
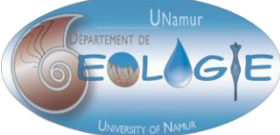

  <p>Geo³-Hydrogéologie - Département ArGenCo (Architecture, Géologie, Environnement & Constructions) Université de Liège</p>
  <p>Départements de Biologie et de Géologie Université de Namur</p>
 <p>Gembloux Agro-Bio Tech Université de Liège</p> <p>Axe Echanges Eau-Sol-Plante, Gembloux Agro bio-tech Université de Liège</p>

**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**

D3.3 Bilans hydrogéologiques

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, Bruno Leporcq

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

Rédaction : Flore Schmit, Vincent Hallet

Table des matières

1. INTRODUCTION	3
2. DONNÉES ET MÉTHODES	4
2.1. Données	4
2.2. Calcul des bilans hydrologiques et hydrogéologiques	6
2.2.1. Principe général	6
2.2.2. Calcul des paramètres climatiques	7
2.2.3. Calcul des débits	9
2.2.4. Estimation de la variation de la réserve d'eau souterraine	13
2.2.5. Choix des piézomètres de référence	14
3. RÉSULTATS	23
3.1. Bassin versant du Torrent de Bonne	25
3.1.1. Typologie	25
3.1.2. Hydrologie	27
3.1.3. Bilans hydrogéologiques du bassin versant du Torrent de Bonne	29
3.1.3.1. Bilan hydrogéologique annuel	29
3.1.3.2. Les bilans hydrogéologiques mensuels	29
3.2. Bassin versant du Hoyoux Amont	32
3.2.1. Typologie	32
3.2.2. Hydrologie	34
3.2.3. Bilans hydrogéologiques du bassin versant du Hoyoux Amont (ST5)	36
3.2.3.1. Bilan annuel	36
3.2.3.2. Bilans hydrogéologiques mensuels	37
3.2.4. Bilans hydrogéologiques : Station du Ruisseau de Pailhe (ST7)	39
3.2.4.1. Bilan annuel	41
3.2.4.2. Bilans mensuels	42
3.2.5. Bilans hydrogéologiques : Station du Ruisseau d'Havelange (ST9)	44
3.2.5.1. Bilan pluri-mensuel	45
3.2.5.2. Bilans mensuels	45
3.2.6. Bilans hydrogéologiques : Station de Petit Avin (ST8)	47
3.2.6.1. Bilan annuel	49
3.2.6.2. Bilans mensuels	50
3.3. Bassin versant du Triffoy	52
3.3.1. Typologie	52
3.3.2. Hydrologie	54
3.3.3. Bilan hydrogéologique du bassin versant du Triffoy (ST1)	56
3.3.3.1. Bilan annuel	56
3.3.3.2. Bilans mensuels	57
3.3.4. Bilans hydrogéologiques : Station de Source de Marchin (ST2)	59
3.3.4.1. Bilan annuel	61
3.3.4.2. Bilans mensuels	62

3.3.5.	Bilans hydrogéologiques : Station de State (ST3)	64
3.3.5.1.	Bilan pluri-mensuel	66
3.3.5.2.	Bilans mensuels.....	66
3.3.6.	Bilans hydrogéologiques : Station de Jamagne (ST4)	68
3.3.6.1.	Bilan annuel.....	70
3.3.6.2.	Bilans mensuels.....	71
4.	CONCLUSIONS	73
4.1.	Bilans annuels.....	73
4.2.	Bilans annuels et piézométrie	74
4.2.1.	Identification des flux entrant et sortant	74
4.2.2.	Identification de la typologie des cours d'eau.....	76
4.3.	Bilans mensuels	78
5.	RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES.....	79
6.	BIBLIOGRAPHIE.....	81
7.	ANNEXES.....	83
7.1.	Caractéristiques des stations limnimétriques.....	83
7.1.1.	Station 1 : Exutoire du Triffoy.....	83
7.1.2.	Station 2 : Source de Marchin	84
7.1.3.	Station 3 : State	85
7.1.4.	Station 4 : Jamagne.....	86
7.1.5.	Station 5 : Modave.....	87
7.1.6.	Station 6 : Torrent de Bonne	88
7.1.7.	Station 7 : Ruisseau de Pailhe.....	89
7.1.8.	Station 8 : Petit Avin	90
7.1.9.	Station 9 : Ruisseau d'Havelange.....	91
7.2.	Résultats de la séparation d'hydrogramme par le VCN3	92
7.3.	Résultats du calcul des coefficients α.....	96
7.4.	Résultats des bilans hydrogéologiques hebdomadaires	97

1. Introduction

L'objectif général du projet ESO-ESU est de fournir à la Région les données et les bases scientifiques permettant de statuer, pour les masses d'eau souterraine et de surface concernées, sur leur caractère à risque et sur leur bon ou mauvais état et d'aboutir, comme exigé par la DCE, à une estimation de la ressource en eau souterraine requise à l'alimentation de l'eau de surface en période d'étiage.

Ce livrable présente les résultats du « suivi quantitatif des eaux de surfaces et souterraines pour le calcul de bilan à l'échelle des bassins tests et des masses d'eau de surface associées ».

Les objectifs de l'étude sont :

1. Évaluer les flux d'eau souterraine entre les bassins tests.
2. Évaluer les sens des échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines
3. Comprendre la dynamique de ces échanges au cours du temps

Pour ce faire des bilans hydrogéologiques ont été réalisés à différentes échelles spatio-temporelles :

- bassin versant, sous-bassin ou tronçon de cours d'eau ;
- année, mois et semaine.

Les données et les méthodes utilisées pour la réalisation de ces bilans, seront décrites au Chapitre 2.

L'interprétation des résultats des bilans annuels réalisés au cours de cette étude, permet d'appréhender les 1° et 2° objectifs. Les bilans mensuels permettent de répondre au 3° objectif. La présentation et l'interprétation de ces résultats sont décrites au Chapitre 3 de ce rapport.

Il est à noter que ce rapport fournira les données utilisées pour le calcul des indicateurs des interactions entre eaux souterraines et eaux de surface qui seront présentés dans le livrable D4.1.

2. Données et méthodes

La réalisation de bilans hydrogéologiques nécessite la récolte et le traitement de plusieurs types de données (climatiques, limnimétriques, volumes captés ; voir 2.1 Données). Celles-ci permettent la détermination des paramètres qui seront utilisés pour le calcul des bilans hydrogéologiques (voir 2.2 Calcul des bilans hydrologiques et hydrogéologiques).

La provenance des données, les différents paramètres du bilan ainsi que leur méthode de calcul, sont détaillées ci-dessous.

2.1. Données

Les principales données sont :

1. Des données climatiques : les précipitations, les températures maximales et minimales, l'humidité relative, la vitesse du vent et la radiation solaire : sont fournies par la station météorologique de Strée (située à Huy) avant le 7 septembre 2013. Ensuite, elles proviennent de la station placée dans le cadre du projet, sur le domaine d'Hodoumont. Les données sont utilisées pour le calcul de l'eau utile, à partir des données pluviométriques et du calcul de l'évapotranspiration potentielle et réelle.
2. Des données de débits des cours d'eau : un réseau de stations limnimétriques a été mis en place dans le cadre de cette étude. Ces données limnimétriques sont associées à des jaugeages ponctuels du débit des cours d'eau tout au long de l'étude.
3. Les données des captages : les données des volumes captés annuels proviennent d'informations collectées auprès des producteurs d'eau présents dans la zone d'étude : VIVAQUA, CIESAC, AIEC et CILE ; tenant compte, pour les calculs des bilans des imports et exports d'eau entre les bassins.
4. Les cartes géologiques et hydrogéologiques de Wallonie réalisées ou en cours de réalisation ont également fourni de nombreuses données : formations géologiques, unités hydrogéologiques, sens d'écoulement,

Les stations de mesures sont localisées à la Figure 2-1:

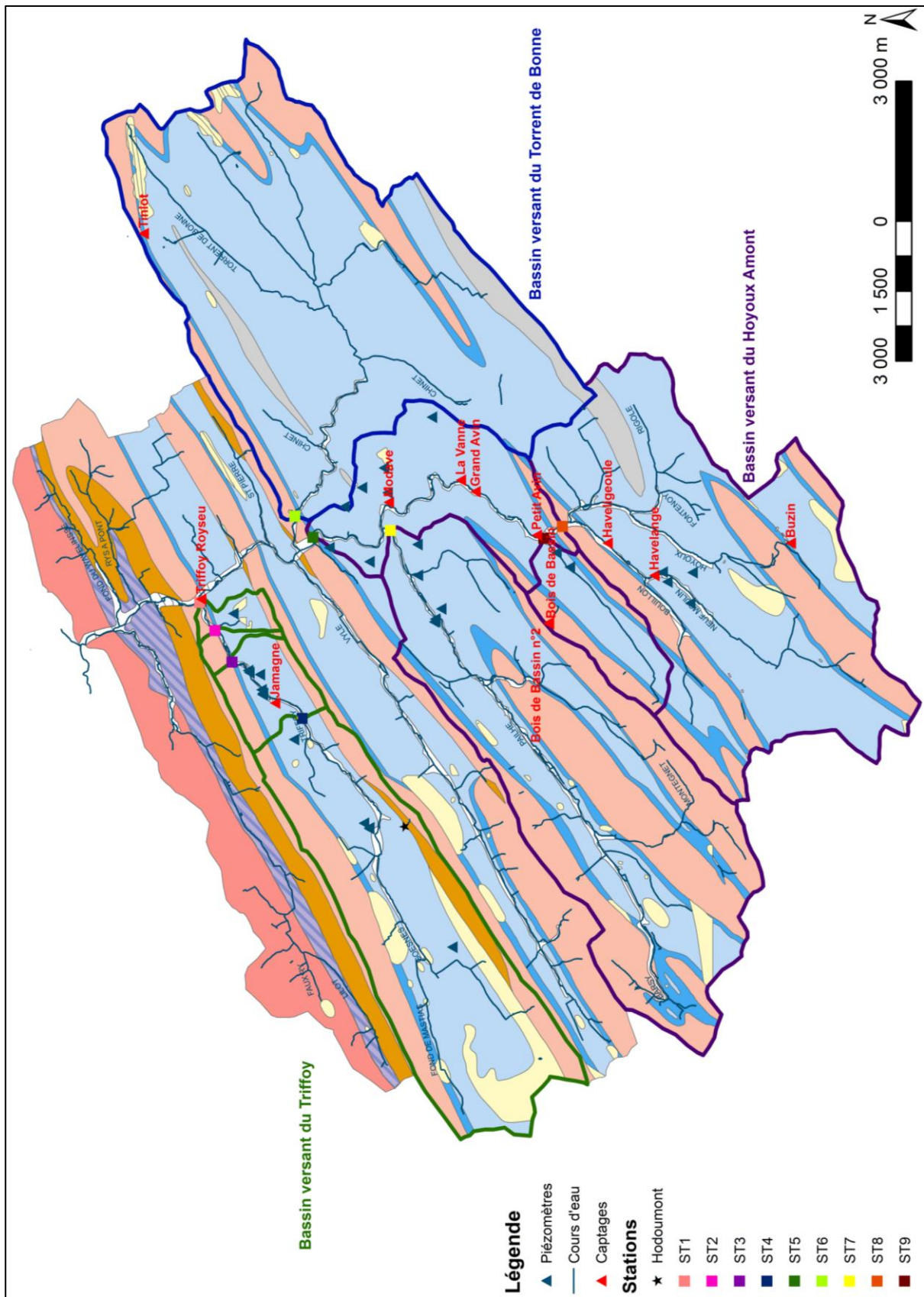


Figure 2-1: Bassin hydrographique du Hoyoux avec localisation des captages, des piézomètres, des stations limnimétriques et météorologique utilisés dans le calcul des bilans.

2.2. Calcul des bilans hydrologiques et hydrogéologiques

2.2.1. Principe général

Le bilan en eau d'un bassin hydrologique est la balance comptable des débits d'entrées et des débits de sorties ainsi que les variations de stock dans le sol et la nappe aquifère. Ces débits varient spatialement et dépendent directement de la surface du bassin étudié. Afin de faciliter les comparaisons entre bassins, les paramètres du bilan s'expriment par unité de surface. L'unité utilisée est donc une hauteur d'eau (en mm) par unité de temps (jour, mois, année).

Le bilan s'écrit :

$$P + Q_{in} = ETR + Q_{capt} + Q_{out} + Q_{ruis} + Q_b + \Delta Res + \Delta RFU + \varepsilon_{fermeture}$$

(Éq. 2-1)

où :

P : Précipitations

Q_{in} : Débits entrant échangés avec les aquifères contigus

ETR : Évapotranspiration réelle

Q_{capt} : Débits captés et exportés

Q_{out} : Débits sortant échangés avec les aquifères contigus

Q_{ruis} : Ruissellement

Q_b : Débit de base de la rivière (débit alimenté par la vidange des eaux souterraines)

ΔRes : Variation de la réserve d'eau souterraine (zone saturée)

ΔRFU : Variation du stock d'eau du sol (zone non-saturée)

$\varepsilon_{fermeture}$: Erreur de fermeture du bilan

Le terme de gauche quantifie les apports d'eau dans le bassin versant ; le terme de droite les pertes d'eau, les variations du stock d'eau (sol et nappe) et un éventuel terme de fermeture.

Les paramètres P, ETR et ΔRFU sont calculés à partir des données de la station météorologique (voir 2.2.2 Calcul des paramètres climatiques, ci-dessous). La RFU représente la quantité d'eau dans le sol qui peut être utilisée par le système racinaire des plantes lorsqu'il y a un déficit hydrique. Dans le cadre de cette étude, ce volume est estimé à 125 l/m² soit 125mm.

Les débits captés et exportés Q_{capt} sont fournis sur base annuelle par les producteurs d'eau présents dans la zone d'étude ; il s'agit des sociétés :

- VIVAQUA (alimentation en eau de la Région bruxelloise),
- Compagnie Intercommunale Liégeoise des Eaux (CILE),
- Compagnie Intercommunale des Eaux de la Source de Les Avins *groupe* Clavier (CIESAC),
- Association Intercommunale des Eaux du Condroz (AIEC).

L'écoulement total ($Q_w + Q_{ruis}$) est une donnée qui a été calculée (voir 2.2.3 Calcul des débits) sur base du débit total (hydrogramme) obtenu au niveau des stations limnimétriques placées dans le cadre du projet.

Le terme ΔRes représente les variations de la réserve d'eau souterraine. Elle a été calculée par la méthode du VCN3 utilisée lors du projet Synclin'EAU (Brouyère et al., 2008c). La méthodologie sera décrite dans le sous-chapitre 2.2.4 - Estimation de la variation de la réserve d'eau souterraine.

Q_{in} et Q_{out} sont à priori inconnus et sont des termes à discuter à la lumière du terme de bouclage du bilan ($\varepsilon_{fermeture}$).

L'écart de fermeture $\varepsilon_{fermeture}$ est une mesure de l'imprécision et est fonction des erreurs de mesures et de la précision des calculs et estimations. Par convention, si l'écart de fermeture est positif et supérieur à 10%, le bilan présente un caractère déficitaire : le débit mesuré à l'exutoire du bassin présente un déficit d'écoulement, signifiant qu'une « sortie d'eau » n'est pas prise en compte dans le calcul. Un raisonnement similaire peut être appliqué dans le cas d'un terme négatif et supérieur en valeur absolue, à 10% : le bassin présente alors un écoulement excédentaire et une entrée d'eau n'est pas considérée dans le calcul du bilan (Brouyère et al., 2008b). Ces écoulements sont généralement liés à des transferts d'eau souterraine entre bassins versants.

Les termes Q_{in} et Q_{out} ne sont pas directement mesurables et ils sont donc déduits du terme de fermeture.

Les différentes méthodes de calcul utilisées pour évaluer la valeur des différents termes du bilan, sont présentées dans les sous-chapitres suivants.

2.2.2. Calcul des paramètres climatiques

L'évapotranspiration potentielle journalière (ETP) a été calculée à l'aide du programme EToCalculator développé par la Division des terres et des eaux de la FAO (Raes, 2012). Ce programme détermine l'évapotranspiration potentielle d'après des données météorologiques en se basant sur l'équation de Penman-Montheith :

$$ETP = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)}$$

(Éq 2-2)

avec :

- ETP : Évapotranspiration potentielle [mm j^{-1}]
- R_n : Radiation nette à la surface de la culture [$\text{MJ m}^{-2} \text{j}^{-1}$]
- G : Densité du flux de chaleur du sol [$\text{MJ m}^{-2} \text{j}^{-1}$]
- T : Température moyenne journalière à 2m de hauteur [$^{\circ}\text{C}$]
- u_2 : Vitesse du vent à 2m de hauteur [m s^{-1}]
- e_s : Tension de vapeur d'eau à saturation [kPa]
- e_a : Tension de vapeur d'eau réelle [kPa]

Δ : Pente de la courbe des tensions de vapeur saturante [kPa °C⁻¹]
 γ : Constante psychrométrique [kPa °C⁻¹]

Le modèle hydrologique « modifié » de Thornthwaite permet de déterminer de manière simple l'évapotranspiration réelle, le stock d'eau contenu dans les couches superficielles du sol (RFU), et l'eau utile. Le terme « eau utile » qui sera utilisé plusieurs fois dans ce rapport, désigne en réalité la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration réelle (EU = P – ETR) lorsque la RFU est à saturation ; l'eau utile représente donc théoriquement la quantité d'eau disponible pour le ruissellement et l'infiltration.

Sur base des données d'évapotranspiration potentielle, deux cas se présentent :

Si les précipitations sont supérieures à l'ETP, celle-ci est totalement satisfaite. L'évapotranspiration réelle égale l'évapotranspiration potentielle. Le surplus d'eau ré-humidifie les couches supérieures du sol jusqu'à leur capacité maximale (dans le cas de cette étude, 125mm). L'excédent éventuel est disponible pour le ruissellement et l'infiltration.

Si les précipitations sont inférieures à l'évapotranspiration potentielle, l'eau utile est nulle. L'évapotranspiration réelle est égale aux précipitations augmentées d'une certaine quantité d'eau cédée par les couches superficielles de sol. Dans le cas de la méthode « modifiée » de Thornthwaite, seul une partie du stock sollicité par l'évapotranspiration est réellement disponible. La quantité d'eau effectivement cédée est proportionnelle à la teneur en eau du sol. Le stock d'eau décroît de manière exponentielle : rapidement lorsque le stock est proche de sa capacité maximale, très lentement lorsqu'il est presque sec. Théoriquement, la valeur du stock n'est donc jamais nulle (Brouyère et al., 2008b).

Pour une RFU de 125 mm, la formule utilisée est la suivante :

$$\text{Stock résiduel de la RFU} = 125 e^{-0.0082 x}$$

(Éq.2-3)

où x = déficit mensuel cumulé

Tout d'abord, les paramètres climatiques ont été calculés sur base des données de la station de Strée (Huy) pour toute l'année 2013 avec une RFU de départ égale à 125mm. Après le 7 septembre 2013, les paramètres climatiques ont été calculés à partir des données de la station d'Hodoumont avec comme valeur de RFU de départ, celle obtenue le 6 septembre 2013 sur base des données de la station de Strée.

2.2.3. Calcul des débits

La détermination des débits des cours d'eau est basée sur les données limnimétriques suivies en continu à l'aide de sondes pressiométriques (pas de temps de 15 minutes) et des mesures ponctuelles de débits. Ces mesures de débits ont été réalisées à différentes périodes afin d'être représentatives des valeurs de débit réelles.

Pour chaque station limnimétrique (Annexe 7.1 Caractéristiques des stations limnimétriques), une courbe de tarage a été réalisée. Celle-ci met en relation le débit mesuré et la hauteur d'eau relevée par la sonde, cette relation est extrapolée au moyen d'une courbe de tendance polynomiale d'ordre 2, calculée par les moindres carrés. L'équation de la courbe permet de calculer le débit correspondant à chacune des données de hauteur d'eau relevées par la sonde. Le résultat ainsi obtenu est un hydrogramme qui représente la variation temporelle du débit total du cours d'eau au niveau de chaque station de jaugeages (Brouyère et al., 2008c).

Il est à noter que l'extrapolation de la courbe de tarage peut souvent entraîner une imprécision se traduisant souvent par une exagération des hauts débits.

Les débits obtenus pour les stations aval des trois bassins versants sont présentés ci-dessous (Figure 2-2).

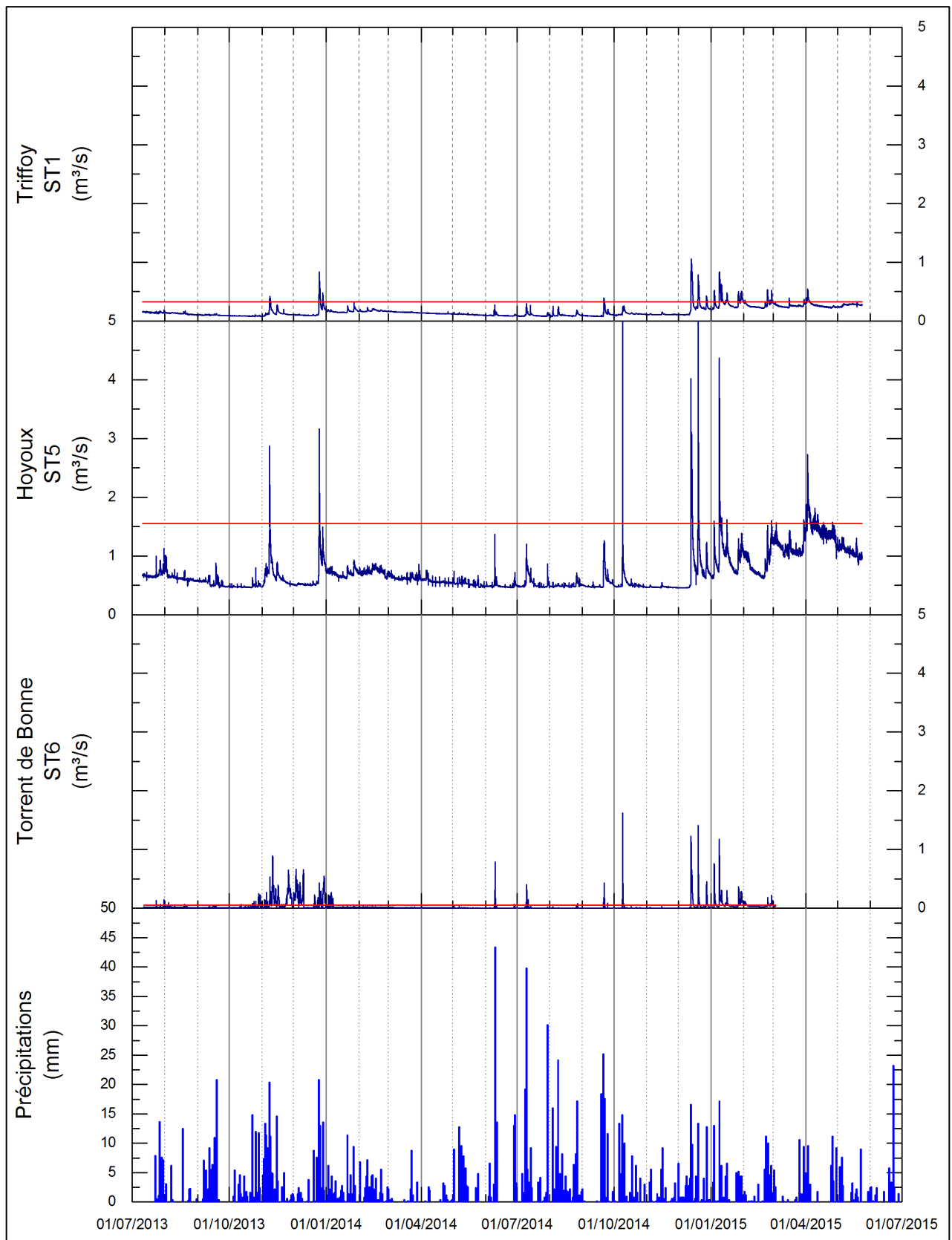


Figure 2-2 : Débits calculés aux stations aval des bassins versants étudiés ; le trait rouge indique le maximum jaugé à la station.

Le graphique permet de constater que les débits les plus importants sont observés dans le Hoyoux et les plus faibles dans le Torrent de Bonne.

De plus, il met en évidence la relation entre les précipitations et le débit.

Au sein du bassin versant du Hoyoux amont (Figure 2-3), on constate que le débit augmente d'amont (ST8) en aval (ST5) ; et que les affluents (ST7 et ST9) présentent des débits variables mais toujours inférieurs à la station aval.

