiézomètre 2-3 (redescente du niveau d'eau)**



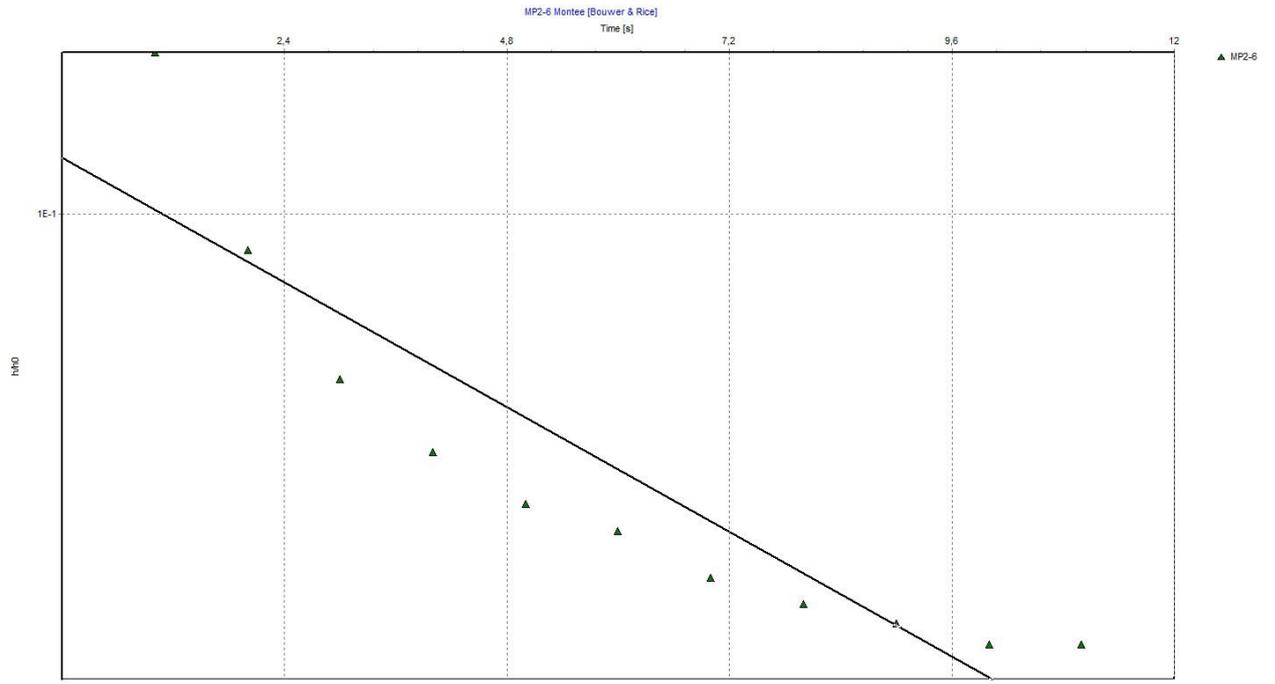
Conductivity: 3.63E-7 m/s

**Annexe 9 : Interprétation des résultats du slug-test sur le micropiézomètre 2-3 (remontée du niveau d'eau)**



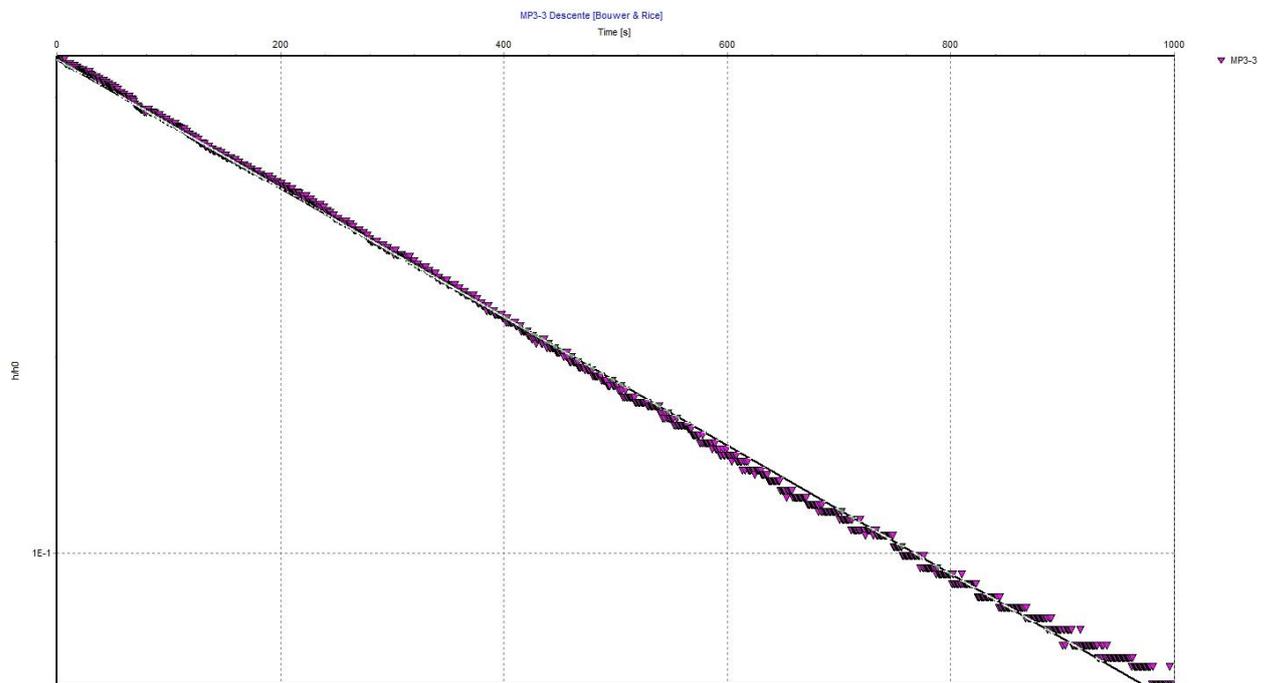
Conductivity: 6.69E-5 m/s