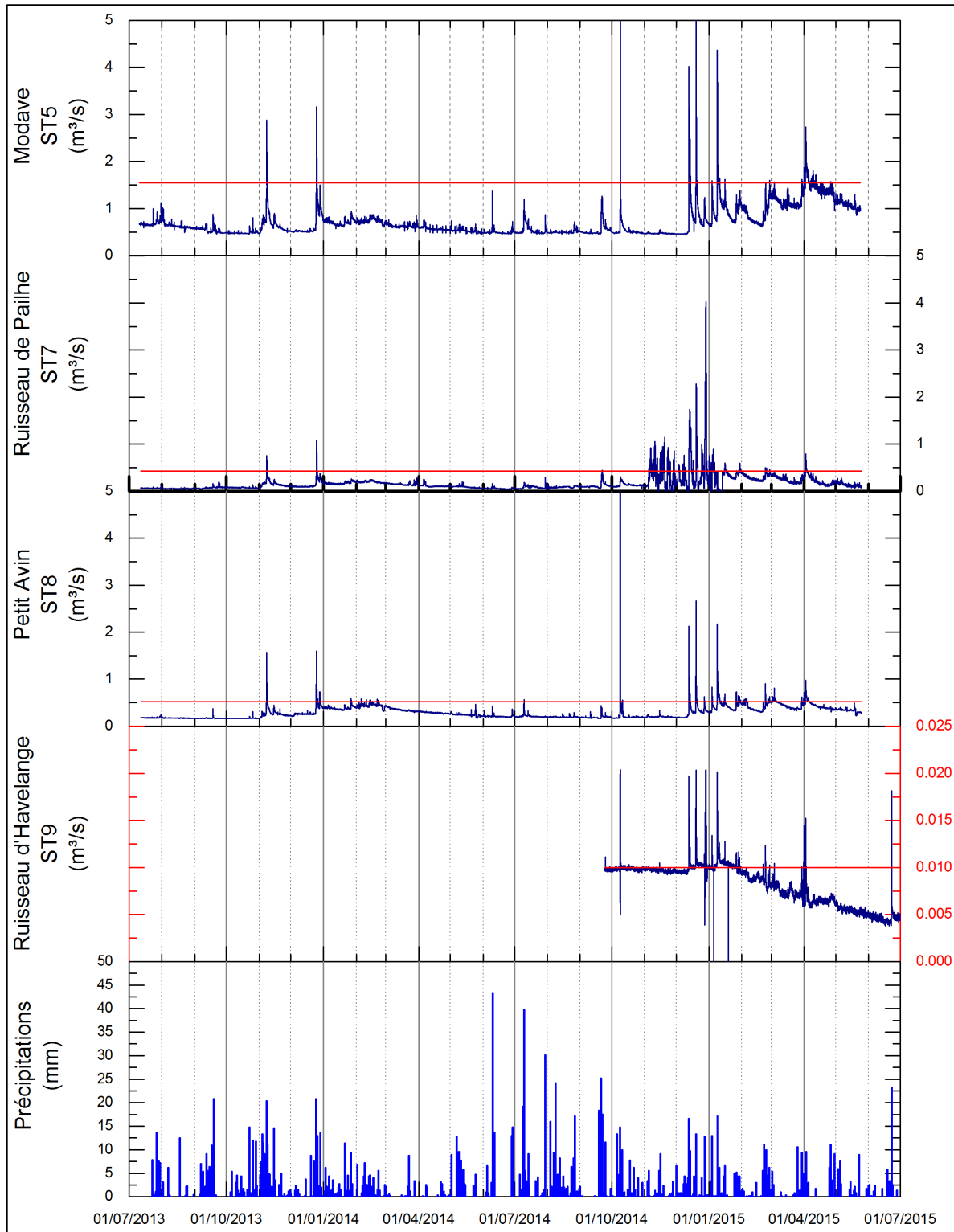


Figure 2-3 : Débits calculés aux stations présentes dans le bassin du Hoyoux amont ; le trait rouge indique le maximum jaugé à la station.

Dans le bassin du Triffoy, on observe également une augmentation des débits écoulés d'amont (ST4) en aval (ST1) (Figure 2-4).

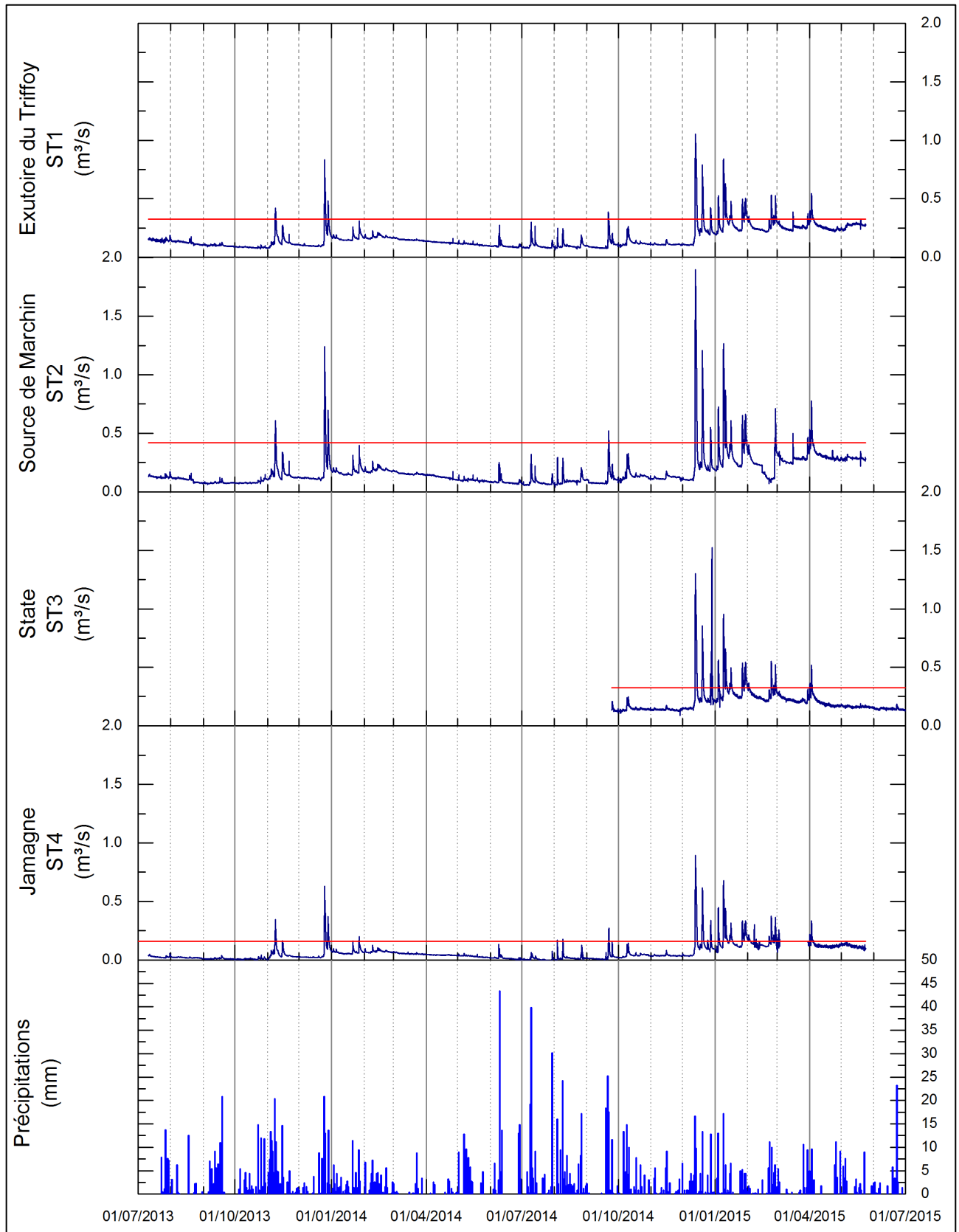


Figure 2-4 : Débits calculés aux stations présentes dans le bassin du Triffoy ; le trait rouge indique le maximum jaugé à la station.

2.2.4. Estimation de la variation de la réserve d'eau souterraine

Le terme de ΔRes représente la variation de réserves en eaux souterraines dans la zone d'étude. Elle est estimée à partir de la contribution de l'écoulement de base au débit du cours d'eau. Pour estimer cette contribution, l'hydrogramme est séparé en deux composantes : le débit de base et le ruissellement.

La technique de séparation du VCN3 utilisée pour la réalisation des bilans est une méthode basée sur le traitement des données hydrologiques. Précédemment utilisé lors du projet Synclin'EAU, le VCN3 est couramment utilisé par les DIREN (Directions Régionales de l'Environnement) française dans les bulletins de stations hydrologiques des différentes régions de France. Il est défini comme le débit moyen minimum sur 3 jours consécutifs observé au cours d'un mois calendaire. Le minimum mensuel ainsi obtenu est alors considéré comme représentatif du débit de base (Brouyère et al., 2008c). Pour obtenir le débit de base journalier, une extrapolation linéaire a été réalisée entre ces minima mensuels (Annexe 7.2 Résultats de la séparation d'hydrogramme par le VCN3).

Une fois le débit de base estimé, le ΔRes peut être calculé grâce à l'équation suivante :

$$\Delta\text{Res} = \left(\frac{Q_{w_f} - Q_{w_i}}{\alpha} \right)$$

(Éq 2-4)

Avec :

Q_{w_f} : Débit de base journalier du dernier jour du mois ou de la semaine considéré [$\text{m}^3 \text{j}^{-1}$];

Q_{w_i} : Débit de base journalier du dernier jour du mois ou de la semaine précédant celui/celle considéré [$\text{m}^3 \text{j}^{-1}$];

α : Coefficient de tarissement [j^{-1}].

Le coefficient de tarissement α a été calculé suite à l'analyse graphique des récessions de l'année 2014 des différents hydrogrammes (Annexe 7.3 Résultats du calcul des coefficients α), en utilisant la formule de Maillet (Fetter, 2001):

$$\alpha = - \frac{\ln Q_f - \ln Q_i}{T}$$

(Éq 2-5)

où :

Q_f : Débit journalier total du cours d'eau en fin de récession [$\text{m}^3 \text{j}^{-1}$];

Q_i : Débit journalier total du cours d'eau en début de récession [$\text{m}^3 \text{j}^{-1}$];

T : Durée de la récession [j]

Une autre méthode de séparation d'hydrogramme a été envisagée, celle-ci sur base d'un traceur chimique et notamment de la conductivité électrique du cours d'eau. Le détail de cette méthode ainsi que sa comparaison par rapport à celle du VCN3 seront intégrés au livrable 4.1.

2.2.5. Choix des piézomètres de référence

Afin d'analyser la recharge de la nappe à la lumière des résultats des bilans, chaque station limnimétrique a été couplé à un piézomètre de référence. Le choix du piézomètre référant à chaque station a tout d'abord été dicté par la disponibilité des données piézométriques (Figure 2-5).

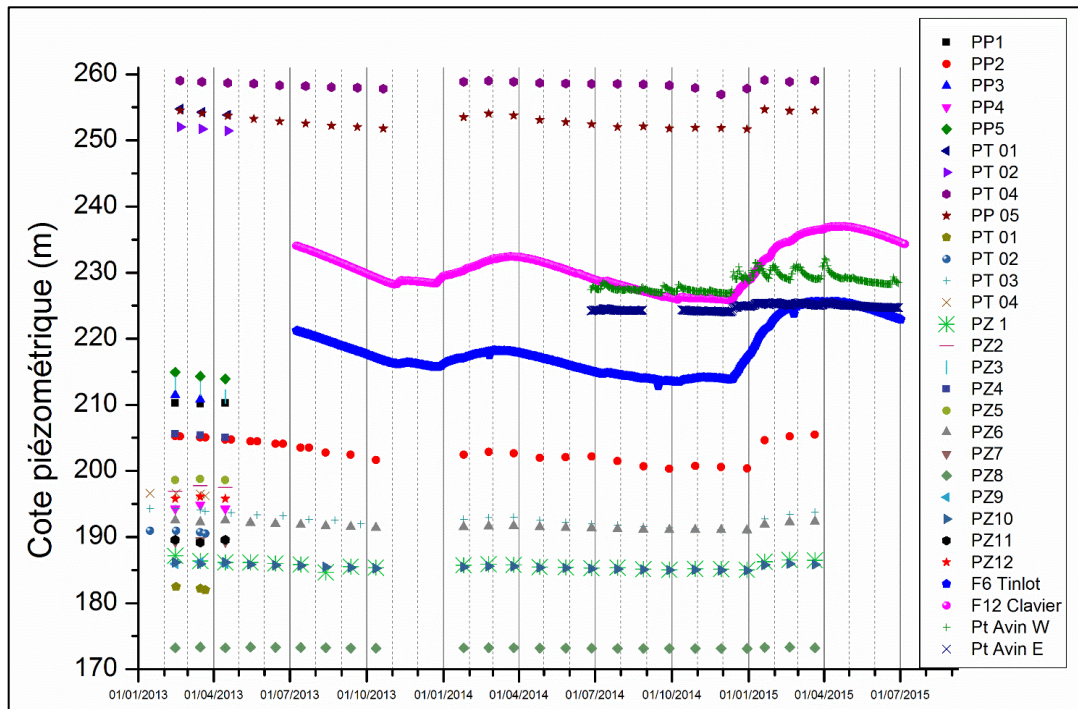


Figure 2-5 : Chroniques piézométriques disponibles dans les bassins versants du Hoyoux Amont et du Torrent de Bonne entre 2013 et 2015.

Le choix des piézomètres de référence a été fait selon trois critères :

- La disponibilité et la quantité des données piézométriques ;
- La proximité du piézomètre par rapport à la station limnimétrique ;
- La représentativité de la dynamique de la nappe en fonction de l'eau utile (EU).

Pour la station « ST5 Modave », trois piézomètres étaient à considérer : le PZ6, le PZ8 et le PZ10 (Figure 2-6) ; (Figure 2-7). Présentant un volume de données similaire, c'est le PZ8 qui a été choisi comme piézomètre de référence du faite de sa proximité avec la station (430 m).

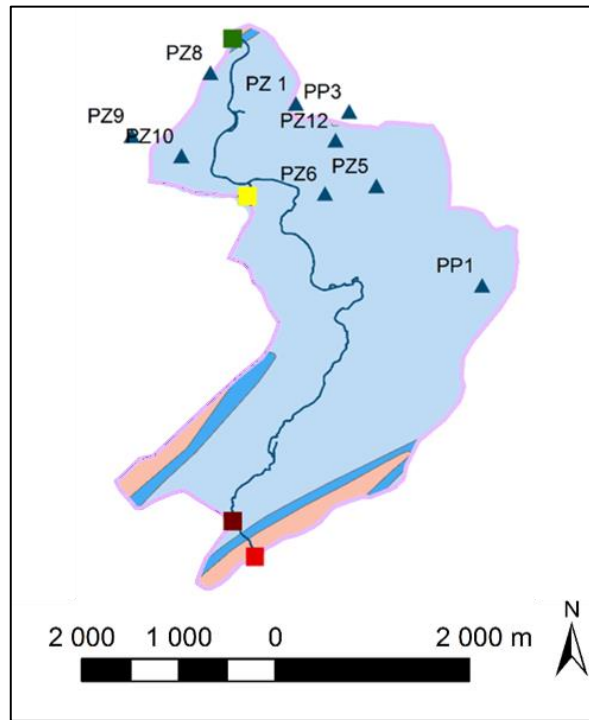


Figure 2-6 : Localisation des piézomètres à proximité de la station « ST5 – Modave ».

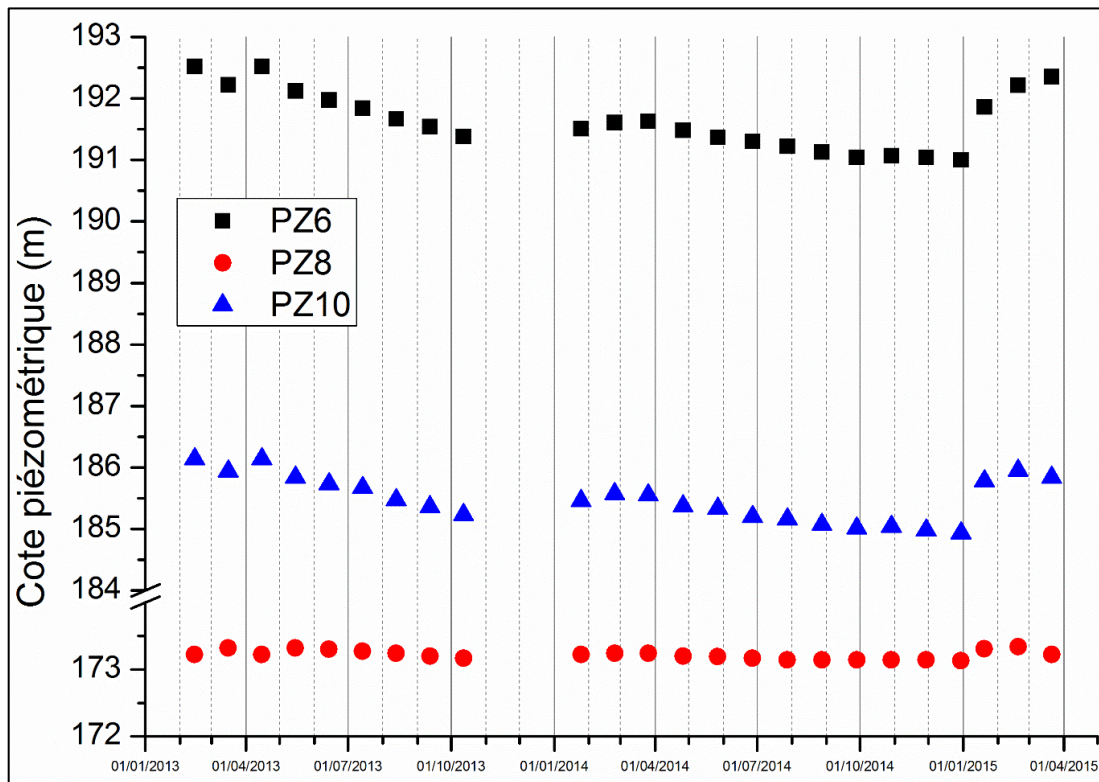


Figure 2-7 : Chroniques des piézomètres à proximité de la station « ST5- Modave ».

Pour la station « ST7- Ruisseau de Pailhe », le piézomètre PT03 étant le seul dans le sous-bassin à avoir une chronique pendant la période de l'étude, il sera utilisé comme référence (Figure 2-8) (Figure 2-9).

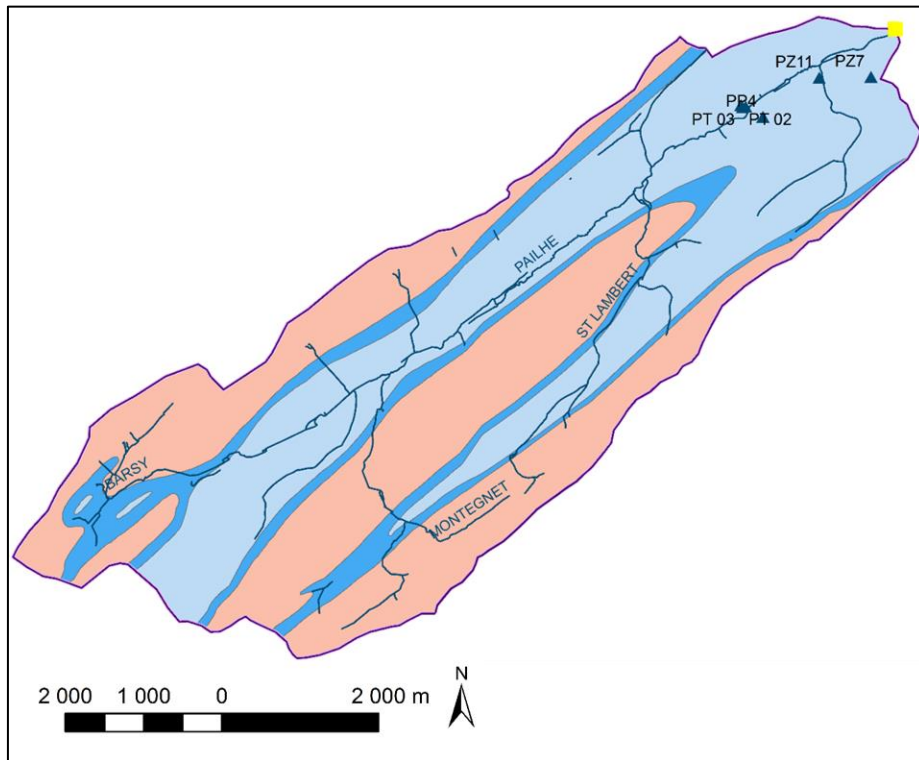


Figure 2-8 : Localisation des piézomètres dans le sous-bassin du ruisseau de Pailhe.

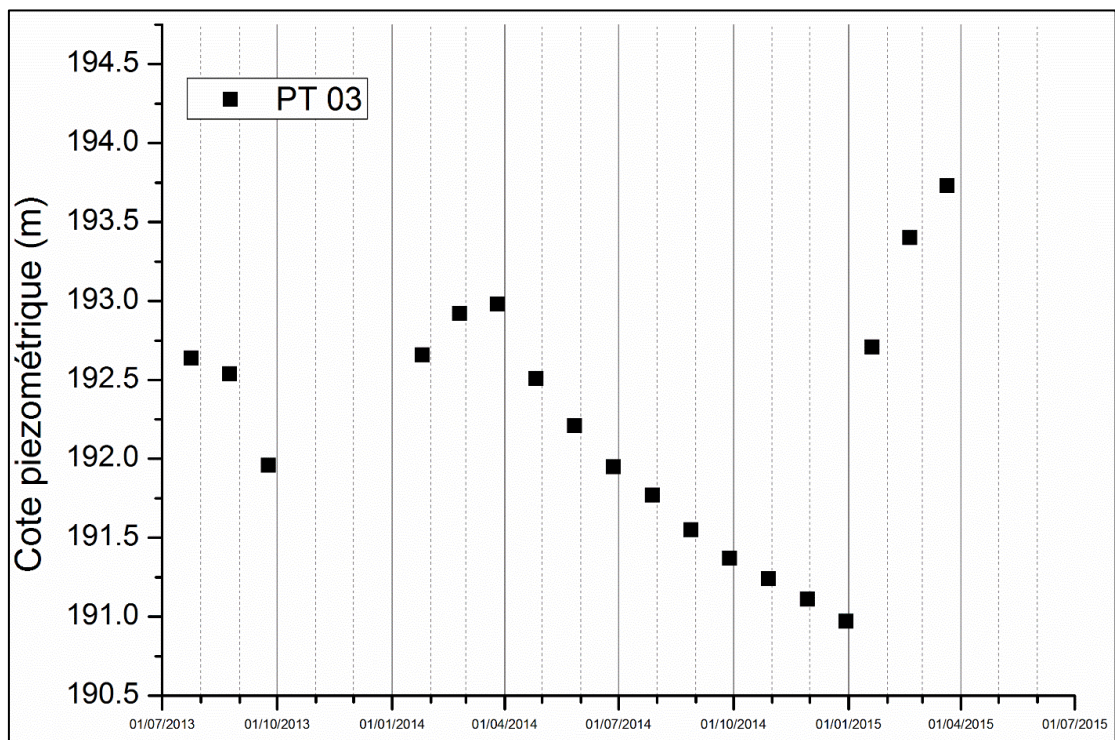


Figure 2-9 : Chronique du piézomètre PT03, référence pour la station « ST7- Ruisseau de Pailhe ».

Pour la station « ST8-Petit Avin », deux piézomètres sont à considérer : le PT04 et le PP05 (Figure 2-10). La quantité de données piézométriques étant similaire, c'est le PT04, plus proche de la station (2.4 km), qui a été choisi comme référence.

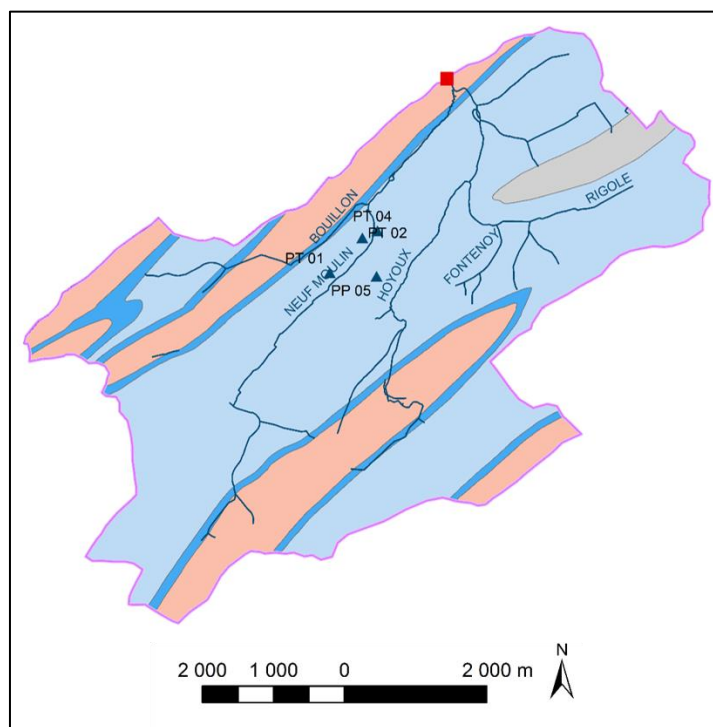


Figure 2-10 : Localisation des piézomètres dans le sous-bassin délimité par la station « ST8 - Petit Avin »

Il est à noter une différence de comportement de la nappe entre les deux piézomètres au niveau du mois de février 2014 (Figure 2-11) pouvant être due à une légère différence lié au contexte hydrogéologique calcaire où sont situés les piézomètres.

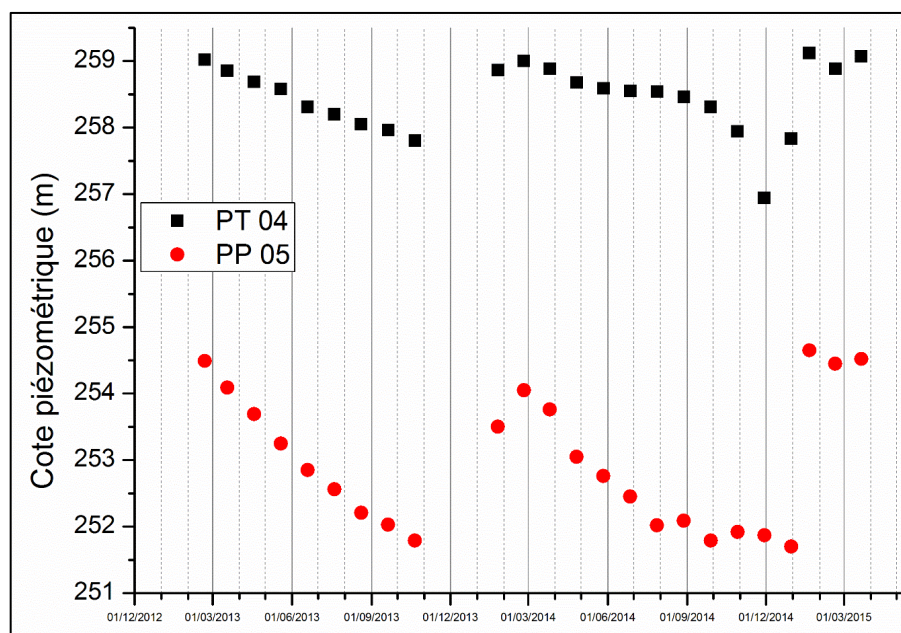


Figure 2-11 : Chroniques des piézomètres à proximité de la station « ST8 - Petit Avins ».

Pour la station « ST9-Ruisseau d’Havelange », deux piézomètres sont à considérer : les Petit Avin Est et Ouest (Figure 2-12).

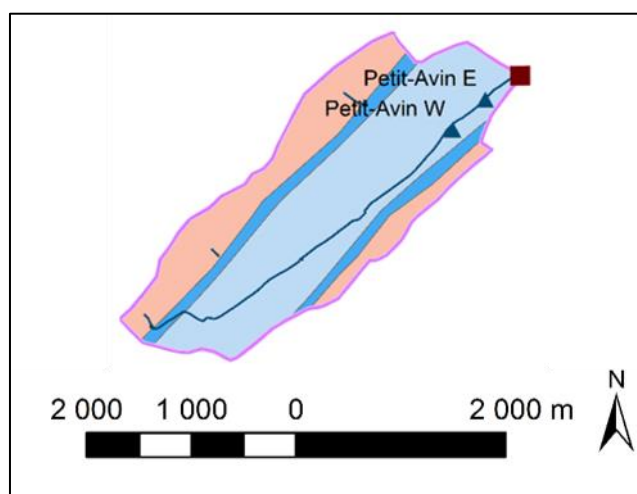


Figure 2-12 : Localisation des piézomètres dans le sous bassin du ruisseau d’Havelange.

La quantité de données étant plus importante pour le piézomètre Ouest, il a été choisi comme le piézomètre de référence. De plus, l’amplitude des variations de la cote piézométrique justifie également le choix de cette référence (Figure 2-13). On constate que plus le piézomètre est éloigné du niveau de base régional, plus les variations de la hauteur de la nappe augmentent.

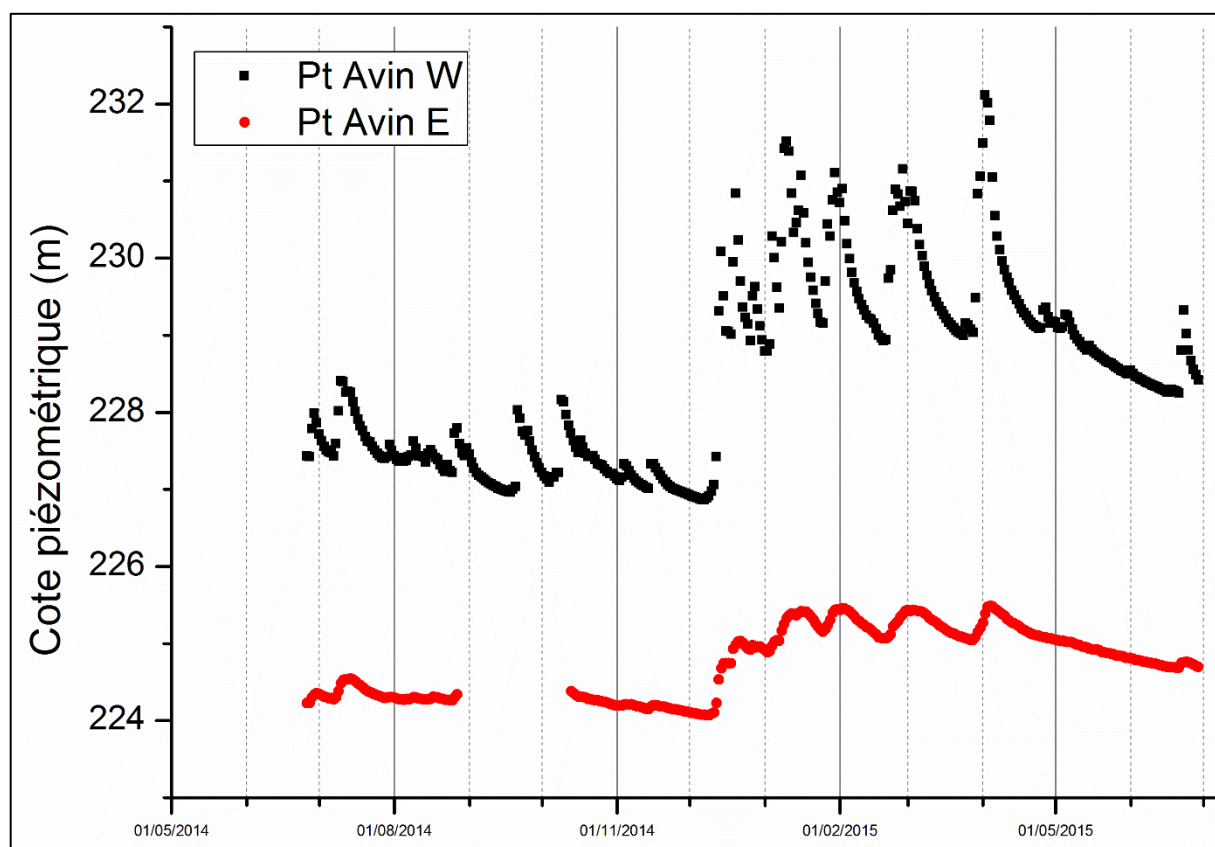


Figure 2-13 : Chroniques des piézomètres à proximité de la station « ST9- Ruisseau d’Havelange ».

Les piézomètres présents dans le bassin versant du Torrent de Bonne, sont localisés sur la carte suivante (Figure 2-14) :

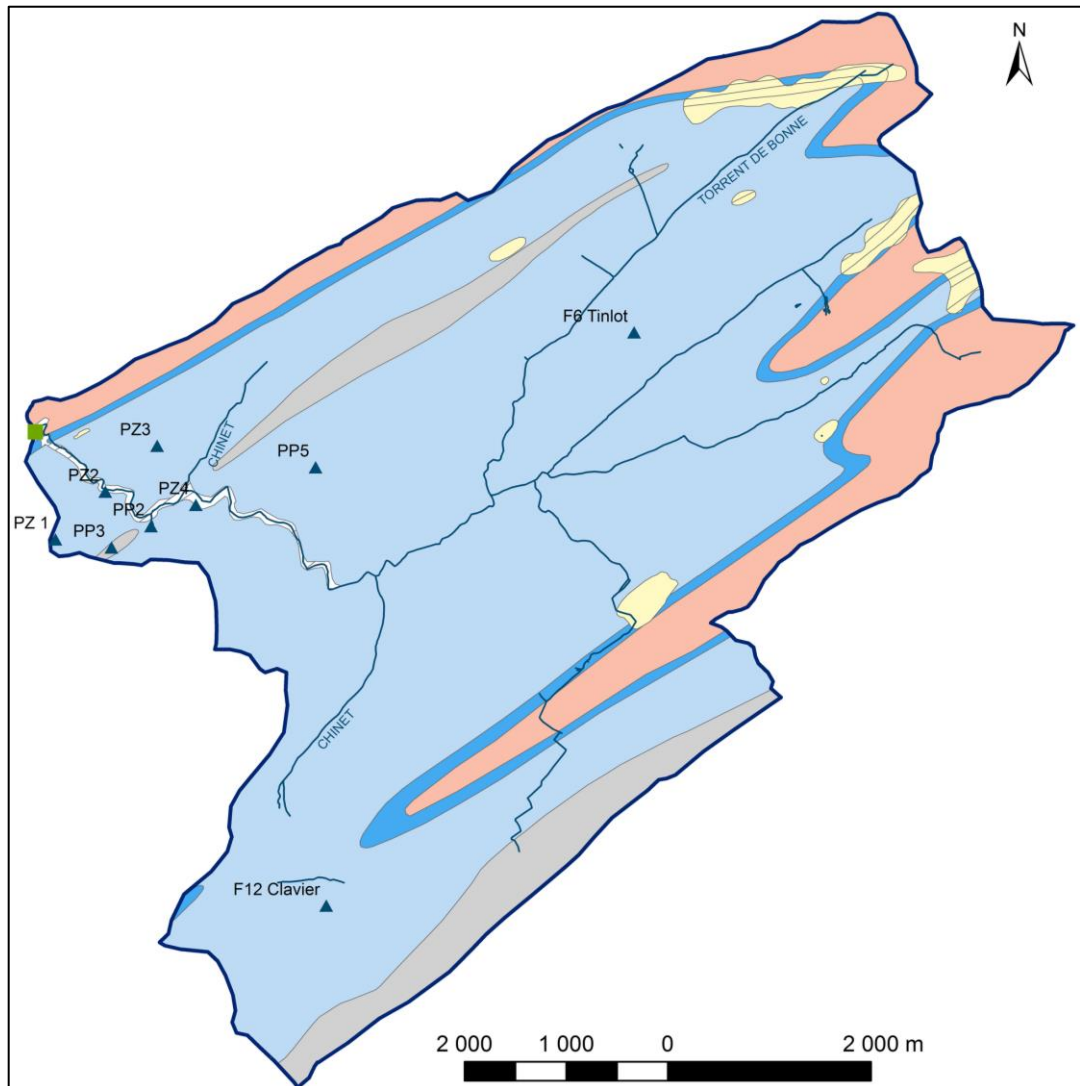


Figure 2-14 : localisation des piézomètres dans le bassin versant du Torrent de Bonne.

Quatre piézomètres ont des chroniques pendant notre période d'étude : le PP2, le PZ1, le F6 Tinlot, le F12 Clavier (Figure 2-15). Le critère de volume des données ayant éliminé les deux premiers et le F12 Clavier étant un peu plus proche de la station, c'est ce piézomètre qui a été rétenu comme référence.

On constate que les variations de hauteur de la nappe au PZ1 et au PP2 varient très peu car ces deux piézomètres sont proches du Hoyoux qui constitue le niveau de base régional. Signalons la similitude des variations de hauteur de nappe entre les piézomètres F12 – Clavier et F6 – Tinlot.

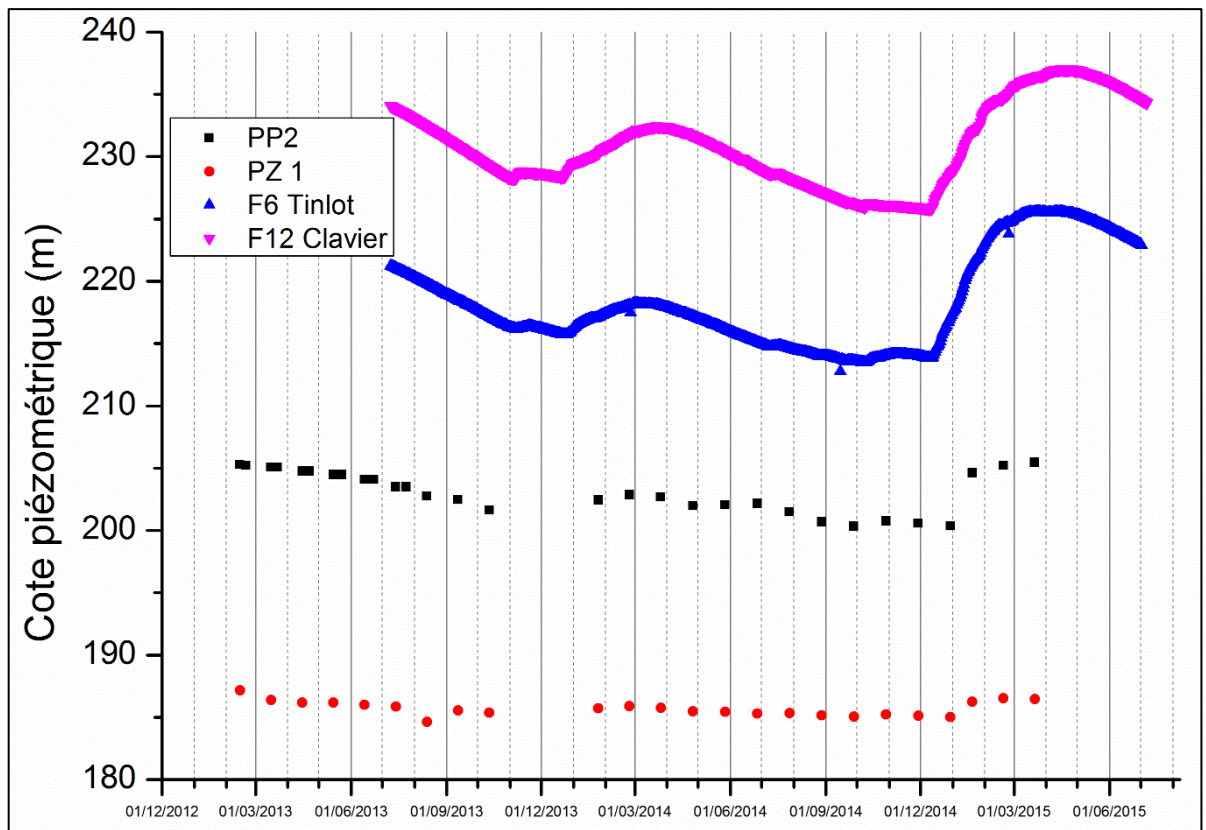


Figure 2-15 : Chroniques des piézomètres à proximité de la station « ST6- Torrent de Bonne ».

Pour le Triffoiy, la démarche a été un peu différente car ce bassin a été découpé en tronçon pour une analyse en long (soit pour différentes stations réparties le long de son talweg).

Les différents piézomètres présentés dans le bassin versant sont, d'amont en aval : le F5 Evelette, ceux du site expérimental d'Hodoumont, celui situé à Jamagne, les micro-piézomètres, le piézomètre situé à State et le F1 CILE (Figure 2-16).

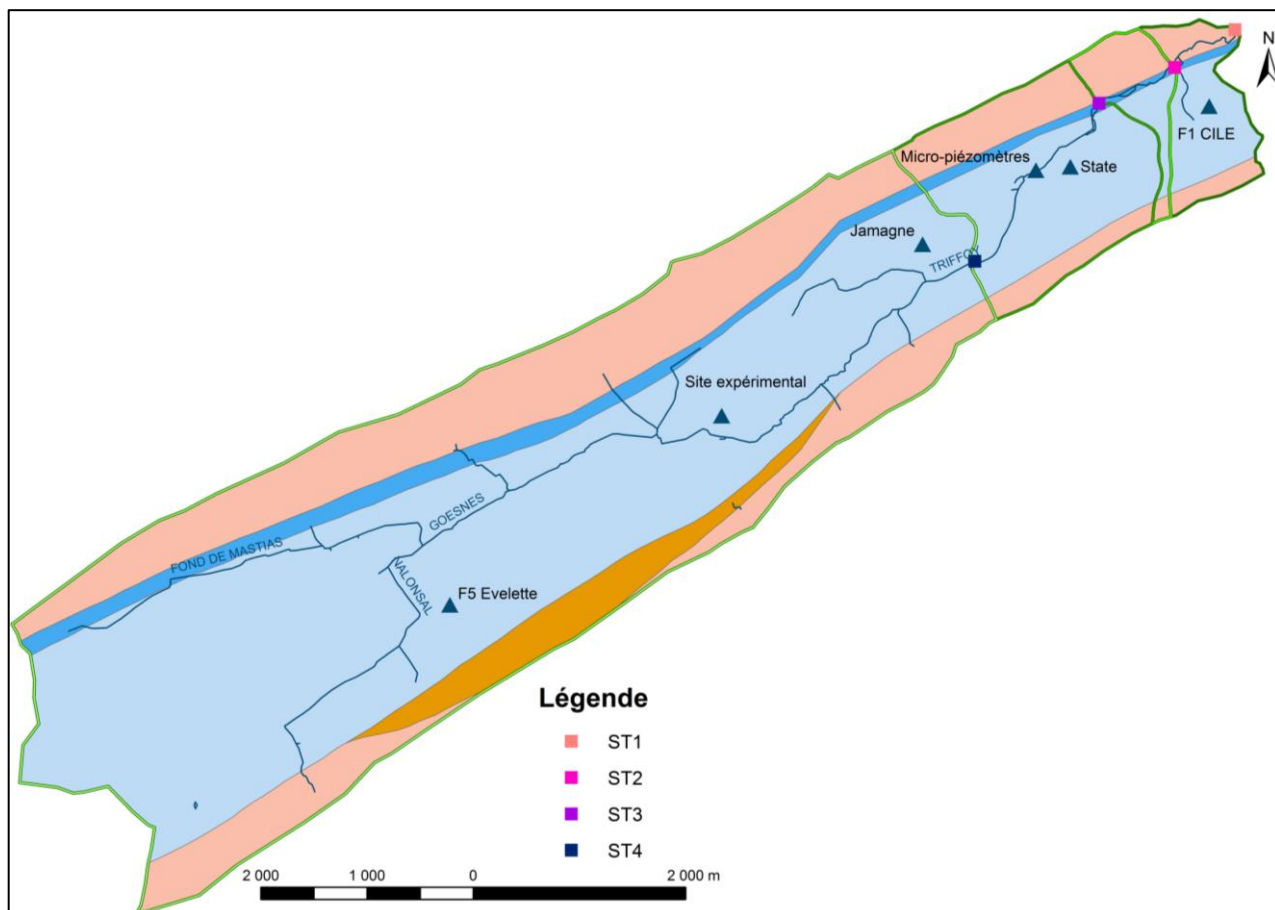


Figure 2-16 : localisation des piézomètres dans le bassin versant du Triffoiy.

Les piézomètres du site expérimental n'étaient pas utilisables comme référence car des essais de pompage y étaient réalisés. Les micro-piézomètres non plus car ils sont placés dans les berges du cours d'eau et donc influencés par la dynamique de l'eau de surface.

Des quatre restants, le F5- Evelette présente le plus grand nombre de données, il sera donc utilisé en tant que référence pour la station « ST1 – Exutoire du Triffoiy ». Afin d'obtenir une information plus locale, c'est le critère de proximité qui a orienté le choix des piézomètres de références pour les trois autres stations :

- Pour la station « ST2 – Source de Marchin », c'est le F1 – CILE qui sera utilisé comme référence.
- Pour la station « ST3 – State », le piézomètre « State »
- Pour la station « ST4 – Jamagne, le piézomètre « Jamagne ».

De manière identique aux autres bassins, les variations saisonnières de hauteur de la nappe aux différents piézomètres sont très similaires.

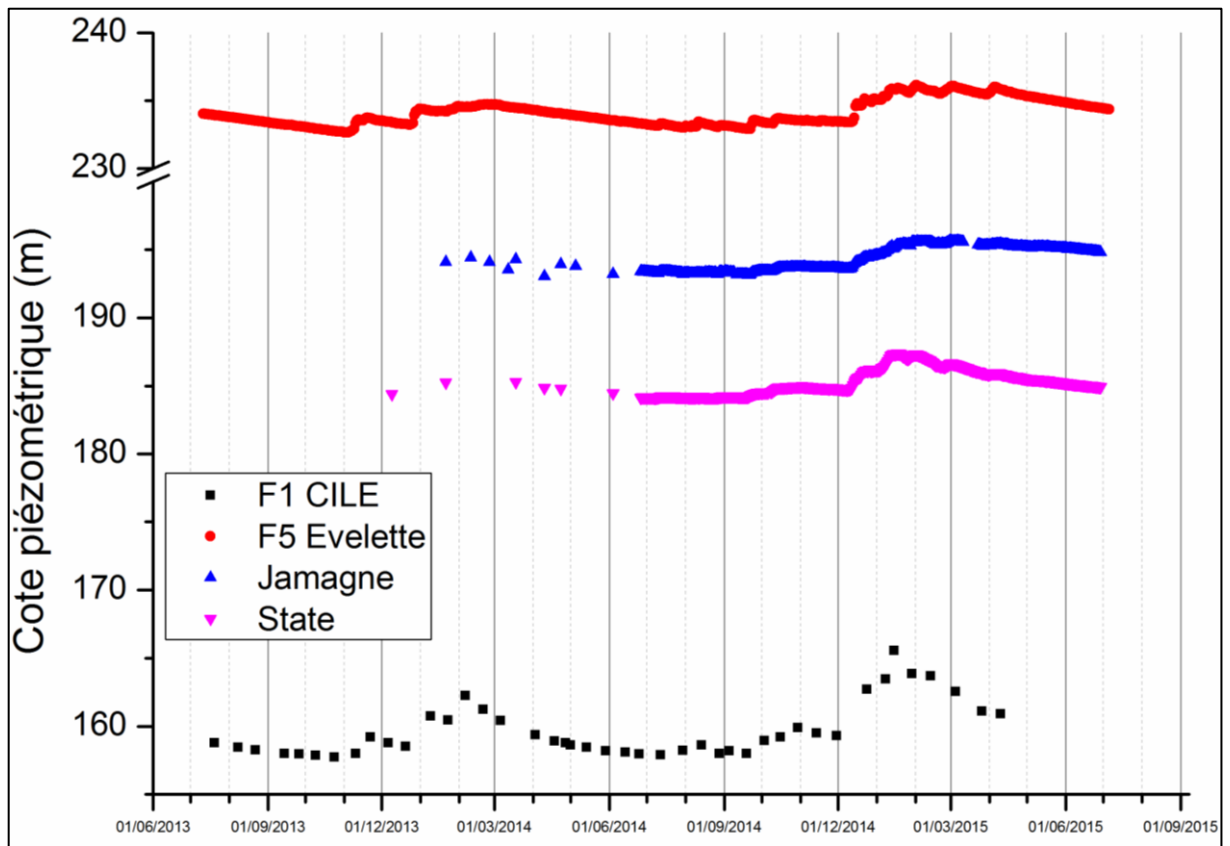


Figure 2-17 : Chroniques des piézomètres utilisables comme référence dans le bassin du Triffoy.

3. Résultats

Les bilans ont été réalisés à l'échelle des sous-bassins pour les bassins versants du Triffoiy et du Hoyoux amont, et à l'échelle du bassin versant pour celui du Torrent de Bonne. Les différents bassins et sous-bassins sont présentés dans la figure ci-dessous (Figure 3-1).

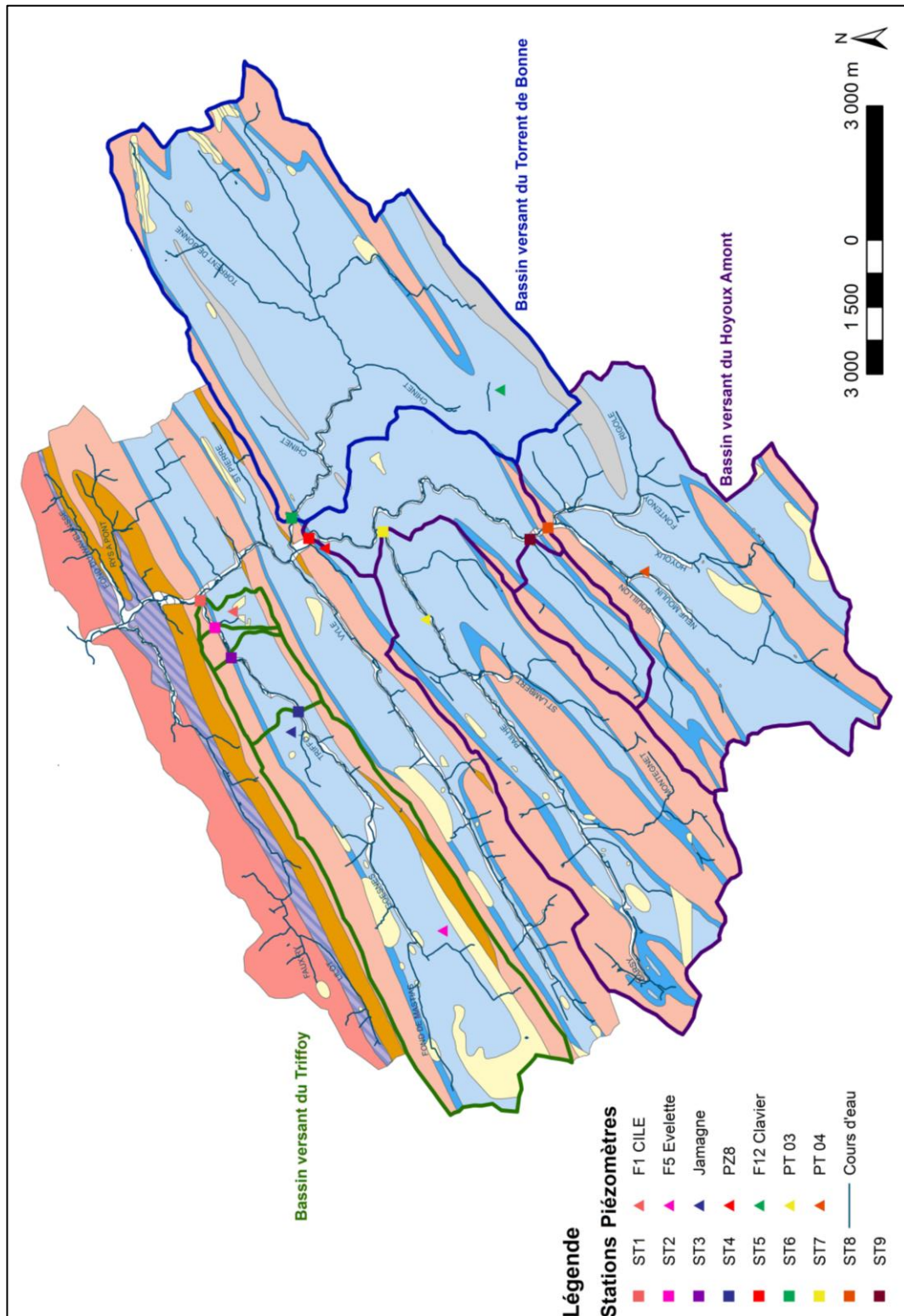


Figure 3-1 : Carte des bassins et sous-bassins versants concernés par la convention sur fond des unités hydrogéologiques.