**Annexe 10 : Interprétation des résultats du slug-test sur le micropiézomètre 2-6 (redescente du niveau d'eau)**



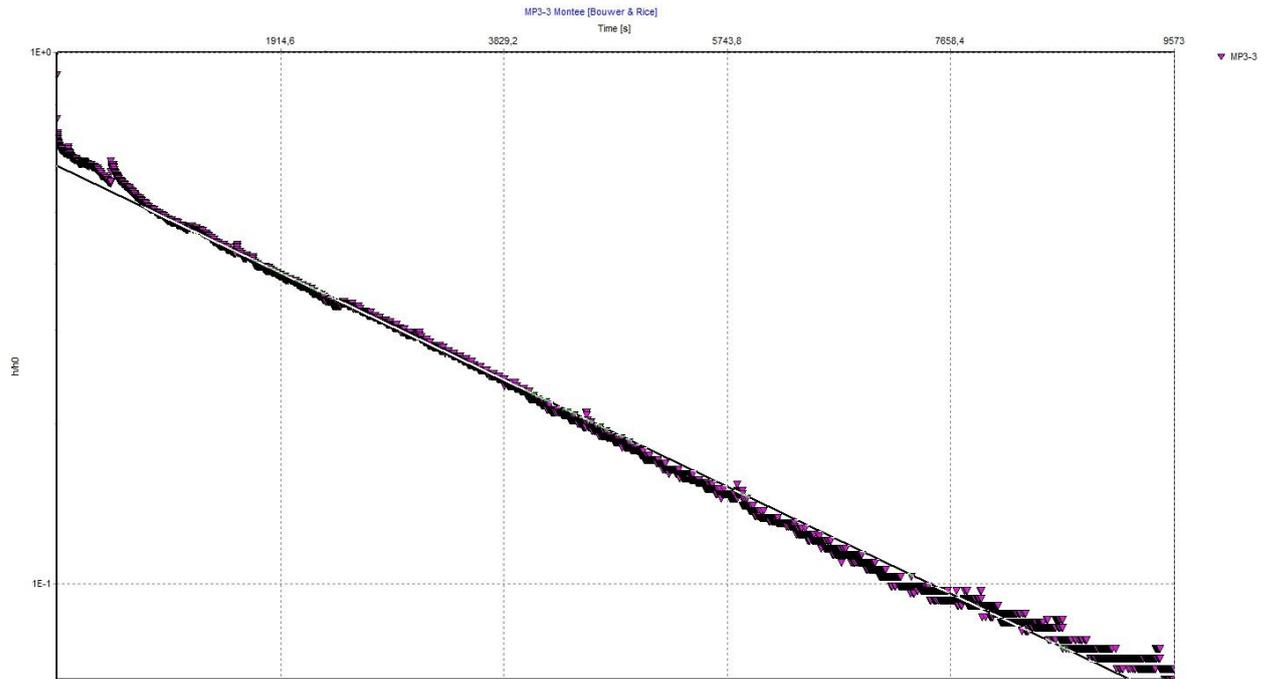
Conductivity: 4.04E-5 m/s

### Annexe 11 : Interprétation des résultats du slug-test sur le micropiézomètre 2-6 (remontée du niveau d'eau)



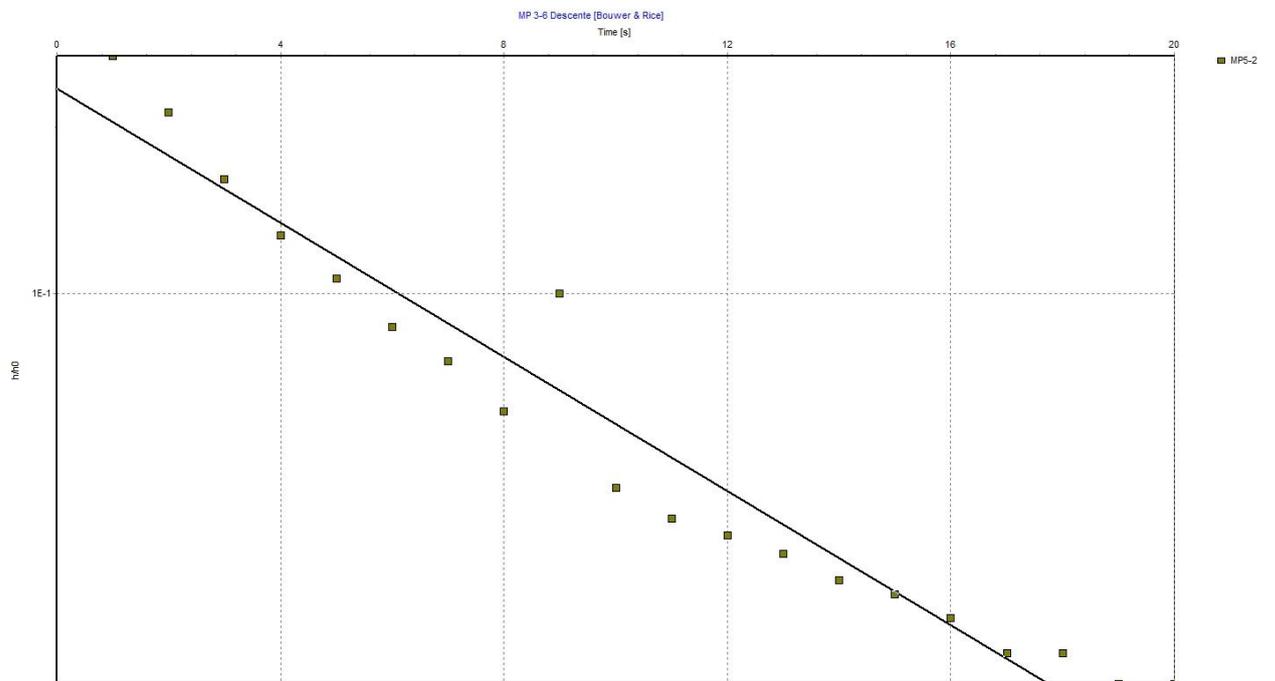