Les trois bassins versant étudiés seront détaillés du point de vue morphométrie, occupation du sol et hydrologie.

Les bilans ont été réalisés pour l'année hydrologique commençant en septembre 2013 et finissant août 2014 ; et des bilans mensuels ont été réalisés tout au long de la période d'étude.

L'équation utilisée pour calculer le terme de fermeture des bilans, est :

$$P - ETR - Q_{capt} - Q_t - \Delta Res - \Delta RFU = \varepsilon_{fermeture}$$

L'interprétation des bilans se fera sur base du terme $\varepsilon_{fermeture}$ et de l'eau utile.

3.1. Bassin versant du Torrent de Bonne

3.1.1. Typologie

Le bassin hydrographique que délimite la station limnimétrique « ST6-Torrent de Bonne » se situe à l'extrémité est du bassin du Hoyoux et occupe une superficie de 50,9 km². La structure géologique de ce bassin est constituée pour l'essentiel de l'interconnexion des trois synclinaux calcaires : Ramelot-Tinlot, Fraiture et Seny (Figure 2-4 du Délivrable D.0). Les calcaires carbonifères représentent 75% de la surface du bassin (Figure 3-2).

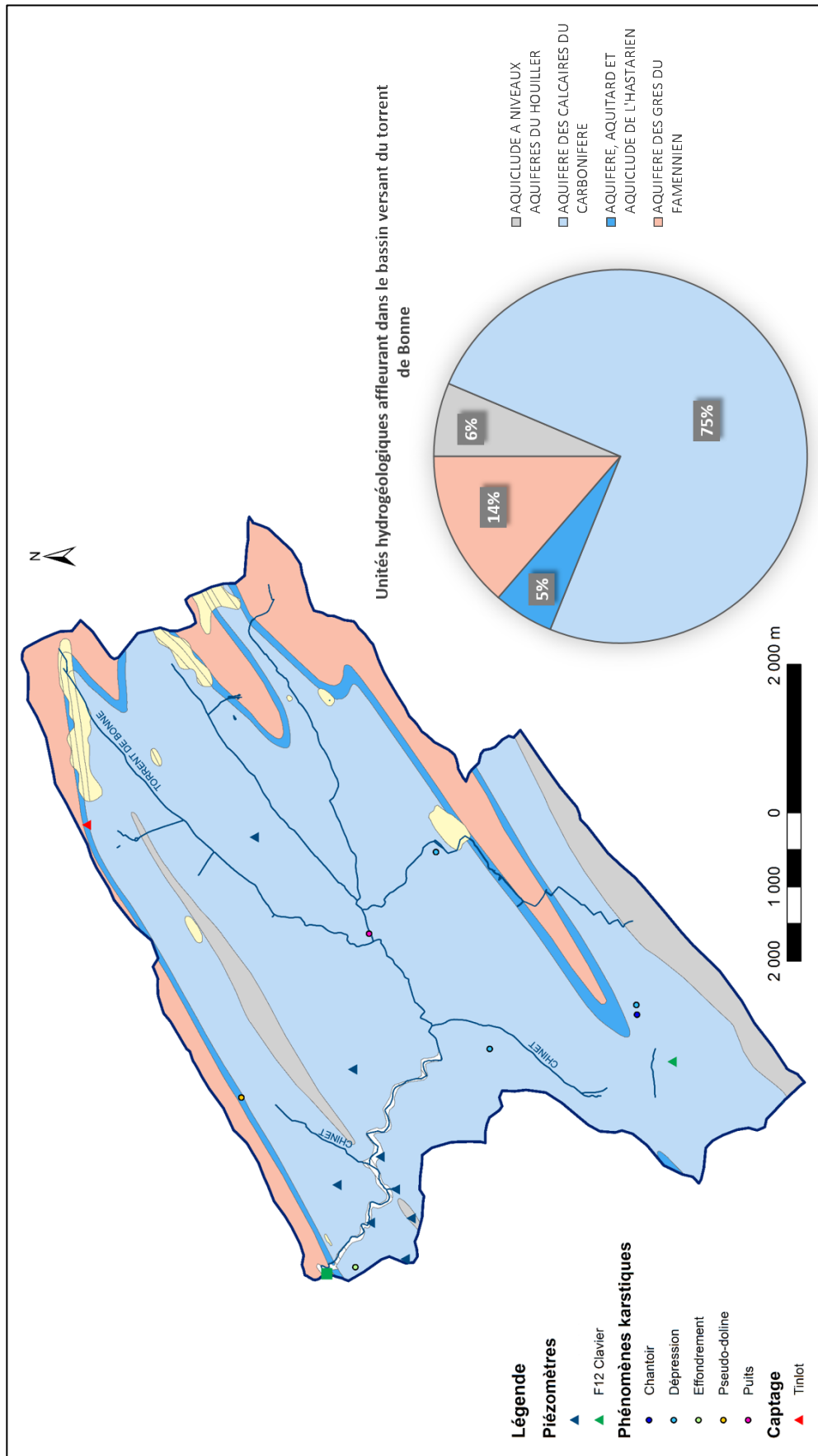


Figure 3-2 : Bassin versant du Torrent de Bonne avec indication des captages, piézomètres et phénomènes karstiques.

La cote altimétrique du talweg du Torrent de Bonne au niveau de la station est de 182 m.

Les sols de ce bassin sont essentiellement occupés par des cultures (47% de la surface du bassin) et des prairies (30%) ; viennent ensuite les forêts (13%) et les zones d'habitat. Les milieux naturels et les eaux superficielles ne représentent qu'une très faible portion de la surface du bassin (respectivement 1 et moins de 0.3%) (Figure 3-3).

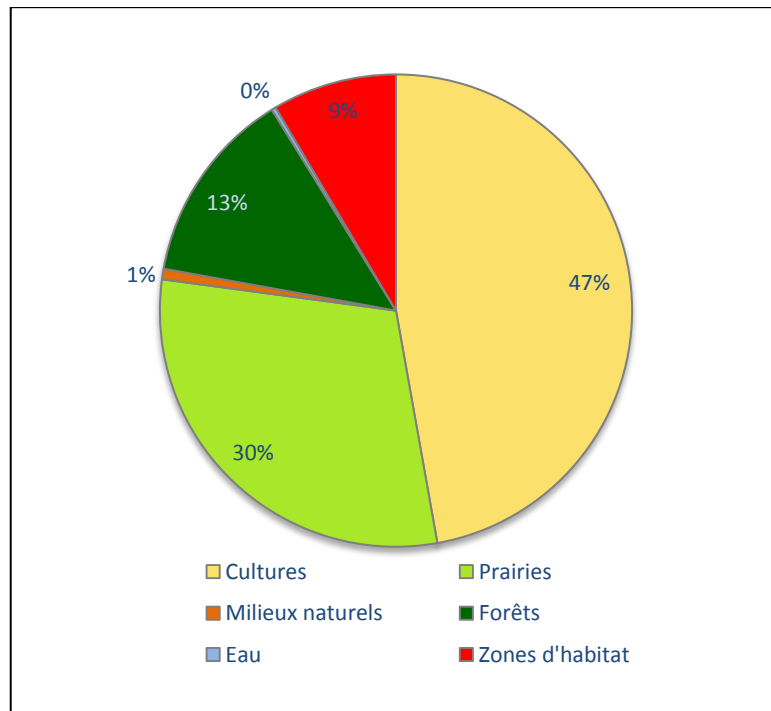


Figure 3-3 : Pourcentage des différentes catégories d'occupation du sol dans le bassin hydrographique du Torrent de Bonne.

3.1.2. Hydrologie

Les caractéristiques techniques de la station hydrographique du Torrent de Bonne sont décrites dans l'annexe 7.1.6 (page 88). Les données ont été collectées entre le 11/07/2013 et le 03/03/2015.

L'hydrogramme (Figure 3-4) montre, qu'à l'exception d'évènements pluvieux, les débits de cette rivière restent très faibles, variant de 0.002 m³/s à maximum 1.62 m³/s et ce malgré une superficie de 50.9 km². Ce faible volume se confirme lors du calcul de la lame d'eau écoulée : entre septembre 2013 et août 2014, seul 20.6 mm se sont écoulés (2.3 % des précipitations). Par comparaison, la lame d'eau écoulée, durant la même période, pour bassin du Triffoy s'élève à 129 mm (14 % des précipitations).

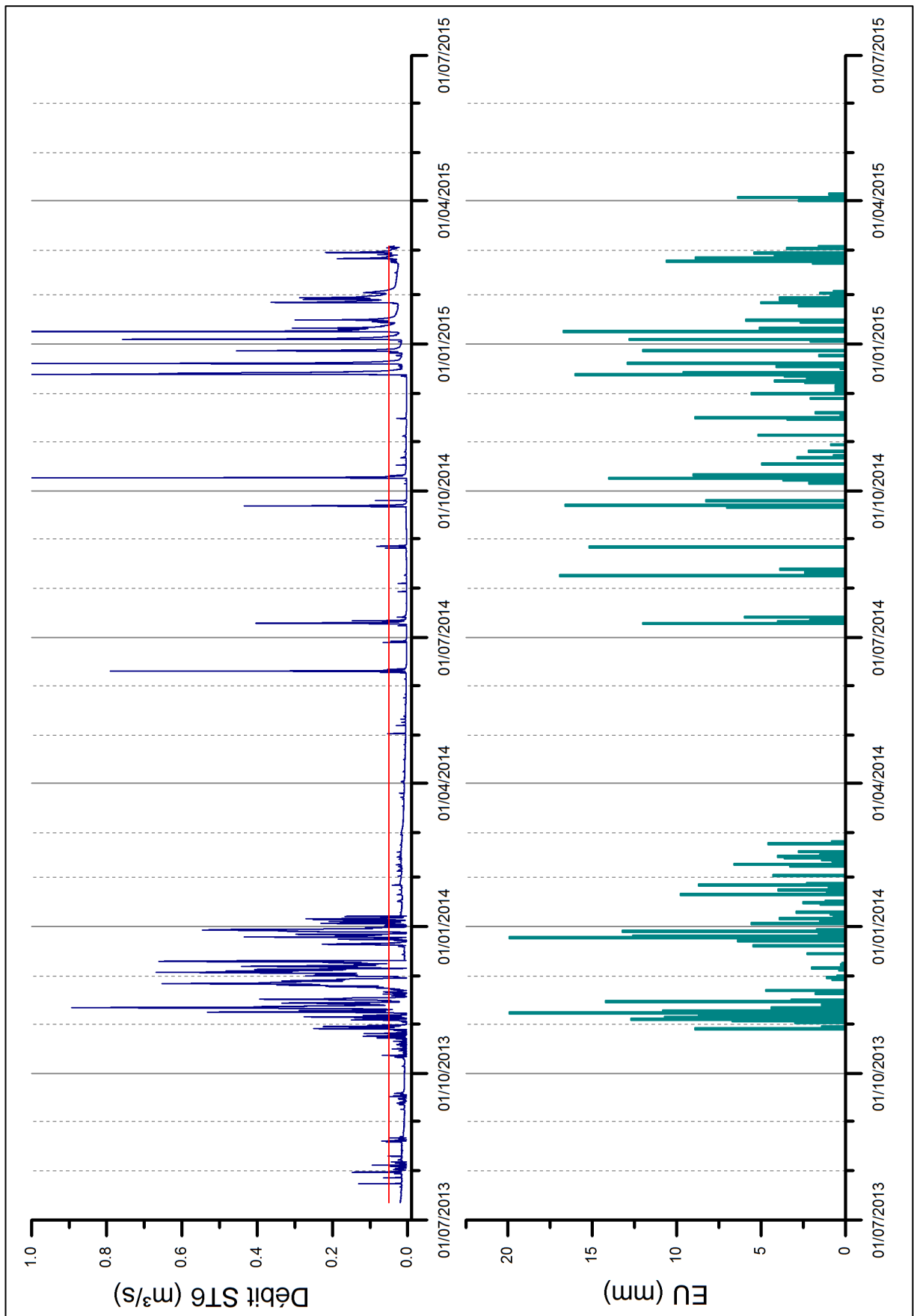


Figure 3-4 : Hydrogramme du Torrent de Bonne avec indication du débit maximal mesuré sur le terrain et graphique de l'eau utile.

3.1.3. Bilans hydrogéologiques du bassin versant du Torrent de Bonne

3.1.3.1. Bilan hydrogéologique annuel

Le bilan calculé sur l'année hydrologique allant de septembre 2013 à août 2014 donne les valeurs suivantes :

P	= ETR	+ Q _{capt}	+ Q _t	+ ΔRes	+ ΔRFU	+ ε _{fermeture}
896.90 mm	= 612.30 mm	+ 0.35 mm	+ 20.57 mm	- 0.81 mm	+ 67.25 mm	+ 197.24 mm
100 %	= 68.27 %	+ 0.04 %	+ 2.29 %	- 0.09 %	+ 7.50 %	+ 22 %

L'évapotranspiration réelle représente 68 % des précipitations. Les 32 % restant correspondent à l'eau utile, soit la quantité d'eau disponible pour le ruissellement et l'infiltration. La lame d'eau écoulée à la station du Torrent de Bonne représente un peu plus de 2 % des pluies annuelles. Le terme de fermeture atteint 22 %, ce qui traduit un déficit d'écoulement vraisemblablement lié à l'existence d'un export important d'eau souterraine vers le Hoyoux (Terme Q_{out} du bilan, Éq. 3-1).

3.1.3.2. Les bilans hydrogéologiques mensuels

Les résultats des bilans mensuels sont donnés dans le

Tableau 3-1.

Lorsque l'eau utile est présente, le terme de fermeture indique un déficit d'écoulement pouvant atteindre 81 % (décembre 2014). En l'absence d'eau utile, suite à un écoulement extrêmement limité (0.002 m³/s) du Torrent, notamment en période d'étiage, le terme de fermeture est nul.

	P mm	Eto mm	ETR mm	RFU mm	ΔRFU mm	EU mm	Q _{capt} mm	Q _t mm	Δres mm	ε _{fermeture} mm %		
août-13	27.60	90.90	55.95	41.66	-28.35	0.00	0.03	0.82	-0.73	-0.12	-0.45	Excédent
sept.-13	57.30	50.50	50.50	48.46	6.80	0.00	0.03	0.54	-0.18	-0.39	-0.68	Excédent
oct.-13	71.00	30.90	30.90	88.56	40.10	0.00	0.03	1.19	0.81	-2.03	-2.86	Excédent
nov.-13	125.60	11.50	11.50	125.00	36.44	77.66	0.03	6.83	-0.51	71.30	56.77	Déficit
déc.-13	80.40	14.00	14.00	125.00	0.00	66.40	0.03	6.88	0.19	59.30	73.76	Déficit
janv.-14	61.40	14.80	14.80	125.00	0.00	46.60	0.03	1.61	0.42	44.54	72.54	Déficit
févr.-14	57.00	21.80	21.80	125.00	0.00	35.20	0.03	0.83	-0.06	34.41	60.36	Déficit
mars-14	17.60	45.90	43.49	99.11	-25.89	0.00	0.03	0.60	-0.72	0.09	0.54	Déficit
avr.-14	13.40	67.90	49.12	63.39	-35.72	0.00	0.03	0.38	-0.42	0.01	0.08	Déficit
mai-14	60.80	83.80	71.70	52.50	-10.90	0.00	0.03	0.29	-0.21	-0.11	-0.18	Excédent
juin-14	104.20	102.50	102.50	54.20	1.70	0.00	0.03	0.57	-0.15	-0.44	-0.43	Excédent
juil.-14	127.40	94.00	94.00	87.60	33.40	0.00	0.03	0.62	0.00	-0.65	-0.51	Excédent
août-14	120.80	74.70	74.70	125.00	37.40	8.70	0.03	0.24	0.00	8.43	6.98	Déficit
sept.-14	76.20	51.40	51.40	125.00	0.00	24.80	0.03	0.46	0.01	24.30	31.90	Déficit
oct.-14	76.00	27.30	27.30	125.00	0.00	48.70	0.03	0.98	0.00	47.70	62.76	Déficit
nov.-14	41.20	12.60	12.60	125.00	0.00	28.60	0.03	0.20	-0.01	28.39	68.90	Déficit
déc.-14	80.80	9.70	9.70	125.00	0.00	71.10	0.03	3.67	1.90	65.51	81.08	Déficit
janv.-15	76.60	12.90	12.90	125.00	0.00	63.70	0.00	4.67	0.66	58.37	76.21	Déficit
févr.-15	49.00	14.60	14.60	125.00	0.00	34.40	0.00	2.07	0.42	31.91	65.12	Déficit

Tableau 3-1 : Bilans mensuels du Torrent de Bonne.

Le contexte hydrogéologique de ce bassin explique cet important déficit : 75 % de la superficie du bassin se situe au niveau de l'aquifère des calcaires du Carbonifère. De plus, les bancs calcaires se prolongent en direction du Hoyoux dont la cote altimétrique du talweg (168.8 m à la station de Modave) est inférieure à celle du Torrent de Bonne (182 m) au niveau du seuil hydrogéologique. En conséquence, le niveau de base de la nappe s'équilibre sur la cote altimétrique du talweg du Hoyoux ; le Torrent de Bonne se retrouve donc perché au-dessus du niveau de la nappe et devient ainsi une rivière infiltrante.

À l'échelle du bassin, lorsque ces résultats mensuels sont mis en lien avec les données piézométriques, ils permettent de mieux comprendre les réactions de la nappe aquifère par rapport à l'eau utile (Figure 3-5). En prenant le piézomètre F12-Clavier (Figure 3-2) comme référence, on constate que les fluctuations saisonnières sont de l'ordre de 8 m et qu'un délai de 2 à 4 mois entre la présence d'eau utile et la remontée de la nappe est observé. En 2013, la fin de l'étiage a lieu dès l'apparition de l'eau utile, une faible remontée est observée au cours du premier mois d'eau utile (novembre 2013). Cette légère remontée est suivie de la reprise très faible de la vidange. C'est à la fin du deuxième mois (décembre) d'eau utile que la recharge effective de la nappe commence. La fin de l'étiage de 2014 s'observe au cours du troisième mois (octobre) présentant de l'eau utile, comme en 2013 on constate une légère remontée suivie d'une très faible vidange. C'est lors du cinquième mois (décembre) de présence d'eau utile que la nappe commence à se recharger de manière importante. Cette différence de dynamique est liée à une répartition différente de l'eau utile qui, en 2014, apparaît dès le mois d'août mais en plus faible quantité comparée à 2013. En 2014 et 2015, la nappe a atteint son niveau maximal vers fin mars – début avril.

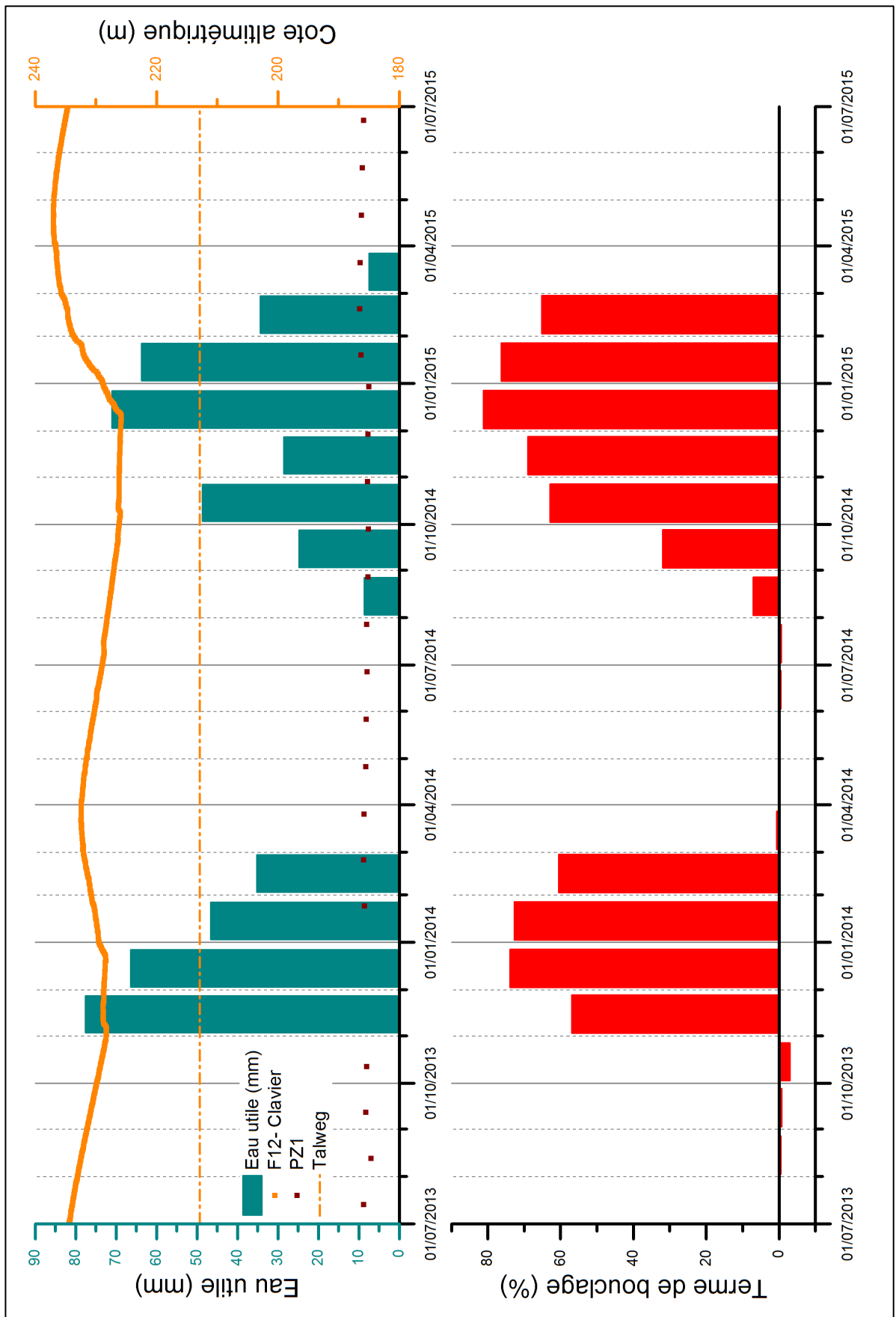


Figure 3-5 : Graphique des termes de bouclage mensuels de la station de Torrent de Bonne ; de l'eau utile mensuelle et des relevés piézométriques du piézomètre F12- Clavier.

3.2. Bassin versant du Hoyoux Amont

3.2.1. Typologie

Le bassin hydrographique du Hoyoux amont est le bassin délimité par la station « ST5-Modave » située à environ 2 km en aval de la confluence avec le ruisseau de Pailhe. La structure géologique de ce bassin est constituée d'une succession de synclinaux calcaires (presque 60% de la superficie du bassin) et d'anticlinaux gréseux (30% de la superficie du bassin) (Figure 3-6). L'exutoire de ce bassin est situé à la limite entre les calcaires carbonifères et les grès famenniens. Le bassin comprend donc la partie SW de la structure synclinale de Modave. La superficie du bassin est de 94,3 km².

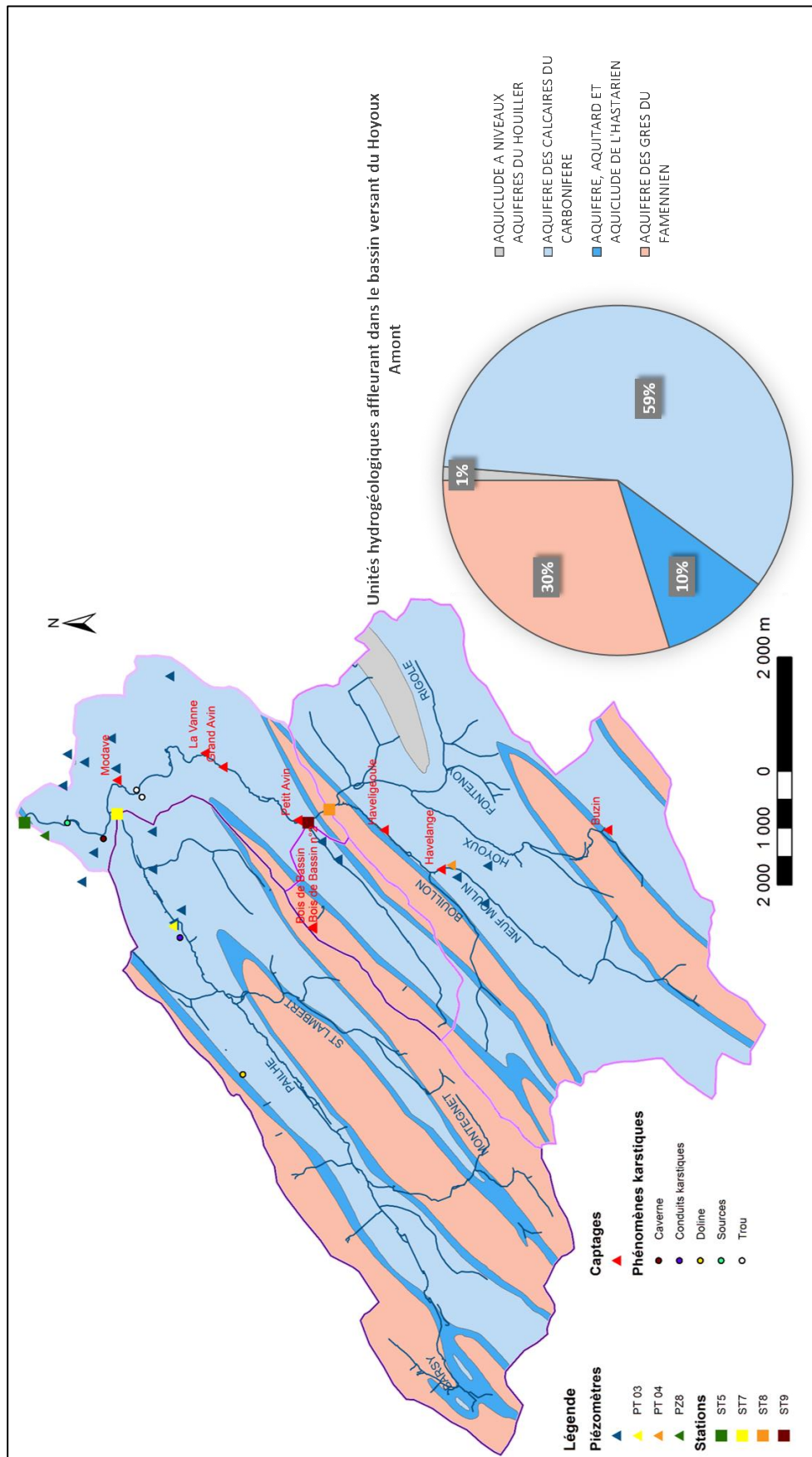


Figure 3-6 : Bassin versant du Hoyoux Amont avec indications des stations limnimétriques, des captages, des piézomètres et des phénomènes karstiques.

Le talweg du Hoyoux à la station de Modave (ST5) est à la cote altimétrique de 168.8m et croit vers l'amont du bassin avec une cote altimétrique de 227.6 à la station de Petit Avin (ST8) (Figure 3-6).

L'occupation des sols de ce bassin se partage entre les prairies (35% de la surface du bassin), les terres de cultures (33%) et les forêts (23%). Les zones d'habitat n'occupent qu'une faible partie du bassin (7%) et, les milieux naturels et les eaux superficielles ne représentent qu'une très faible portion de la surface du bassin (respectivement 1 et 0.4%) (Figure 3-7).

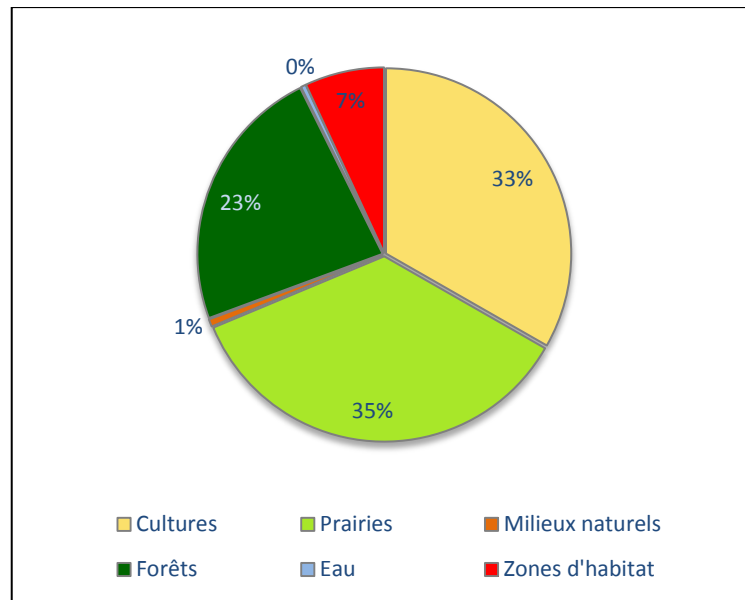


Figure 3-7 : Pourcentage des différentes catégories d'occupation du sol dans le bassin hydrographique du Hoyoux amont.

3.2.2. Hydrologie

Les caractéristiques techniques de la station hydrographique du Hoyoux amont (ST5 - Modave) sont décrites à l'annexe 7.1.5 (page 87). Les données ont été collectées entre le 10 juillet 2013 et le 30 juin 2015.

L'hydrogramme (Figure 3-8) montre que les débits du Hoyoux sont les plus élevés des trois bassins versants étudiés, les débits varient de 0.45 m³/s à 7.89 m³/s. Ces volumes importants sont confirmés lors du calcul de la lame d'eau écoulée : entre septembre 2013 et août 2014, 195.8 mm se sont écoulés soit presque 22% des précipitations. Pour comparaison, la lame d'eau écoulée au cours de la même période, pour le bassin du Triffoy est de 129 mm (14% des précipitations) et seulement 20.6 mm (2.3% des précipitations) pour le bassin du Torrent de Bonne. En dehors des périodes pluvieuses, le débit du Hoyoux semble tendre vers un débit de base stable et proche de 0.5 m³/s.

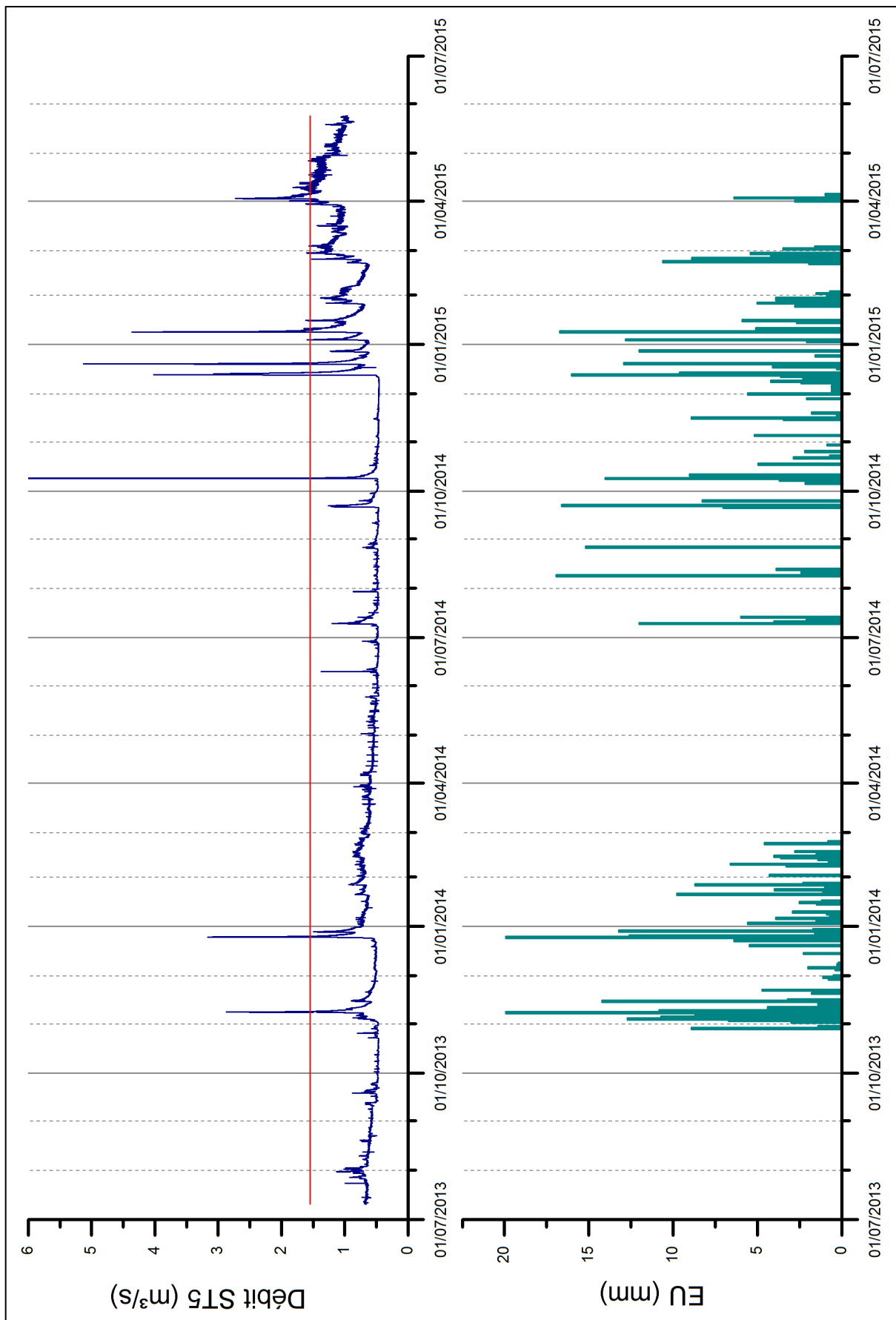


Figure 3-8 : Hydrogramme du Hoyoux amont avec indication du débit maximal mesuré sur le terrain et graphique de l'eau utile.

3.2.3. Bilans hydrogéologiques du bassin versant du Hoyoux Amont (ST5)

3.2.3.1. Bilan annuel

Le bilan calculé sur l'année hydrologique allant de septembre 2013 à août 2014 donne les valeurs suivantes :

P	= ETR	+ Q_{capt}	+ Q_t	+ ΔRes	+ ΔRFU	+ $\epsilon_{\text{fermeture}}$
896.90 mm	= 612.30 mm	+ 251.69 mm	+195.77 mm	- 32.50 mm	+ 67.25 mm	- 197.62mm
100 %	= 68.27 %	+ 28.06 %	+ 21.83 %	- 3.62 %	+ 7.50 %	- 22.04 %

L'évapotranspiration réelle atteint 68 % des précipitations. Les 32 % restant correspondent à l'eau utile, soit la quantité d'eau disponible pour le ruissellement et l'infiltration. La lame d'eau écoulée à la station de Modave représente presque 22 % des précipitations. Le volume exporté par les captages représente 28 % de la pluie annuelle. L'erreur de fermeture est importante et représente -22 % du volume des précipitations. Le bilan est excédentaire tout comme l'étaient les bilans annuels effectués lors du projet Synclin'EAU (Brouyère et al., 2008b). Un flux entrant important est donc à considérer (Terme Q_{in} du bilan, (Éq. 2-1)).

Le contexte hydrogéologique explique cet important excédent : 59% de la surface du bassin se situe au niveau de l'aquifère des calcaires carbonifères ; de plus la partie aval du bassin recoupe transversalement la structure synclinale de Modave qui présente un double ennoyage en direction du Hoyoux. Celui-ci dont la cote altimétrique du talweg (168.8m à la station de Modave) est inférieure à celle du Torrent de Bonne (182m), récolte les écoulements souterrains de toute cette structure synclinale.

3.2.3.2. Bilans mensuels

Les résultats des bilans mensuels sont repris dans le Tableau 3-2.

À l'exception de trois mois montrant un léger déficit d'écoulement (novembre 2013, octobre 2014, janvier 2015) ; on constate que l'absence ou la présence d'eau utile n'influence pas le terme de fermeture qui reste négatif indiquant un excès d'écoulement pouvant atteindre 317% (mars 2015).

	P mm	Eto mm	ETR mm	RFU mm	ΔRFU mm	EU mm	Qcapt mm	Qt mm	ΔRes mm	efermeture		
										mm	%	
août-13	27.60	90.90	55.95	41.66	-28.35	0.00	23.78	17.99	-16.12	-25.64	-92.91	Excédent
sept.-13	57.30	50.50	50.50	48.46	6.80	0.00	23.78	14.78	-33.29	-5.27	-9.21	Excédent
oct.-13	71.00	30.90	30.90	88.56	40.10	0.00	23.78	13.71	4.09	-41.58	-58.56	Excédent
nov.-13	125.60	11.50	11.50	125.00	36.44	77.66	23.78	18.68	4.95	30.26	24.09	Déficit
déc.-13	80.40	14.00	14.00	125.00	0.00	66.40	23.78	18.51	27.11	-3.00	-3.73	Excédent
janv.-14	61.40	14.80	14.80	125.00	0.00	46.60	19.57	20.02	18.07	-11.06	-18.02	Excédent
févr.-14	57.00	21.80	21.80	125.00	0.00	35.20	19.57	18.80	1.76	-4.93	-8.66	Excédent
mars-14	17.60	45.90	43.49	99.11	-25.89	0.00	19.57	17.81	-17.36	-20.02	-113.72	Excédent
avr.-14	13.40	67.90	49.12	63.39	-35.72	0.00	19.57	15.64	-18.08	-17.14	-127.87	Excédent
mai-14	60.80	83.80	71.70	52.50	-10.90	0.00	19.57	14.88	-17.84	-16.62	-27.33	Excédent
juin-14	104.20	102.50	102.50	54.20	1.70	0.00	19.57	13.53	-4.66	-28.44	-27.30	Excédent
juil.-14	127.40	94.00	94.00	87.60	33.40	0.00	19.57	15.24	2.83	-37.63	-29.54	Excédent
août-14	120.80	74.70	74.70	125.00	37.40	8.70	19.57	14.17	-1.25	-23.79	-19.70	Excédent
sept.-14	76.20	51.40	51.40	125.00	0.00	24.80	19.57	14.79	-1.48	-8.07	-10.59	Excédent
oct.-14	76.00	27.30	27.30	125.00	0.00	48.70	19.57	15.58	-0.41	13.96	18.37	Déficit
nov.-14	41.20	12.60	12.60	125.00	0.00	28.60	19.57	12.91	-2.67	-1.21	-2.94	Excédent
déc.-14	80.80	9.70	9.70	125.00	0.00	71.10	19.57	23.75	62.01	-34.23	-42.36	Excédent
janv.-15	76.60	12.90	12.90	125.00	0.00	63.70	23.76	28.71	-0.40	11.64	15.19	Déficit
févr.-15	49.00	14.60	14.60	125.00	0.00	34.40	20.65	22.25	35.68	-44.18	-90.17	Excédent
mars-15	43.20	35.70	35.70	125.00	0.00	7.50	7.55	32.56	104.41	-137.02	-317.17	Excédent
avr.-15	44.80	67.30	65.86	103.94	-21.06	0.00	3.89	40.31	30.97	-75.16	-167.78	Excédent

Tableau 3-2 : Bilans mensuels du Hoyoux amont.

Les bilans mensuels permettent d'appréhender la dynamique de la nappe aquifère par rapport à l'eau utile (Figure 3-9). En prenant le piézomètre PZ8 (Figure 3-6) comme référence, on constate que les fluctuations saisonnières sont de l'ordre de 0.2 m ; bien que la vidange s'arrête dès l'apparition d'eau utile, un délai de 5 mois est observé pour 2014-2015, entre la présence d'eau utile et la remontée effective de la nappe. En 2014 et 2015, la nappe atteint son niveau maximal durant le mois de février.

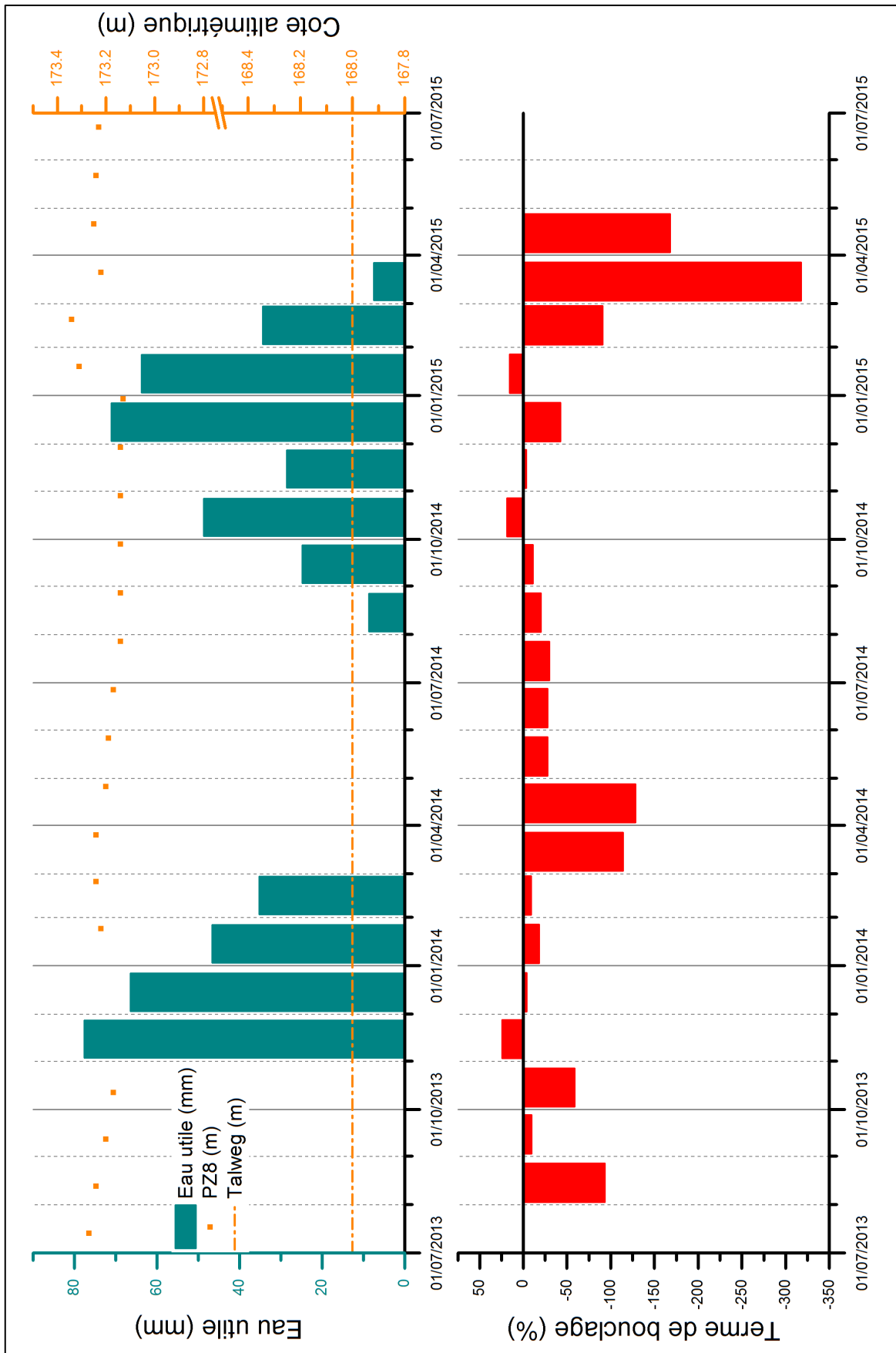


Figure 3-9 : Graphique des termes de bouclage mensuels de la station de Modave ; de l'eau utile mensuelle et des relevés piézométriques du piézomètre PZ8.

3.2.4. Bilans hydrogéologiques : Station du Ruisseau de Pailhe (ST7)

Le sous-bassin délimité par la station hydrographique « ST7-Ruisseau de Pailhe » est celui d'un affluent du Hoyoux situé en rive gauche et s'écoulant du SW au NE (Figure 3-6). Celui-ci draine une surface de 38,8 km². Le cours d'eau draine deux synclinaux calcaires du Carbonifère (43% de la superficie du sous-bassin) séparés par un anticlinal gréseux du Famennien (44% de la superficie du sous-bassin).

Les caractéristiques techniques de cette station sont décrites à l'annexe 7.1.7 (page 89). Les données ont été collectées entre le 11 juillet 2013 et le 22 juin 2015.

L'hydrogramme (Figure 3-10) montre des débits variant de 0.04 m³/s à maximum¹ 1.09 m³/s. Ces débits sont proches de ceux observés dans le Triffois, bien qu'un peu plus faible pour une superficie légèrement plus importante (38.8 km² et 30.5 km²). Ce faible volume se confirme lors du calcul de la lame d'eau écoulée entre septembre 2013 et août 2014, elle s'élève à 93.6 mm (10.4 % des précipitations) alors que celle du Triffois, s'élève à 129 mm (14 % des précipitations).

¹ Suite à un problème instrumental, les valeurs de débits de l'hiver 2014-2015 n'ont pas pu être calculées. Or, c'est durant cette période que les maxima de débits sont observés aux autres stations étudiées.

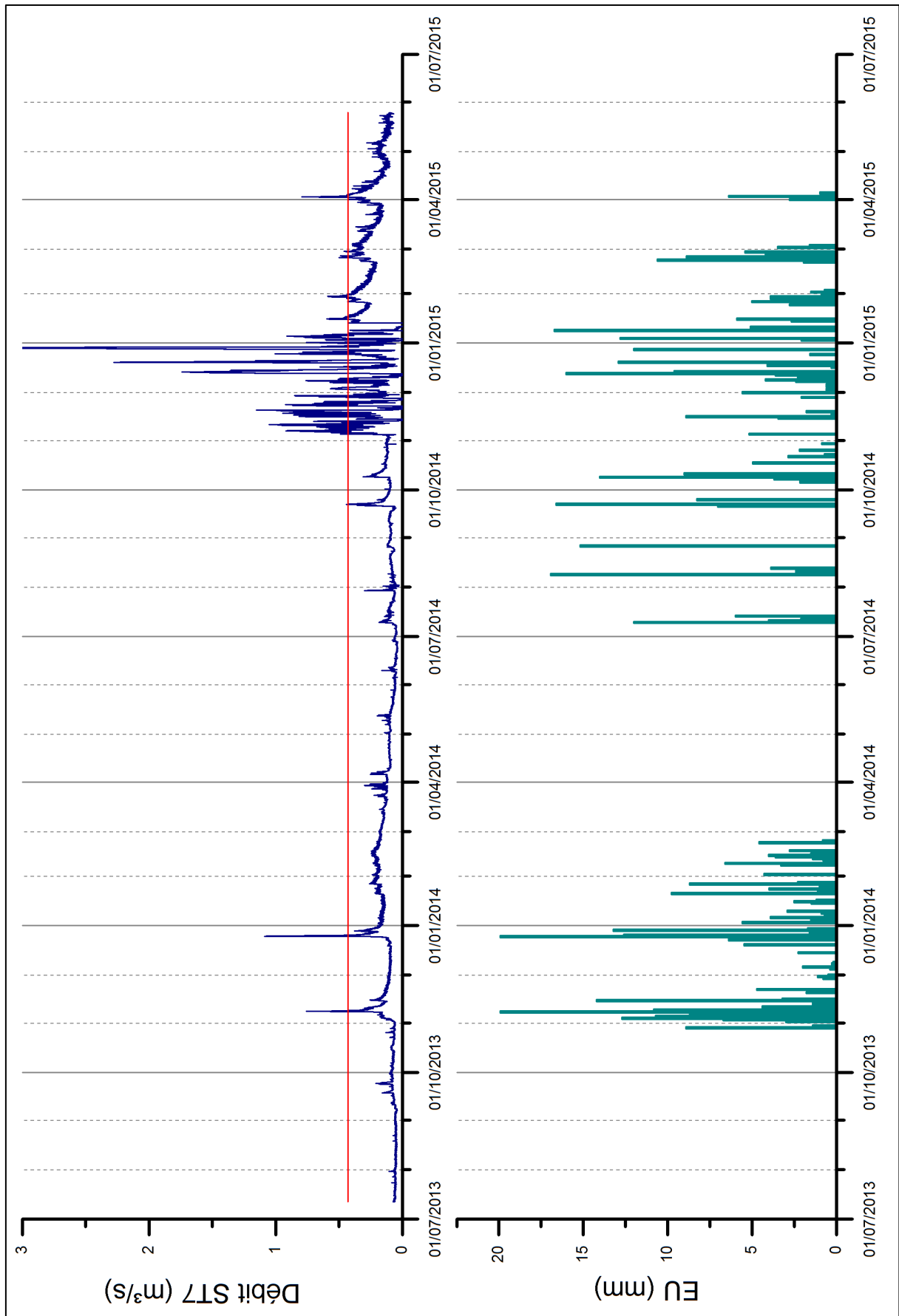


Figure 3-10 : Hydrogramme du ruisseau de Pailhe avec indication du débit maximal mesuré sur le terrain et graphique de l'eau utile.