Conductivity: 4.65E-7 m/s

### Annexe 12 : Interprétation des résultats du slug-test sur le micropiézomètre 3-3 (redescente du niveau d'eau)



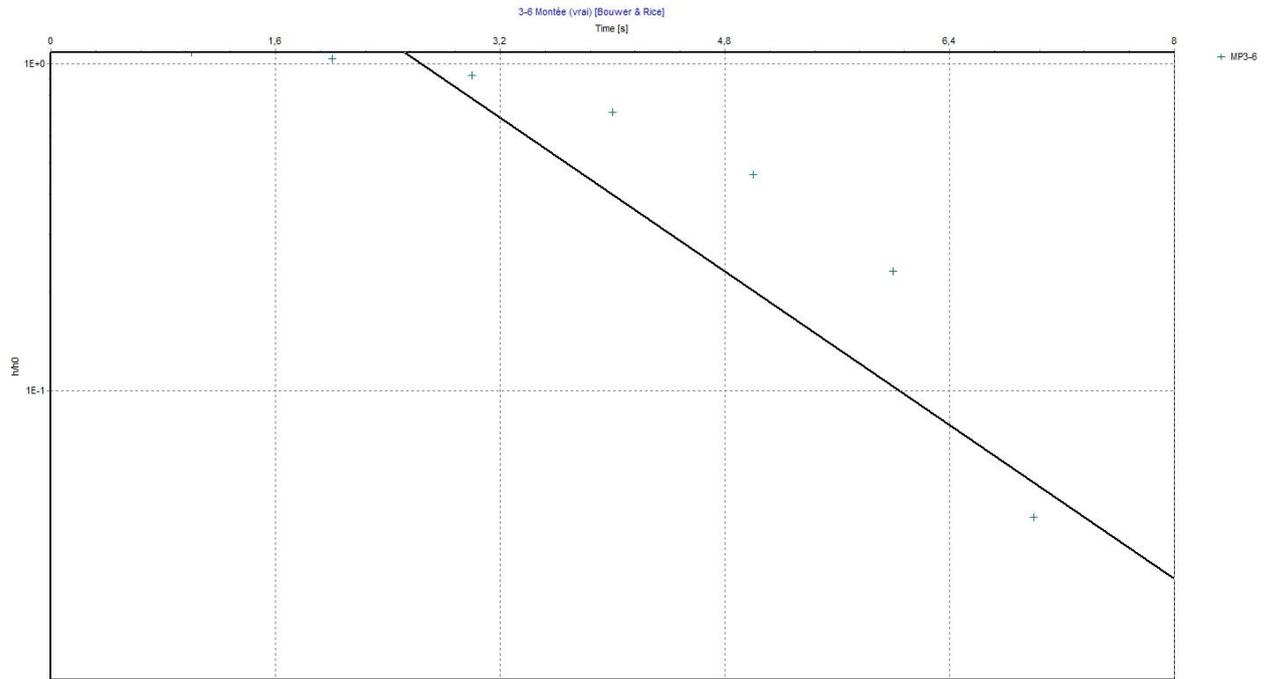
Conductivity: 5.00E-8 m/s

### Annexe 13 : Interprétation des résultats du slug-test sur le micropiézomètre 3-3 (remontée du niveau d'eau)



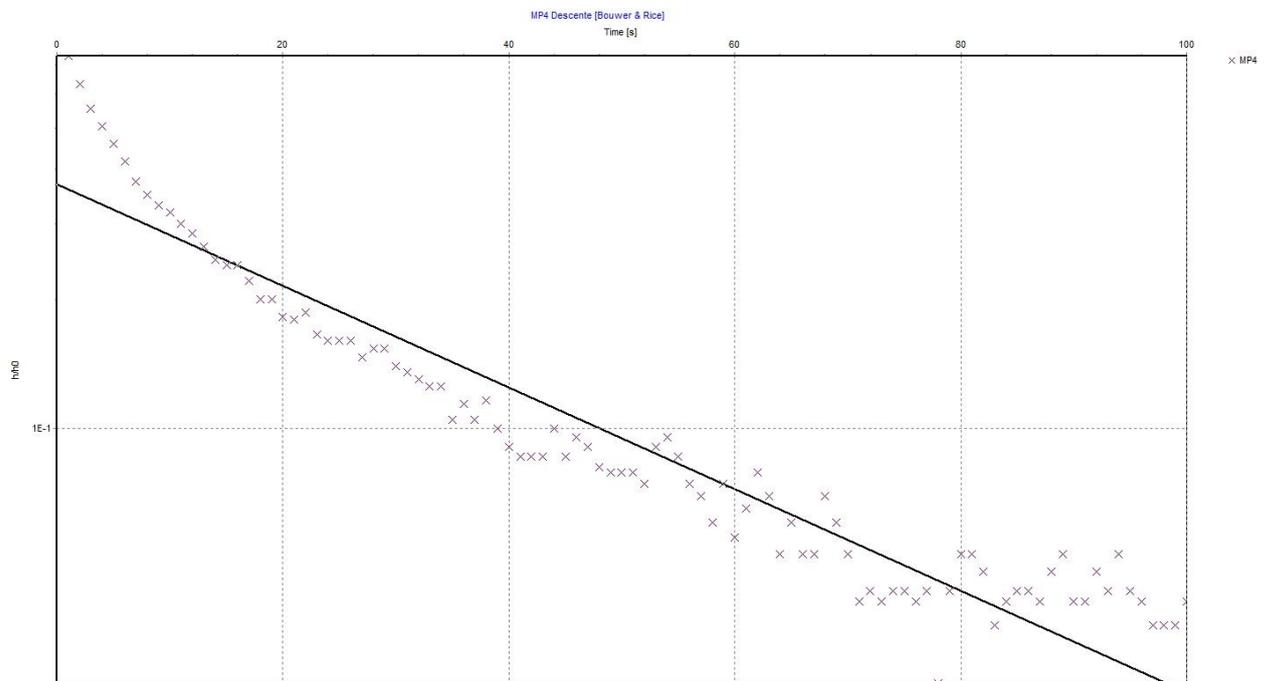