3.2.4.1. Bilan annuel

Le bilan calculé sur l'année hydrologique allant de septembre 2013 à août 2014 donne les valeurs suivantes :

P	= ETR	+ Q_{capt}	+ Q_t	+ ΔRes	+ ΔRFU	+ $\epsilon_{\text{fermeture}}$
896.90 mm	= 612.30 mm	+ 0 mm	+ 93.57 mm	+ 5.53 mm	+ 67.25 mm	118.26 mm
100 %	= 68.27 %	+ 0 %	+ 10.43 %	+ 0.61 %	+ 7.50 %	13.19 %

L'évapotranspiration réelle atteint 68 % des précipitations. Les 32 % restant correspondent à l'eau utile, soit la quantité d'eau disponible pour le ruissellement et l'infiltration. La lame d'eau écoulée à la station de Pailhe ne représente que 10 % des précipitations. Le terme de fermeture de 13 % indique un faible déficit d'écoulement vraisemblablement lié à l'existence d'un export (Terme Q_{out} du bilan, (Éq. 2-1)).

Le contexte hydrogéologique de ce sous-bassin explique ce déficit: les bancs calcaires du synclinal (Figure 3-6) se prolongent vers le Hoyoux dont la cote altimétrique du talweg (183 m) est inférieure à celle du ruisseau de Pailhe (186m au niveau de la station limnimétrique) ; il y donc un flux d'eau souterraine en direction du Hoyoux dans le synclinal calcaire. Cette hypothèse est confirmée par la présence de nombreuses sources et des galeries de captage de Vivaqua le long du Hoyoux à la limite du sous-bassin du ruisseau de Pailhe (Brouyère et al, 2008b). Le ruisseau de Pailhe se retrouve perché au-dessus du niveau de la nappe et devient ainsi une rivière infiltrante.

3.2.4.2. Bilans mensuels

Les résultats des bilans mensuels sont représentés dans le Tableau 3-3.

	P mm	Eto mm	ETR mm	RFU mm	ΔRFU mm	EU mm	Qcapt mm	Qt mm	ΔRes mm	efermeture mm %		
août-13	27.60	90.90	55.95	41.66	-28.35	0.00	0.00	3.59	-0.78	-2.81	-10.16	Excédent
sept.-13	57.30	50.50	50.50	48.46	6.80	0.00	0.00	4.94	0.94	-5.88	-10.26	Excédent
oct.-13	71.00	30.90	30.90	88.56	40.10	0.00	0.00	5.05	1.20	-6.25	-8.80	Excédent
nov.-13	125.60	11.50	11.50	125.00	36.44	77.66	0.00	10.50	4.13	63.02	50.18	Déficit
déc.-13	80.40	14.00	14.00	125.00	0.00	66.40	0.00	10.10	6.59	49.70	61.82	Déficit
janv.-14	61.40	14.80	14.80	125.00	0.00	46.60	0.00	11.93	6.49	28.18	45.90	Déficit
févr.-14	57.00	21.80	21.80	125.00	0.00	35.20	0.00	12.31	1.92	20.97	36.79	Déficit
mars-14	17.60	45.90	43.49	99.11	-25.89	0.00	0.00	10.21	-10.16	-0.05	-0.31	Excédent
avr.-14	13.40	67.90	49.12	63.39	-35.72	0.00	0.00	7.32	-5.42	-1.91	-14.23	Excédent
mai-14	60.80	83.80	71.70	52.50	-10.90	0.00	0.00	5.97	-4.16	-1.81	-2.97	Excédent
juin-14	104.20	102.50	102.50	54.20	1.70	0.00	0.00	3.68	-1.96	-1.72	-1.65	Excédent
juil.-14	127.40	94.00	94.00	87.60	33.40	0.00	0.00	5.73	2.84	-8.57	-6.73	Excédent
août-14	120.80	74.70	74.70	125.00	37.40	8.70	0.00	5.81	3.11	-0.23	-0.19	Excédent
sept.-14	76.20	51.40	51.40	125.00	0.00	24.80	0.00	7.74	2.45	14.61	19.17	Déficit
oct.-14	76.00	27.30	27.30	125.00	0.00	48.70	0.00	9.03	3.16	36.52	48.05	Déficit
nov.-14	41.20	12.60	12.60	125.00	0.00	28.60	0.00					
déc.-14	80.80	9.70	9.70	125.00	0.00	71.10	0.00					
janv.-15	76.60	12.90	12.90	125.00	0.00	63.70	0.00					
févr.-15	49.00	14.60	14.60	125.00	0.00	34.40	0.00	18.58	-9.21	25.03	51.09	Déficit
mars-15	43.20	35.70	35.70	125.00	0.00	7.50	0.00	17.10	-7.55	-2.05	-4.74	Excédent
avr.-15	44.80	67.30	65.86	103.94	-21.06	0.00	0.00	14.69	-8.71	-5.98	-13.35	Excédent
mai-15	43.40	85.90	73.98	73.36	-30.58	0.00	0.00	8.70	-8.93	0.23	0.52	Déficit

Tableau 3-3 : Bilans mensuels du Ruisseau de Pailhe.

On constate qu'en absence d'eau utile ou lorsqu'elle est présente en quantité peu importante (août 2014 et mars 2015), le terme de fermeture indique un léger excès d'écoulement (-14 % en avril 2014). Dès que l'eau utile est présente, le terme de fermeture indique un déficit d'écoulement pouvant atteindre 61.8 % (décembre 2013).

Les bilans mensuels permettent d'appréhender les réactions de la nappe aquifère par rapport à l'eau utile (Figure 3-11). En prenant le piézomètre PT03 (Figure 3-6) comme référence, on constate que les fluctuations saisonnières sont de l'ordre de 2 à 3 m; de plus un délai de 6 mois est observé entre la présence d'eau utile et la remontée de la nappe en 2014 - 2015. En 2014 et 2015, la nappe a atteint son niveau maximal au cours du mois de mars.

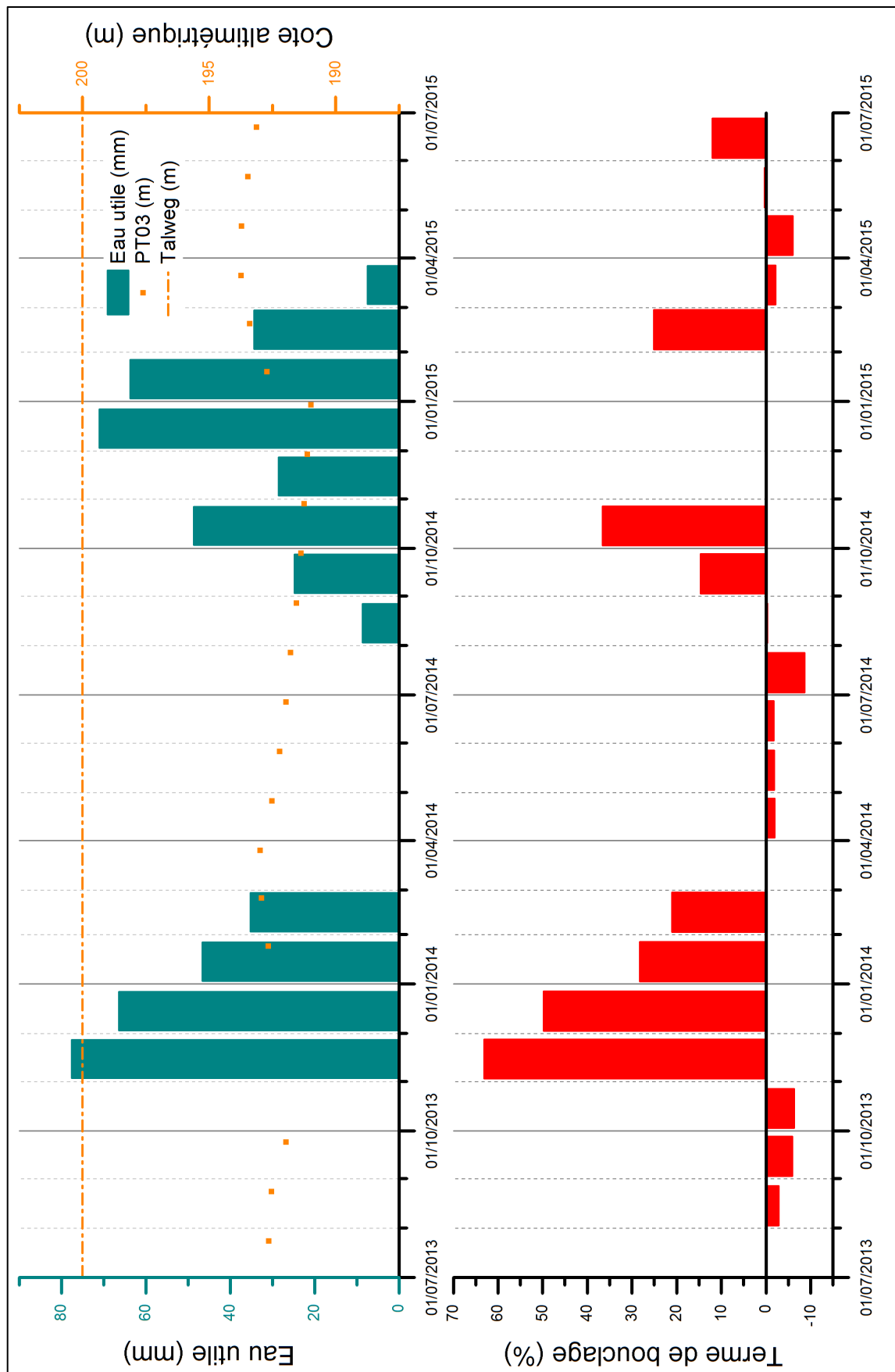


Figure 3-11 : Graphique des termes de bouclage mensuels de la station du ruisseau de Pailhe ; de l'eau utile mensuelle et des relevés piézométriques du piézomètre PT03.

3.2.5. Bilans hydrogéologiques : Station du Ruisseau d'Havelange (ST9)

Le sous-bassin que délimite la station « ST9-Ruisseau d'Havelange » est celui d'un affluent du Hoyoux s'écoulant SW-NE (Figure 3-6). Cet affluent draine un bassin de 5,4 km². Ce bassin recoupe le synclinal calcaire carbonifère des Avins (Figure 2-4 du Délivrable D.0).

Les caractéristiques de cette station hydrographique sont décrites à l'annexe 7.1.9 (page 91). Les données ont été collectées entre le 24 septembre 2014 et le 26 août 2015. Un problème instrumental apparu en janvier, empêche l'utilisation des données après décembre 2014.

L'hydrogramme (Figure 3-12) montre des débits extrêmement faibles variant de moins de 0.01 m³/s à maximum 0.02 m³/s lors d'événement pluvieux importants. Le débit du cours d'eau ne réagit qu'aux évènements pluvieux importants et en dehors de ceux-ci, le ruisseau présente un débit constant lors de la période observée. À l'étiage, il est par ailleurs uniquement alimenté par une source localisée 200 m à l'amont de la station limnimétrique.

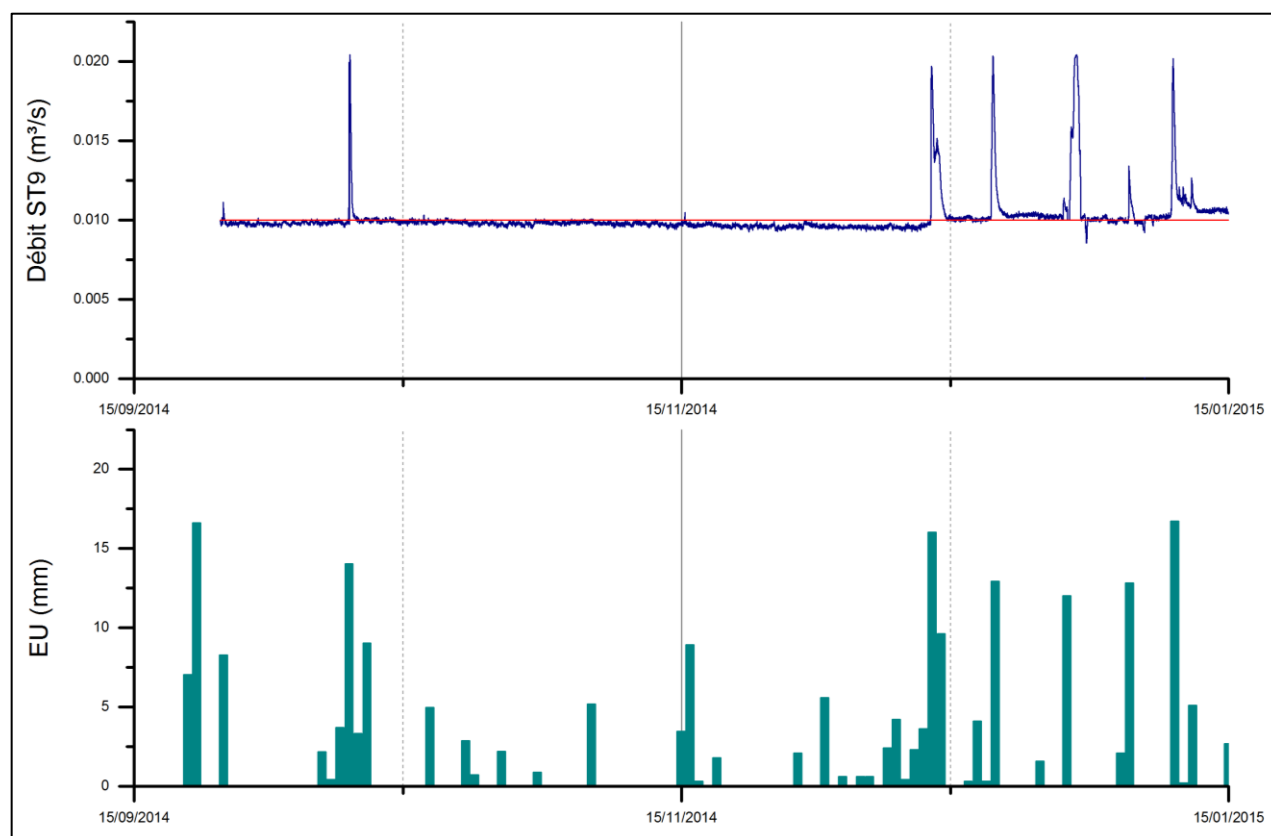


Figure 3-12 : Hydrogramme du ruisseau d'Havelange et graphique de l'eau utile.

3.2.5.1. Bilan pluri-mensuel

Suite à un problème de dispositif, les données récoltées sont insuffisantes pour réaliser un bilan annuel précis. Cependant, un bilan a été réalisé sur la période allant du 24 septembre 2014 au 24 décembre 2014 dont les valeurs sont données ci-dessous.

P	= ETR	+ Q_{capt}	+ Q_t	+ ΔRes	+ ΔRFU	+ $\epsilon_{\text{fermeture}}$
197.80 mm	= 56.37 mm	+ 3.56mm	+ 14.55 mm	/	+ -0.40 mm	123.72 mm
100 %	= 28.50 %	+ 1.80 %	+ 7.36 %	/	+ 0.20 %	88.95 %

L'évapotranspiration réelle représente près de 29 % des précipitations (période hivernale). Les 71 % restant correspondent à l'eau utile soit la quantité disponible pour le ruissellement et l'infiltration. La lame d'eau écoulée à la station du ruisseau d'Havelange ne représente que 7% des précipitations. Le terme de fermeture de 89% indique un déficit d'écoulement très important lié à un flux sortant (Terme Q_{out} du bilan, (Éq. 2-1)).

La variation de réserve en eau souterraine n'est pas reprise dans le bilan car à débit constant comme observé pour la station ST9, la réserve est considérée comme constante.

Le contexte hydrogéologique de ce sous-bassin explique ce déficit : 56 % de la superficie du bassin se situe au niveau de l'aquifère des calcaires carbonifères ; de plus le bassin recoupe une structure synclinale calcaire dont les bancs se prolongent en direction du Hoyoux dont la cote altimétrique du talweg est généralement inférieure à celle du ruisseau d'Havelange. Le ruisseau d'Havelange se retrouve perché au-dessus du niveau de la nappe et devient donc un ruisseau infiltrant. Les données piézométriques confirment ce caractère infiltrant, la cote du talweg (237m au niveau du piézomètre Pt Avin W) étant toujours supérieure à la cote piézométrique de la nappe (232 m en période de hautes eaux, Figure 3-13). De plus, de nombreuses sources diffuses sont observées au niveau de la confluence du ruisseau d'Havelange avec le Hoyoux, confirmant le caractère drainant de ce dernier à cet endroit.

3.2.5.2. Bilans mensuels

Suite au problème instrumental évoqué précédemment, les données collectées étaient insuffisantes pour la réalisation des bilans hydrogéologiques mensuels.

Cependant, l'eau utile et les relevés piézométriques permettent d'appréhender la dynamique de la nappe dans le sous-bassin du Ruisseau d'Havelange. Dans la Figure 3-13, on observe de petits épisodes de remontée/vidange qui se constate déjà en juillet 2014, un mois avant l'apparition de l'eau utile. La recharge effective de la nappe débute au mois de janvier 2015 soit cinq mois après l'apparition de l'eau utile. La nappe atteint son niveau maximal en avril. La fluctuation saisonnière en 2014-2015 est de l'ordre de 4-5 m.

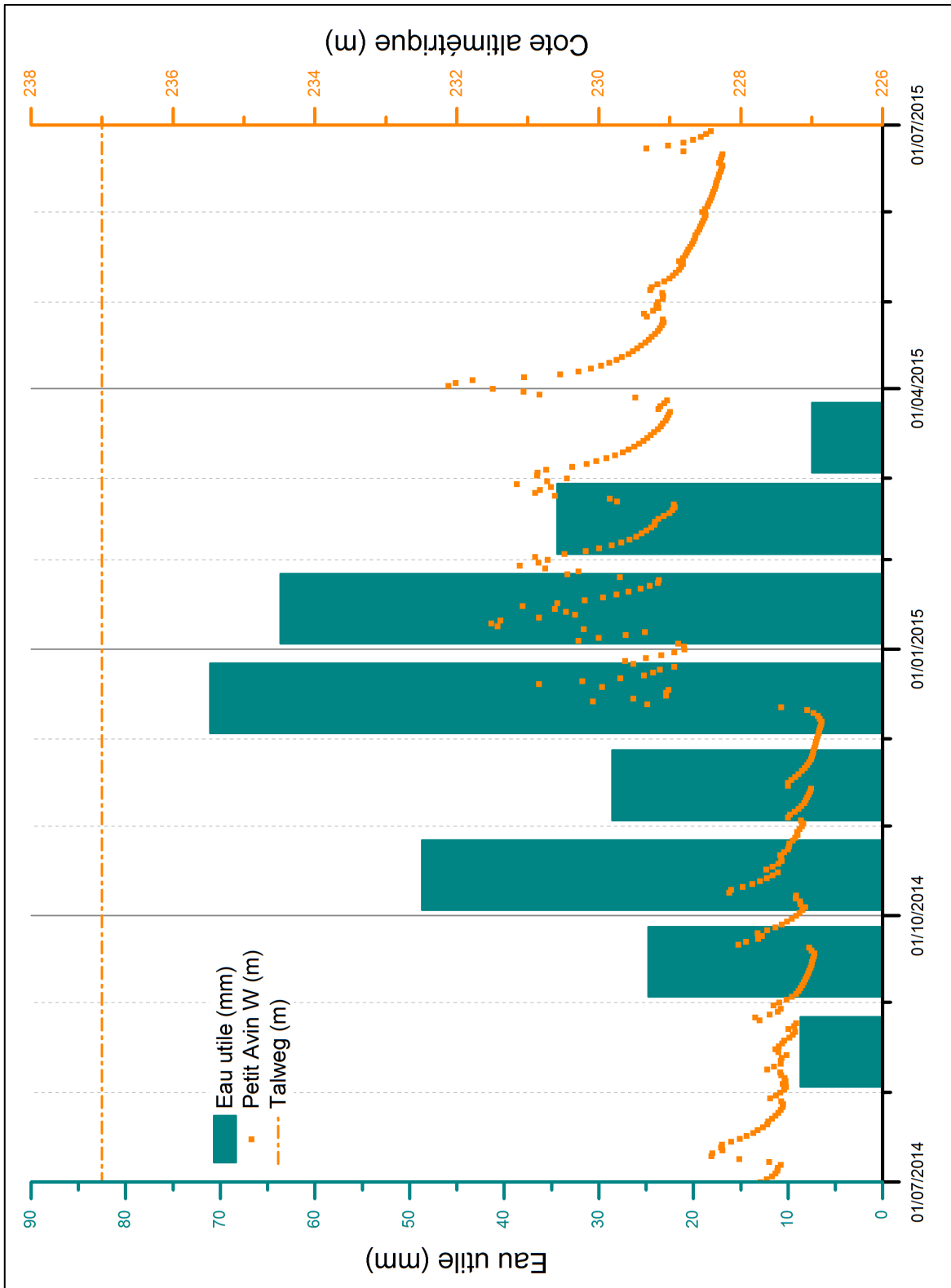


Figure 3-13 : Graphique de l'eau utile mensuelle et des relevés du piézomètre Petit Avin W.

3.2.6. Bilans hydrogéologiques : Station de Petit Avin (ST8)

La station de Petit Avin (ST8) délimite le sous-bassin le plus à l'amont du bassin du Hoyoux, d'une superficie de 38,7 km² (Figure 3-6). Il recoupe une succession de deux anticlinaux de grès famenniens (23% de la surface du sous-bassin, et 66% pour les calcaires carbonifères).

Les caractéristiques de cette station hydrographique sont décrites à l'annexe 7.1.8 (page 90). Les données ont été collectées entre le 11 juillet 2013 et le 30 juin 2015.

L'hydrogramme (Figure 3-14) montre que même hors des périodes pluvieuses, le débit de cette rivière reste conséquent, variant de 0.16 m³/s à maximum² 8.81 m³/s. Le calcul de la lame d'eau écoulee entre septembre 2013 et août 2014, confirme ce volume important avec 217.62 mm écoulés (24 % des précipitations).

² Cette valeur est probablement exagérée suite à l'extrapolation de la courbe de tarage (2.2.3 Calcul des débits).

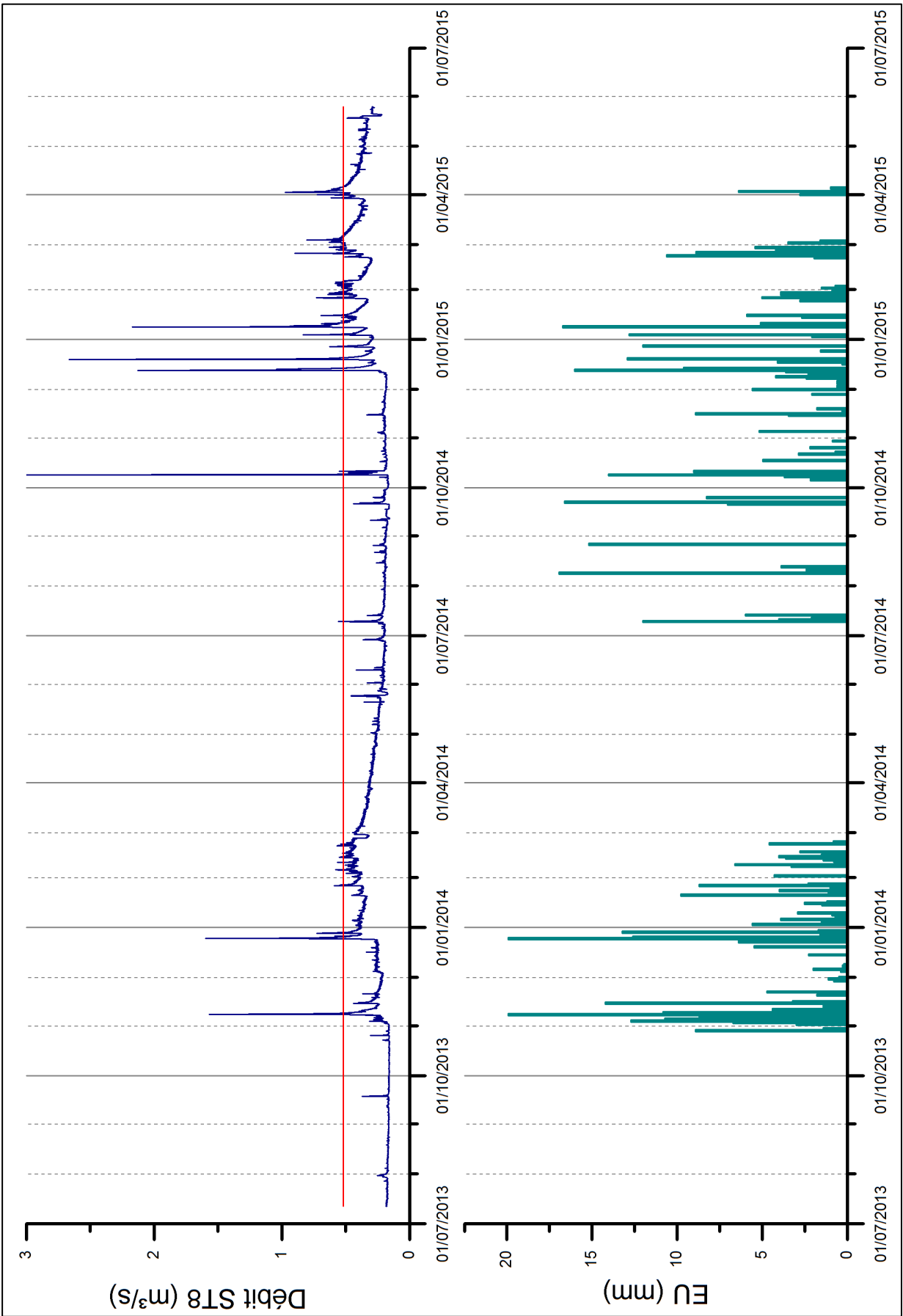


Figure 3-14 : Hydrogramme du Hoyoux à Petit Avin et graphique de l'eau utile.