Conductivity: 2.87E-5 m/s

### Annexe 14 : Interprétation des résultats du slug-test sur le micropiézomètre 3-6 (redescente du niveau d'eau)



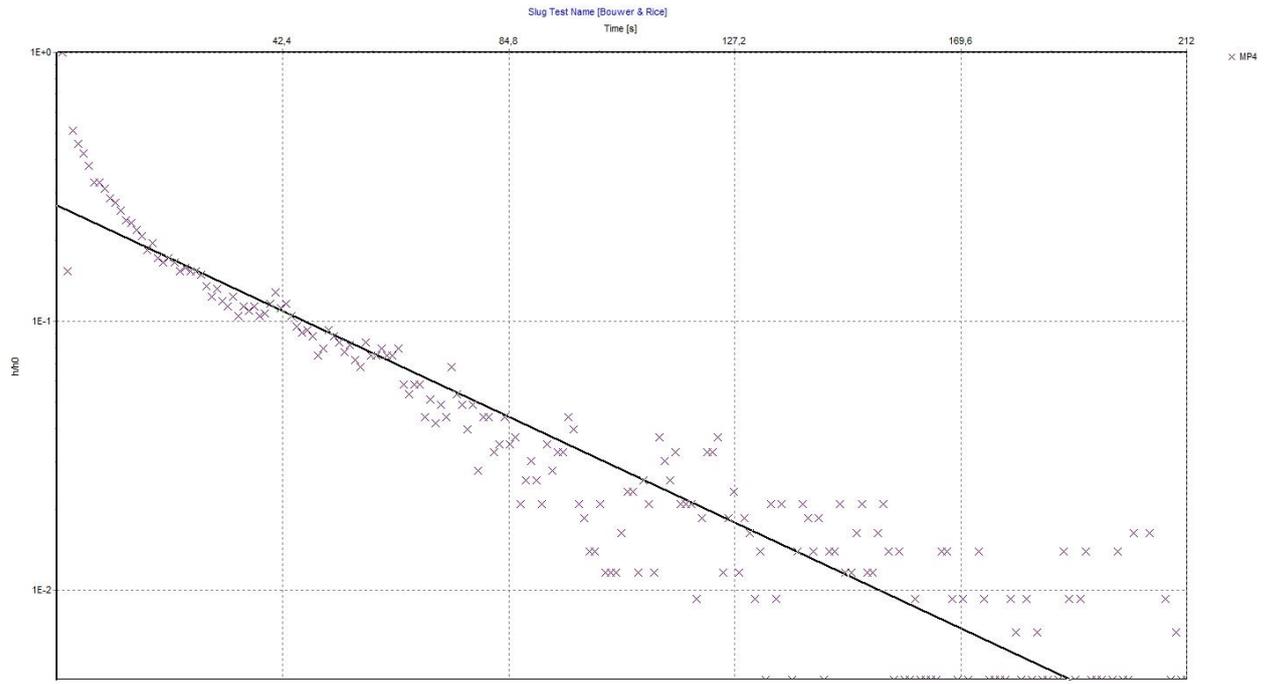
Conductivity: 1.39E-4 m/s

### Annexe 15 : Interprétation des résultats du slug-test sur le micropiézomètre 3-6 (remontée du niveau d'eau)



Conductivity: 5.88E-6 m/s

### Annexe 16 : Interprétation des résultats du slug-test sur le micropiézomètre 4 (redescence du niveau d'eau)



Conductivity: 4.68E-6 m/s

**Annexe 17 : Interprétation des résultats du slug-test sur le micropiézomètre 4 (remontée du niveau d'eau)**