3.2.6.1. Bilan annuel

Le bilan calculé sur l'année hydrologique allant de septembre 2013 à août 2014 donne les valeurs suivantes :

P	= ETR	+ Q_{capt}	+ Q_t	+ ΔRes	+ ΔRFU	+ $\epsilon_{\text{fermeture}}$
896.90 mm	= 612.30 mm	+ 41.85 mm	+217.62 mm	+ 6.03 mm	+ 67.25 mm	- 48.14 mm
100 %	= 68.27 %	+ 4.67 %	+ 24.26 %	+ 0.67 %	+ 7.50 %	- 5.37 %

L'évapotranspiration réelle atteint 68 % des précipitations. Les 32 % restant correspondent à l'eau utile, soit la quantité d'eau disponible pour le ruissellement et l'infiltration. La lame d'eau écoulée à la station de Petit Avin représente 24 % des précipitations. L'export des captages représente presque 5 % de la pluie annuelle. Avec un terme de bouclage un peu inférieur à -5 %, le sous-bassin de Petit Avin ne semble pas subir d'import ou d'export via un écoulement souterrain.

La bonne fermeture du bilan annuel s'explique par la localisation de la station de jaugeage. Située au niveau d'un anticlinal gréseux, les couches géologiques s'étendent transversalement à l'axe de la vallée du Hoyoux. Cet anticlinal joue le rôle de seuil hydrogéologique par rapport à l'aquifère des calcaires du Carbonifère situés en amont. Aucun écoulement notable d'eau souterraine ne peut donc contourner cette station. Néanmoins, l'extension des formations géologiques tant vers le SW que vers le NE n'exclut pas des échanges d'eau souterraines vers les bassins voisins. Dans l'affirmative, les quantités importées et exportées nettes doivent être faibles ou équivalentes vu la fermeture du bassin.

3.2.6.2. Bilans mensuels

Les résultats des bilans mensuels de ce sous-bassin sont repris dans le Tableau 3-4.

	P mm	Eto mm	ETR mm	RFU mm	ΔRFU mm	EU mm	Qcapt mm	Qt mm	ΔRes mm	efermeture		
										mm	%	
août-13	27.60	90.90	55.95	41.66	-28.35	0.00	6.36	11.73	-3.08	-15.01	-54.38	Excédent
sept.-13	57.30	50.50	50.50	48.46	6.80	0.00	6.36	11.12	-0.77	-16.71	-29.17	Excédent
oct.-13	71.00	30.90	30.90	88.56	40.10	0.00	6.36	11.23	2.26	-19.85	-27.96	Excédent
nov.-13	125.60	11.50	11.50	125.00	36.44	77.66	6.36	18.42	15.14	37.74	30.05	Déficit
déc.-13	80.40	14.00	14.00	125.00	0.00	66.40	6.36	21.49	30.27	8.28	10.30	Déficit
janv.-14	61.40	14.80	14.80	125.00	0.00	46.60	2.05	26.59	19.29	-1.33	-2.17	Excédent
févr.-14	57.00	21.80	21.80	125.00	0.00	35.20	2.05	27.15	1.14	4.86	8.53	Déficit
mars-14	17.60	45.90	43.49	99.11	-25.89	0.00	2.05	24.04	-17.32	-8.77	-49.85	Excédent
avr.-14	13.40	67.90	49.12	63.39	-35.72	0.00	2.05	19.09	-15.56	-5.58	-41.64	Excédent
mai-14	60.80	83.80	71.70	52.50	-10.90	0.00	2.05	16.56	-20.22	1.61	2.65	Déficit
juin-14	104.20	102.50	102.50	54.20	1.70	0.00	2.05	13.91	-4.04	-11.92	-11.44	Excédent
juil.-14	127.40	94.00	94.00	87.60	33.40	0.00	2.05	14.59	0.59	-17.23	-13.53	Excédent
août-14	120.80	74.70	74.70	125.00	37.40	8.70	2.05	13.43	-4.77	-2.01	-1.67	Excédent
sept.-14	76.20	51.40	51.40	125.00	0.00	24.80	2.05	12.71	-4.90	14.94	19.61	Déficit
oct.-14	76.00	27.30	27.30	125.00	0.00	48.70	2.05	16.01	3.50	27.14	35.72	Déficit
nov.-14	41.20	12.60	12.60	125.00	0.00	28.60	2.05	13.30	3.45	9.80	23.79	Déficit
déc.-14	80.80	9.70	9.70	125.00	0.00	71.10	2.05	22.89	37.13	9.03	11.17	Déficit
janv.-15	76.60	12.90	12.90	125.00	0.00	63.70	13.57	31.08	3.55	15.51	20.25	Déficit
févr.-15	49.00	14.60	14.60	125.00	0.00	34.40	11.66	25.81	7.47	-10.55	-21.52	Excédent
mars-15	43.20	35.70	35.70	125.00	0.00	7.50	6.85	30.58	14.16	-44.09	-102.07	Excédent
avr.-15	44.80	67.30	65.86	103.94	-21.06	0.00	6.85	29.21	-3.54	-32.52	-72.58	Excédent
mai-15	43.40	85.90	73.98	73.36	-30.58	0.00	6.85	22.33	-41.29	12.10	27.89	Déficit

Tableau 3-4 : Bilans mensuels du Hoyoux à Petit Avin.

En l'absence d'eau utile ou lorsqu'elle est peu importante, le terme de fermeture est négatif indiquant un excès d'écoulement pouvant atteindre 102% (mars 2015). Quand l'eau utile est présente, le terme de fermeture indique un déficit d'écoulement pouvant atteindre 36% (octobre 2014) ou la fermeture du bilan.

Les bilans mensuels permettent également de mieux comprendre les réactions de la nappe aquifère par rapport à l'eau utile (Figure 3-15). En prenant le piézomètre PT04 (Figure 3-6) comme référence, on constate que les fluctuations saisonnières sont de l'ordre de 2 m et qu'un délai de 5 mois est observé entre la présence d'eau utile et la remontée de la nappe, en 2014-2015. En 2014 et 2015, la nappe atteint son niveau maximal au cours du mois de mars.



Figure 3-15 : Graphique des termes de bouclage mensuels de la station de Petit Avins ; de l'eau utile mensuelle et des relevés piézométriques du piézomètre PT04.

3.3. Bassin versant du Triffoiy

3.3.1. Typologie

Le Triffoiy est un affluent du Hoyoux s'écoulant du Sud-Ouest vers le Nord-Est. La station « ST1 Exutoire du Triffoiy » délimite un bassin de 30.5 km² dont plus de 60% est constituée de calcaires carbonifères, localisés au droit d'un synclinal (Figure 3-16). Le bassin est délimité au nord par les grès famenniens et au sud par la faille de Goesnes (Figure 2-4 du Délivrable D.0). Cette dernière met en contact direct les formations détritiques du Frasnien-Famennien et les calcaires du Carbonifères, formant ainsi une barrière hydrogéologique nette.

Plusieurs stations ont été placées sur le Triffoiy afin d'étudier l'évolution des interactions entre eaux de surface et eaux souterraines selon le profil en long du cours d'eau.

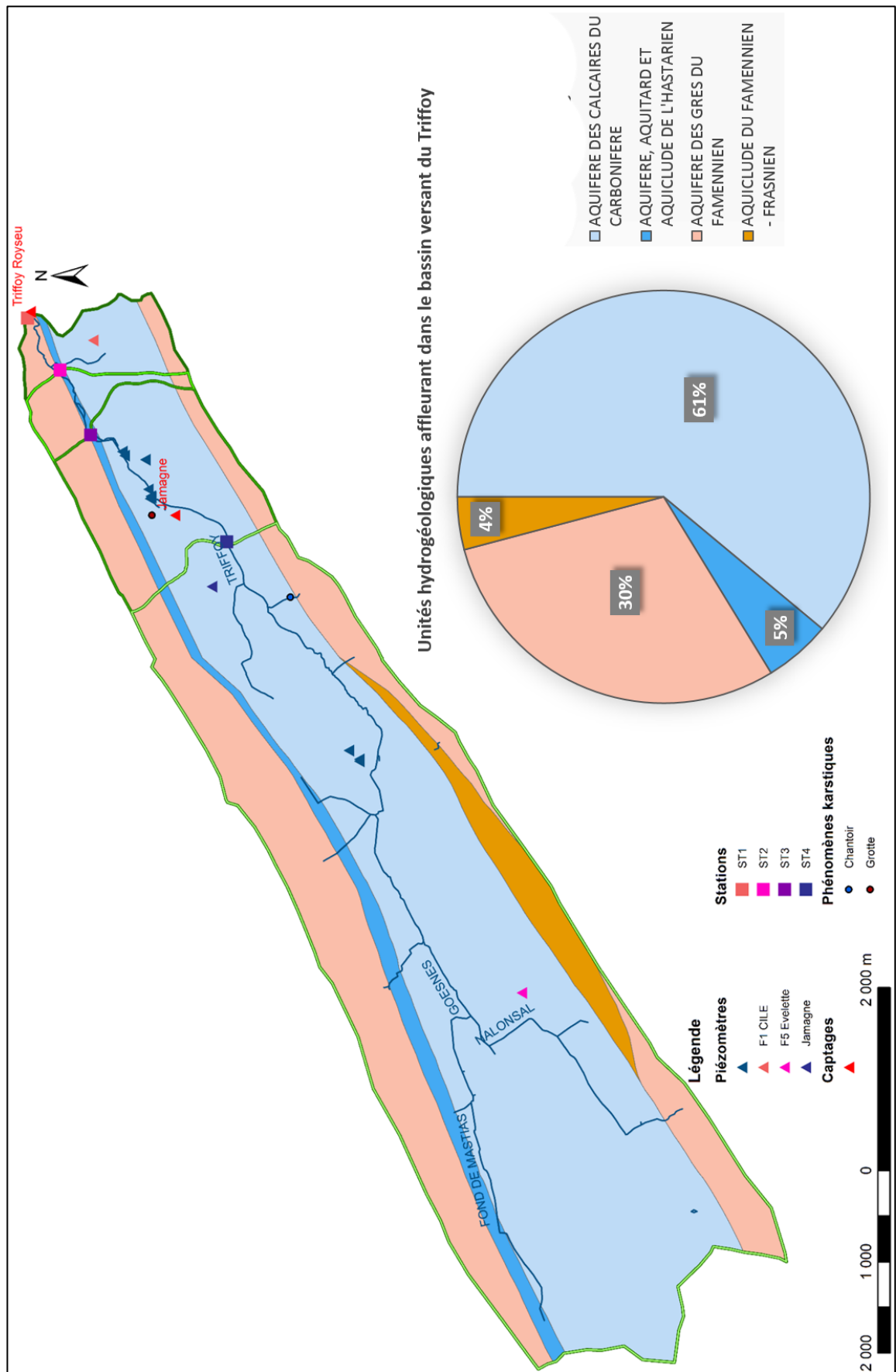


Figure 3-16 : Bassin versant du Triffoy avec indications des stations limnimétriques, des captages, des piézomètres et des phénomènes karstiques ; ainsi que les proportions de surface affleurante des unités hydrogéologiques.

La cote altimétrique du talweg à l'exutoire du Triffoy (ST1) est de 148 m. Elle croit vers l'amont du bassin. Elle est de 165 m à la station de Soucre de Marchin (ST2), de 173 m à State (ST3) et de 200 m à la station de Jamagne (ST4).

Les sols de ce bassin sont essentiellement occupés par des cultures (48% de la surface du bassin) et des prairies (38%) ; viennent ensuite les zones d'habitat (7%) et les forêts (6%). Les milieux naturels ne représentent qu'une très faible portion de la surface du bassin (1%) (Figure 3-17).

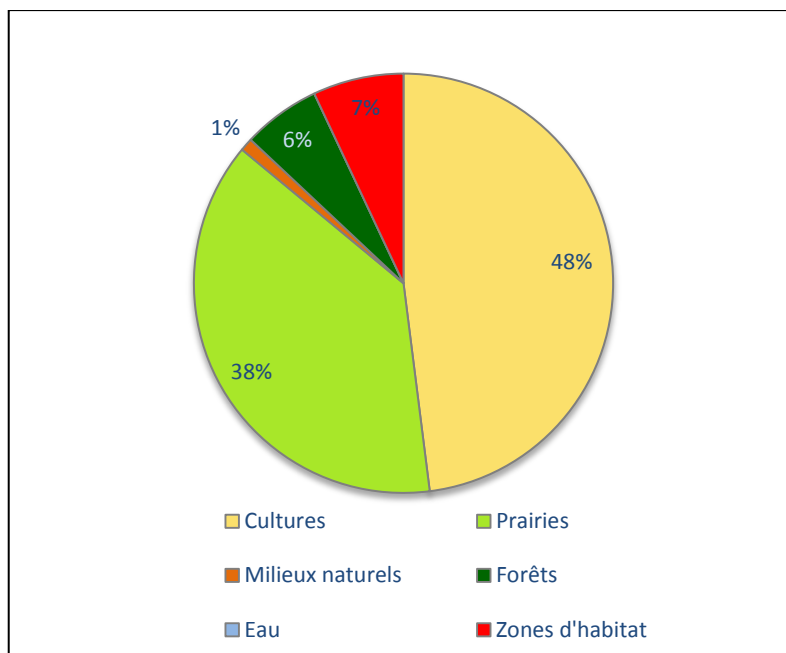


Figure 3-17 : Pourcentages des différentes catégories d'occupation du sol dans le bassin hydrographique du Triffoy.

3.3.2. Hydrologie

Les caractéristiques de la station hydrographique de l'exutoire du Triffoy sont décrites dans l'annexe 7.1.1 (page 83). Les données ont été collectées entre le 10 juillet 2013 et le 30 juin 2015.

L'hydrogramme (Figure 3-18) montre des débits variant de 0.06 m³/s à un maximum de 1.05 m³/s, lors d'évènements pluvieux, pour un bassin d'une superficie de 30.5 km². Le calcul de la lame d'eau écoulée de 129mm (14% des précipitations), entre septembre 2013 et août 2014, indique un volume moyen en comparaison des deux autres bassins. En comparaison, la lame d'eau écoulée pour le bassin du Torrent de Bonne est de 20.6 mm (2.3% des précipitations) et celle du bassin du Hoyoux s'élève à 195.8 mm (21.8% des précipitations).

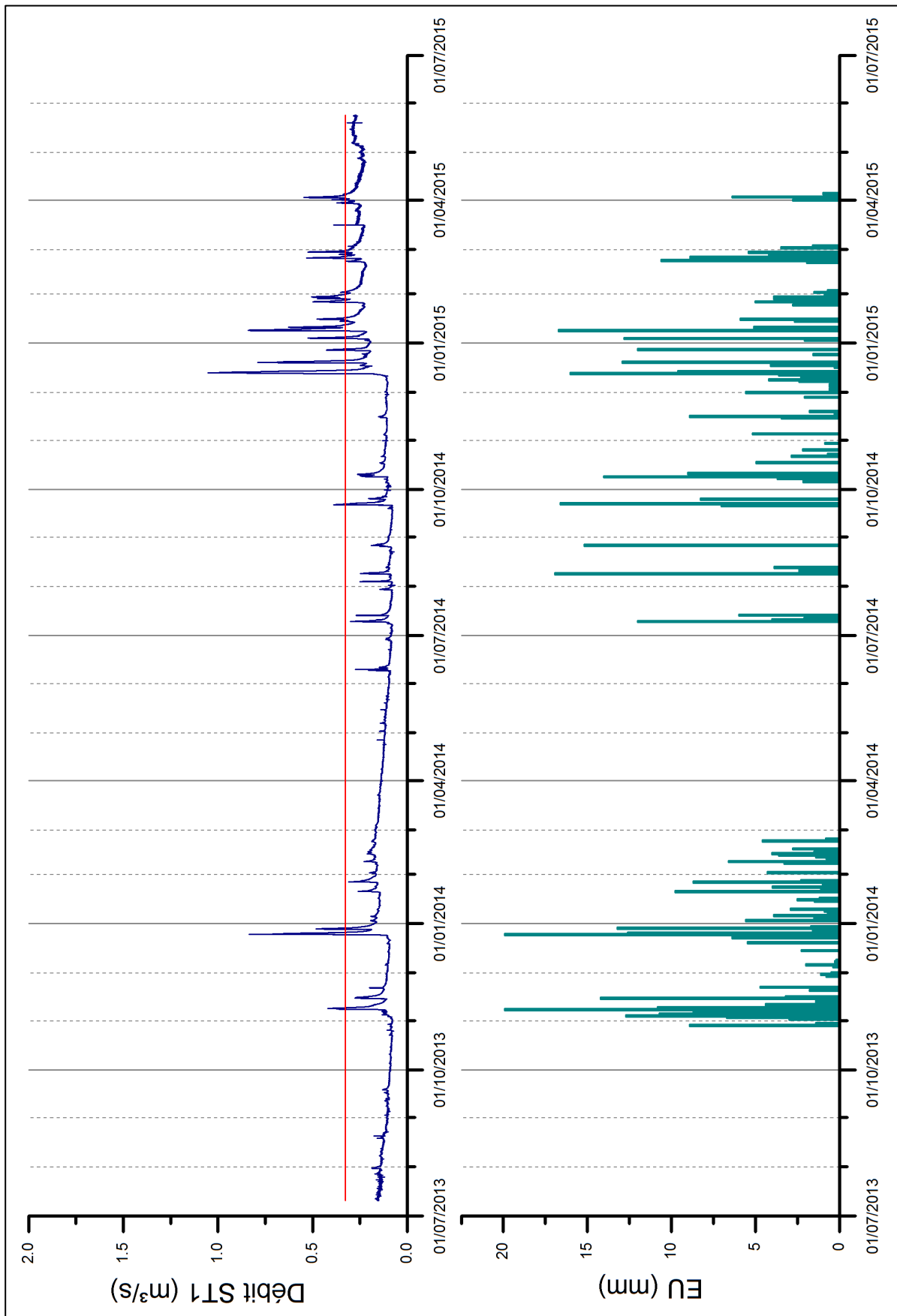


Figure 3-18 : Hydrogramme de l'exutoire du Triffoy avec indication du débit maximal mesuré sur le terrain et graphique de l'eau utile.

3.3.3. Bilan hydrogéologique du bassin versant du Triffoy (ST1)

3.3.3.1. Bilan annuel

Le bilan hydrogéologique calculé sur l'année hydrologique allant de septembre 2013 à août 2014 donne les valeurs suivantes :

P	= ETR	+ Q_{capt}	+ Q_t	+ ΔRes	+ ΔRFU	+ $\epsilon_{\text{fermeture}}$
896.90 mm	= 612.30 mm	+ 117.92 mm	+ 129.24 mm	- 12.20 mm	+ 67.25 mm	- 17.61 mm
100 %	= 68.27 %	+ 13.15 %	+ 14.41 %	- 1.36 %	+ 7.50 %	- 1.96 %

L'évapotranspiration réelle représente 68% des précipitations. Les 32 % restant correspondent à l'eau utile, soit la quantité d'eau disponible pour le ruissellement et l'infiltration. Les captages exportent un volume d'eau correspondant à 13 % du total des précipitations. La lame d'eau écoulée à l'exutoire du bassin représente plus de 14 % des pluies annuelles. Avec un terme de bouclage de -2 %, ce bassin semble ne pas subir d'import ou d'export conséquents via un écoulement souterrain.

3.3.3.2. Bilans mensuels

Les résultats des bilans mensuels sont donnés au Tableau 3-5.

	P	Eto	ETR	RFU	Δ RFU	EU	Qcapt	Qt	Δ Res	efermeture		
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	%	
août-13	27.60	90.90	55.95	41.66	-28.35	0.00	10.01	10.97	-16.03	-4.95	-17.94	Excédent
sept.-13	57.30	50.50	50.50	48.46	6.80	0.00	10.01	8.66	-6.94	-11.73	-20.48	Excédent
oct.-13	71.00	30.90	30.90	88.56	40.10	0.00	10.01	7.68	-6.19	-11.50	-16.20	Excédent
nov.-13	125.60	11.50	11.50	125.00	36.44	77.66	10.01	11.83	5.14	50.68	40.35	Déficit
déc.-13	80.40	14.00	14.00	125.00	0.00	66.40	10.01	13.41	16.90	26.08	32.43	Déficit
janv.-14	61.40	14.80	14.80	125.00	0.00	46.60	9.73	14.51	19.04	3.32	5.41	Déficit
févr.-14	57.00	21.80	21.80	125.00	0.00	35.20	9.73	13.73	-3.34	15.07	26.44	Déficit
mars-14	17.60	45.90	43.49	99.11	-25.89	0.00	9.73	13.04	-6.68	-16.09	-91.42	Excédent
avr.-14	13.40	67.90	49.12	63.39	-35.72	0.00	9.73	10.77	-10.42	-10.09	-75.30	Excédent
mai-14	60.80	83.80	71.70	52.50	-10.90	0.00	9.73	9.69	-11.96	-7.46	-12.26	Excédent
juin-14	104.20	102.50	102.50	54.20	1.70	0.00	9.73	8.24	-6.00	-11.97	-11.49	Excédent
juil.-14	127.40	94.00	94.00	87.60	33.40	0.00	9.73	8.69	-0.89	-17.54	-13.77	Excédent
août-14	120.80	74.70	74.70	125.00	37.40	8.70	9.73	8.99	-1.10	-8.93	-7.39	Excédent
sept.-14	76.20	51.40	51.40	125.00	0.00	24.80	9.73	9.13	7.69	-1.75	-2.30	Excédent
oct.-14	76.00	27.30	27.30	125.00	0.00	48.70	9.73	10.95	3.94	24.07	31.67	Déficit
nov.-14	41.20	12.60	12.60	125.00	0.00	28.60	9.73	9.45	2.00	7.42	18.01	Déficit
déc.-14	80.80	9.70	9.70	125.00	0.00	71.10	9.73	21.90	48.69	-9.22	-11.41	Excédent
janv.-15	76.60	12.90	12.90	125.00	0.00	63.70	5.12	29.04	8.36	21.18	27.65	Déficit
févr.-15	49.00	14.60	14.60	125.00	0.00	34.40	4.78	21.89	6.31	1.42	2.91	Déficit
mars-15	43.20	35.70	35.70	125.00	0.00	7.50	3.41	22.77	3.00	-21.68	-50.18	Excédent
avr.-15	44.80	67.30	65.86	103.94	-21.06	0.00	2.34	22.71	2.06	-27.10	-60.50	Excédent
mai-15	43.40	85.90	73.98	73.36	-30.58	0.00	2.34	23.81	-2.65	-23.50	-54.14	Excédent
juin-15	47.20	107.40	75.78	44.78	-28.58	0.00	2.34	21.70	-4.30	-19.74	-41.82	Excédent

Tableau 3-5 : Bilans mensuels du Triffoy à l'exutoire.

En l'absence d'eau utile ou lorsqu'elle est peu importante, le terme de fermeture indique un excès d'écoulement pouvant atteindre 91% (mars 2014). Quand l'eau utile est présente, le terme de fermeture indique un déficit d'écoulement pouvant atteindre 40% (décembre 2013) ou la fermeture du bilan.

Les bilans mensuels permettent également de mieux comprendre la dynamique de la nappe aquifère par rapport à l'eau utile (Figure 3-19). En prenant le piézomètre F5 Evelette (Figure 3-16) comme référence, on constate que les variations saisonnières sont de l'ordre de 2-3 m. La remontée de la nappe commence dès l'apparition de l'eau utile, mais après cette première remontée, on constate une nouvelle vidange avant la reprise de la remontée de la nappe. La nappe semble se recharger par paliers. À la fin de l'étiage de 2014, la première remontée a lieu lors d'un mois sans eau utile. Puis une série de remontées et de vidanges de la nappe d'ampleur variables sont observées. C'est au cours du cinquième mois avec eau utile que la recharge effective de la nappe a lieu ; de petits épisodes de vidange sont encore observés au cours de cette remontée. En 2014 et en 2015, la nappe atteint son niveau maximal au cours du mois de février.

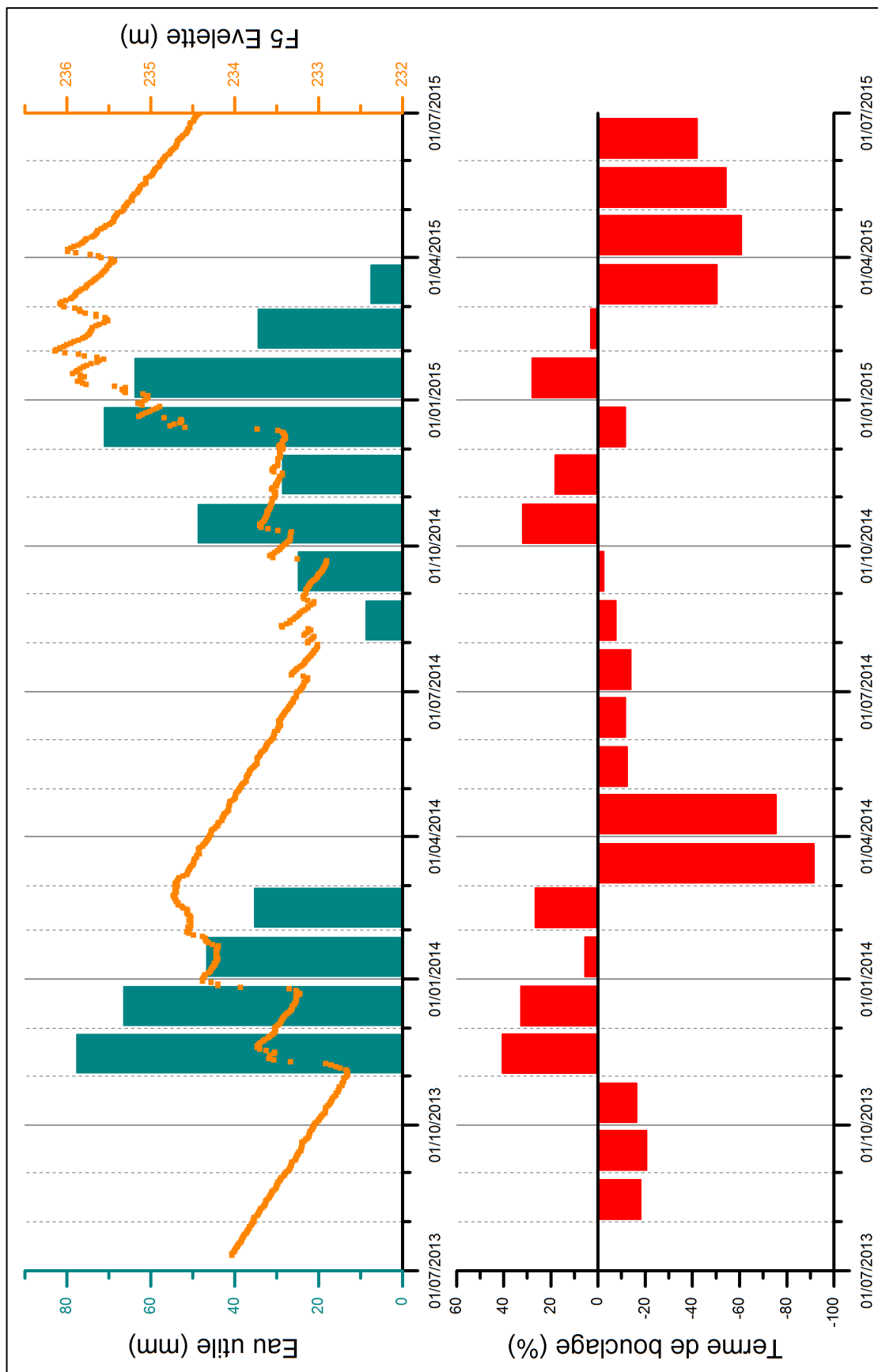


Figure 3-19 : Graphique des termes de bouclage mensuels de la station à l'exutoire du Triffoy ; de l'eau utile mensuelle et des relevés du piézomètre d'Evelette

3.3.4. Bilans hydrogéologiques : Station de Source de Marchin (ST2)

La station de Source de Marchin (ST2) délimite un sous bassin de 29,3 km². Elle est située à la limite entre les grès famenniens et les calcaires carbonifères (Figure 3-16).

Les caractéristiques techniques de cette station sont décrites à l'annexe 7.1.2 (page 84).

L'hydrogramme (Figure 3-20) montre des débits variant de 0.04 m³/s à maximum³ 1.90 m³/s. Ces volumes sont comparables à ceux observés à l'exutoire du Triffoyc ce que confirme le calcul de la lame d'eau écoulee : entre septembre 2013 et août 2014, 134.43 mm se sont écoulés (15% des précipitations) à la Station Source de Marchin et 129.24 mm (14% des précipitations) à l'exutoire.

³ Cette valeur est probablement exagérée suite à l'extrapolation de la courbe de tarage (2.2.3 Calcul des débits).

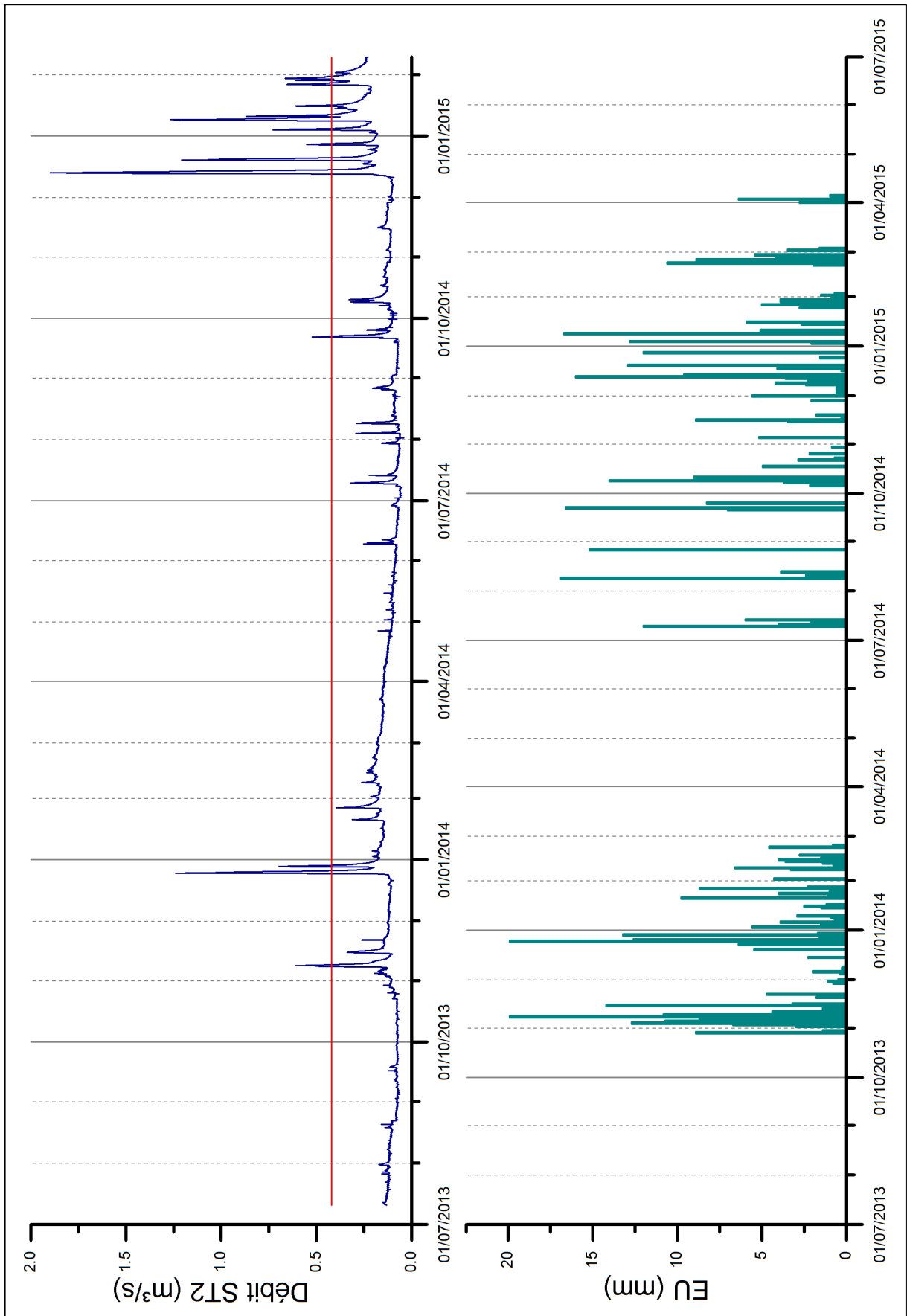


Figure 3-20 : Hydrogramme du Triffoiy à Source de Marchin avec indication du débit maximal mesuré sur le terrain et graphique de l'eau utile

3.3.4.1. Bilan annuel

Le bilan calculé pour l'année allant de septembre 2013 à août 2014 donne les valeurs suivantes :

P	= ETR	+ Q_{capt}	+ Q_t	+ ΔRes	+ ΔRFU	+ $\varepsilon_{\text{fermeture}}$
896.90 mm	= 612.30 mm	+ 47.88 mm	+ 134.43 mm	- 2.09 mm	+ 67.25 mm	+ 37.13 mm
100 %	= 68.27 %	+ 5.34 %	+ 14.99 %	- 0.23 %	+ 7.50 %	+ 4.14 %

L'évapotranspiration réelle représente 68% des précipitations. Les 32 % restant correspondent à l'eau utile, soit la quantité d'eau disponible pour le ruissellement et l'infiltration. Le captage de Vivaqua exporte un volume d'eau correspondant à 5 % du total des précipitations. La lame d'eau écoulee à la station de Source de Marchin représente presque 15 % des pluies annuelles. Avec un terme de bouclage un peu supérieur à 4 %, ce sous-bassin semble ne pas subir d'import ou d'export conséquents via un écoulement souterrain.

3.3.4.2. Bilans mensuels

Les résultats des bilans mensuels sont présentés dans le Tableau 3-6.

En l'absence d'eau utile ou lorsqu'elle est présente en quantité peu importante (août 2014 et mars 2015), le terme de fermeture est négatif indiquant un excès d'écoulement pouvant atteindre -80 % (avril 2015). Dès que l'eau utile est présente, le terme de fermeture indique un déficit d'écoulement pouvant atteindre 43 % (novembre 2013).

	P mm	Eto mm	ETR mm	RFU mm	ΔRFU mm	EU mm	Qcapt mm	Qt mm	ΔRes mm	efermeture		
										mm	%	
août-13	27.60	90.90	55.95	41.66	-28.35	0.00	8.31	9.33	-14.81	-2.82	-10.23	Excédent
sept.-13	57.30	50.50	50.50	48.46	6.80	0.00	8.31	6.80	-0.54	-14.56	-25.41	Excédent
oct.-13	71.00	30.90	30.90	88.56	40.10	0.00	8.31	7.55	13.36	-29.22	-41.15	Excédent
nov.-13	125.60	11.50	11.50	125.00	36.44	77.66	8.31	14.35	0.66	54.34	43.27	Déficit
déc.-13	80.40	14.00	14.00	125.00	0.00	66.40	8.31	16.56	8.10	33.44	41.59	Déficit
janv.-14	61.40	14.80	14.80	125.00	0.00	46.60	1.83	15.98	13.56	15.23	24.80	Déficit
févr.-14	57.00	21.80	21.80	125.00	0.00	35.20	1.83	15.46	-2.13	20.04	35.15	Déficit
mars-14	17.60	45.90	43.49	99.11	-25.89	0.00	1.83	14.19	-5.17	-10.85	-61.64	Excédent
avr.-14	13.40	67.90	49.12	63.39	-35.72	0.00	1.83	11.14	-16.70	3.73	27.81	Déficit
mai-14	60.80	83.80	71.70	52.50	-10.90	0.00	1.83	8.91	-7.07	-3.67	-6.03	Excédent
juin-14	104.20	102.50	102.50	54.20	1.70	0.00	1.83	7.38	-8.32	-0.88	-0.85	Excédent
juil.-14	127.40	94.00	94.00	87.60	33.40	0.00	1.83	7.35	-0.44	-8.75	-6.87	Excédent
août-14	120.80	74.70	74.70	125.00	37.40	8.70	1.83	8.76	2.33	-4.23	-3.50	Excédent
sept.-14	76.20	51.40	51.40	125.00	0.00	24.80	1.83	9.39	10.37	3.20	4.21	Déficit
oct.-14	76.00	27.30	27.30	125.00	0.00	48.70	1.83	12.50	2.83	31.54	41.50	Déficit
nov.-14	41.20	12.60	12.60	125.00	0.00	28.60	1.83	10.65	1.58	14.54	35.30	Déficit
déc.-14	80.80	9.70	9.70	125.00	0.00	71.10	1.83	25.68	32.50	11.08	13.72	Déficit
janv.-15	76.60	12.90	12.90	125.00	0.00	63.70	8.94	32.87	10.74	11.15	14.56	Déficit
févr.-15	49.00	14.60	14.60	125.00	0.00	34.40	7.84	17.91	8.72	-0.07	-0.15	Excédent
mars-15	43.20	35.70	35.70	125.00	0.00	7.50	3.44	25.88	8.84	-30.66	-70.97	Excédent
avr.-15	44.80	67.30	65.86	103.94	-21.06	0.00	0.00	28.60	7.47	-36.07	-80.52	Excédent
mai-15	43.40	85.90	73.98	73.36	-30.58	0.00	0.00	25.72	-5.07	-20.65	-47.58	Excédent

Tableau 3-6 : Bilans mensuels du Triffoy à Source de Marchin.

Les bilans mensuels permettent également de mieux comprendre la dynamique de la nappe aquifère par rapport à l'eau utile (Figure 3-21). En prenant le piézomètre F1 CILE (Figure 3-16) comme référence, on constate que les variations saisonnières sont de l'ordre de 4 à 8 m. La remontée de la nappe commence dès l'apparition de l'eau utile, mais après cette première remontée, on constate une nouvelle vidange avant la reprise de la remontée de la nappe. La nappe semble se recharger par paliers. La première remontée (juillet 2014) a lieu lors d'un mois sans eau utile. On observe une deuxième petite remontée au cours du mois d'octobre. C'est au cours du cinquième mois (décembre 2014) avec eau utile que la recharge effective de la nappe a lieu. En 2014, la nappe atteint son niveau maximal au début du mois de février et en 2015, au cours du mois de janvier.

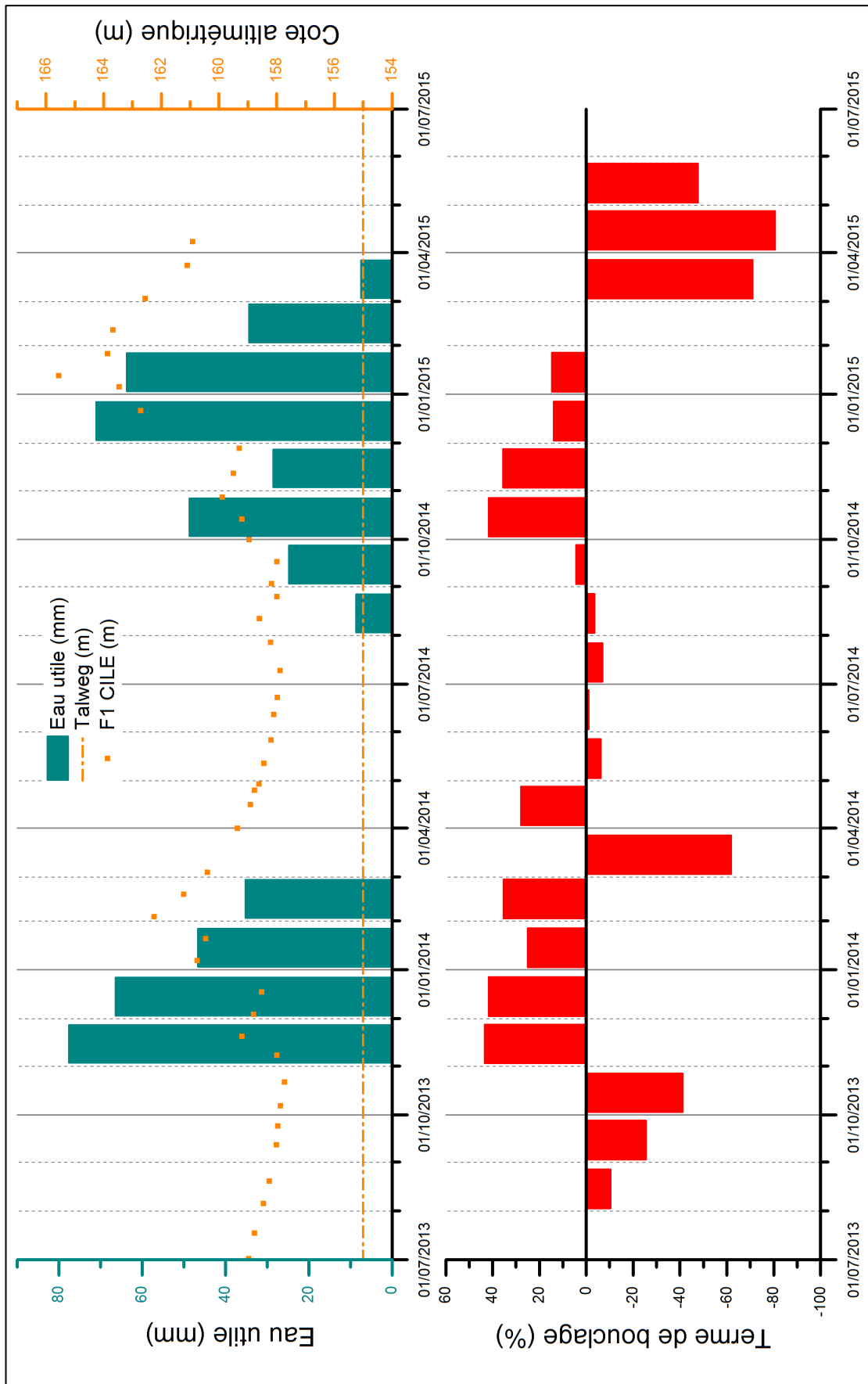


Figure 3-21 : Graphique des termes de bouclage mensuels de la station de source de Marchin ; de l'eau utile mensuelle et des relevés piézométriques du piézomètre F1 CILE.

3.3.5. Bilans hydrogéologiques : Station de State (ST3)

La station de State (ST3) délimite un sous-bassin de 28,6 km² (Figure 3-6).

Les caractéristiques techniques de cette station sont décrites à l'annexe 7.1.3 (page 85). Les données ont été récoltées entre le 24 septembre 2014 et le 26 août 2015.

L'hydrogramme (Figure 3-22) montre des débits variant de 0.09 m³/s à un maximum⁴ 1.52 m³/s lors d'évènements pluvieux. En dehors des périodes pluvieuses, le débit du Triffoy à State semble tendre vers un débit de base de l'ordre de 0.1m³/s.

⁴ Cette valeur est probablement exagérée suite à l'extrapolation de la courbe de tarage (2.2.3 Calcul des débits).

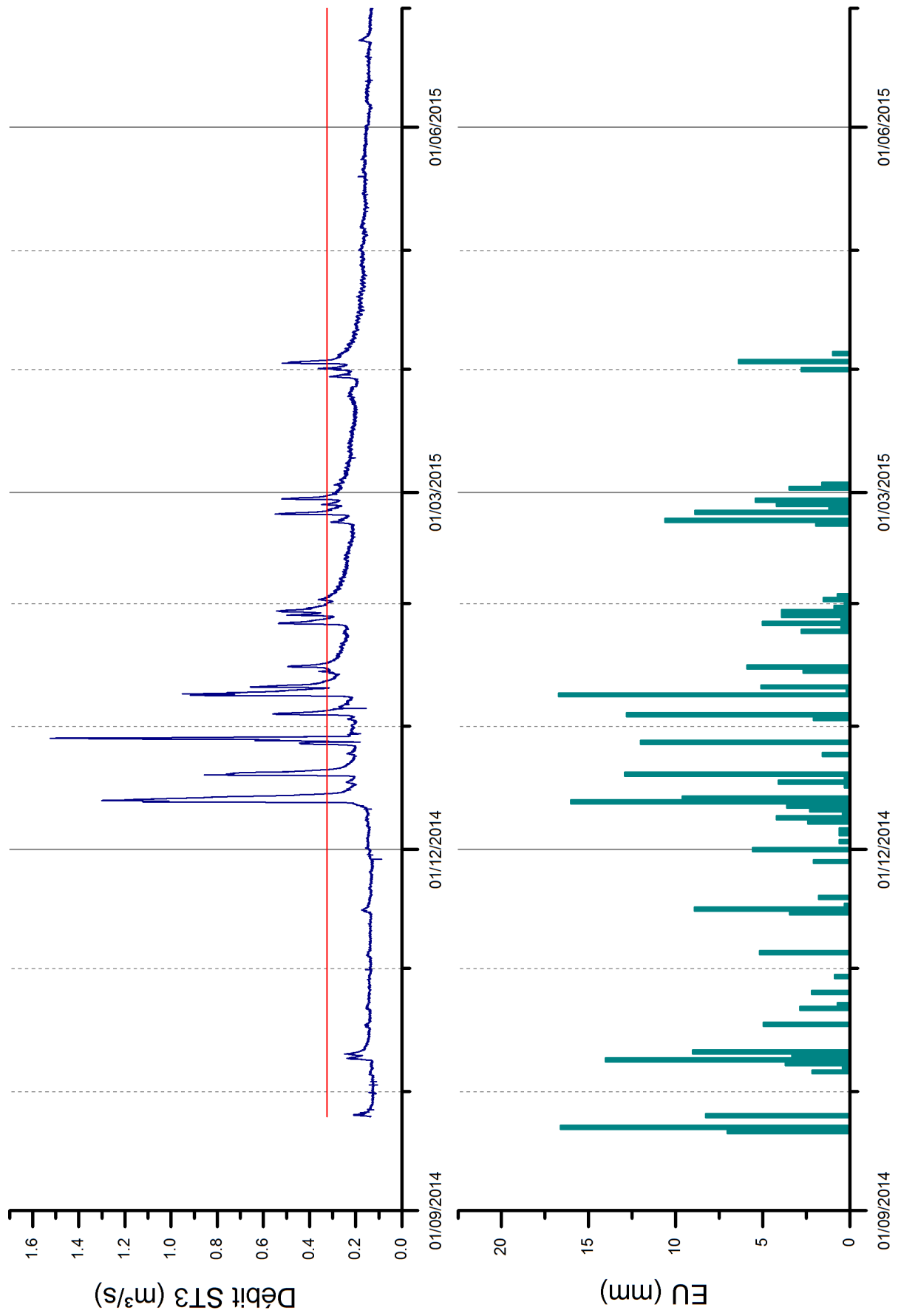


Figure 3-22 : Hydrogramme du Triffoy à State avec indication du débit maximal mesuré sur le terrain et graphique de l'eau utile

3.3.5.1. Bilan pluri-mensuel

Un bilan hydrogéologique sur la période allant d'octobre 2014 à juin 2015 a été réalisé. Les résultats sont les suivants :

P	= ETR	+ Q _{capt}	+ Q _t	+ ΔRes	+ ΔRFU	+ ε _{fermeture}
502.20 mm	= 328.42 mm	+ 45.11mm	+ 173.58 mm	- 12.90 mm	- 80.22 mm	+ 48.21 mm
100 %	= 65.40 %	+ 8.98 %	+ 34.56 %	- 2.57 %	- 15.97 %	+ 9.60 %

Ce bilan est donné à titre indicatif et ne sera pas interprété. Cette station ayant été problématique tout au long de l'étude et au vu des résultats, les données de débit sont mises en doute.

Il est vraisemblable que le problème soit lié à la localisation de la station limnimétrique. La sonde pressiométrique a été placée sous une arche d'un pont en comptant deux. La division de l'écoulement semble ne pas être constante entre les deux arches au cours du temps, entraînant une incertitude sur les valeurs de débits calculées.

3.3.5.2. Bilans mensuels

Les bilans mensuels ont été réalisés pour cette station, ils sont repris à titre indicatifs dans le Tableau 3-7 mais ne seront pas interprétés, les données de débits étant peu fiables.

DATE	PREC mm	Eto mm	ETR mm	RFU mm	ΔRFU mm	EU mm	Qcapt mm	Qt mm	ΔRes mm	ε _{fermeture}		
										mm	%	
nov.-14	41.20	12.60	12.60	125.00	0.00	28.60	8.13	12.45	5.51	2.51	6.09	Déficit
déc.-14	80.80	9.70	9.70	125.00	0.00	71.10	8.13	26.69	55.21	-18.93	-23.43	Excédent
janv.-15	76.60	12.90	12.90	125.00	0.00	63.70	9.15	30.65	2.68	21.22	27.70	Déficit
févr.-15	49.00	14.60	14.60	125.00	0.00	34.40	8.04	22.63	-2.12	5.85	11.94	Déficit
mars-15	43.20	35.70	35.70	125.00	0.00	7.50	3.53	21.07	-8.14	-8.96	-20.73	Excédent
avr.-15	44.80	67.30	65.86	103.94	-21.06	0.00	0.00	18.43	-25.28	6.85	15.29	Déficit
mai-15	43.40	85.90	73.98	73.36	-30.58	0.00	0.00	15.12	-8.83	-6.30	-14.51	Excédent
juin-15	47.20	107.40	75.78	44.78	-28.58	0.00	0.00	13.03	-15.66	2.62	5.56	Déficit

Tableau 3-7 : Bilans mensuels du Triffoy à State.

Cependant, l'eau utile et les relevés piézométriques dans le piézomètre de « State », permettent d'appréhender la dynamique de la nappe. Dans la Figure 3-23, on observe une première petite remontée de la nappe au cours du mois de juillet précédant l'apparition de l'eau utile. Un petit épisode de remontée/vidange est observé en août et septembre suite à la présence d'eau utile. Fin septembre, la nappe atteint un premier palier puis rapidement, elle atteint un deuxième palier au cours du mois d'octobre. Elle se vidange jusqu'au début du mois de décembre où la recharge reprend jusqu'à l'atteinte du niveau maximal mi-janvier. La fluctuation saisonnière en 2014-2015 est de l'ordre de 3-4 m.

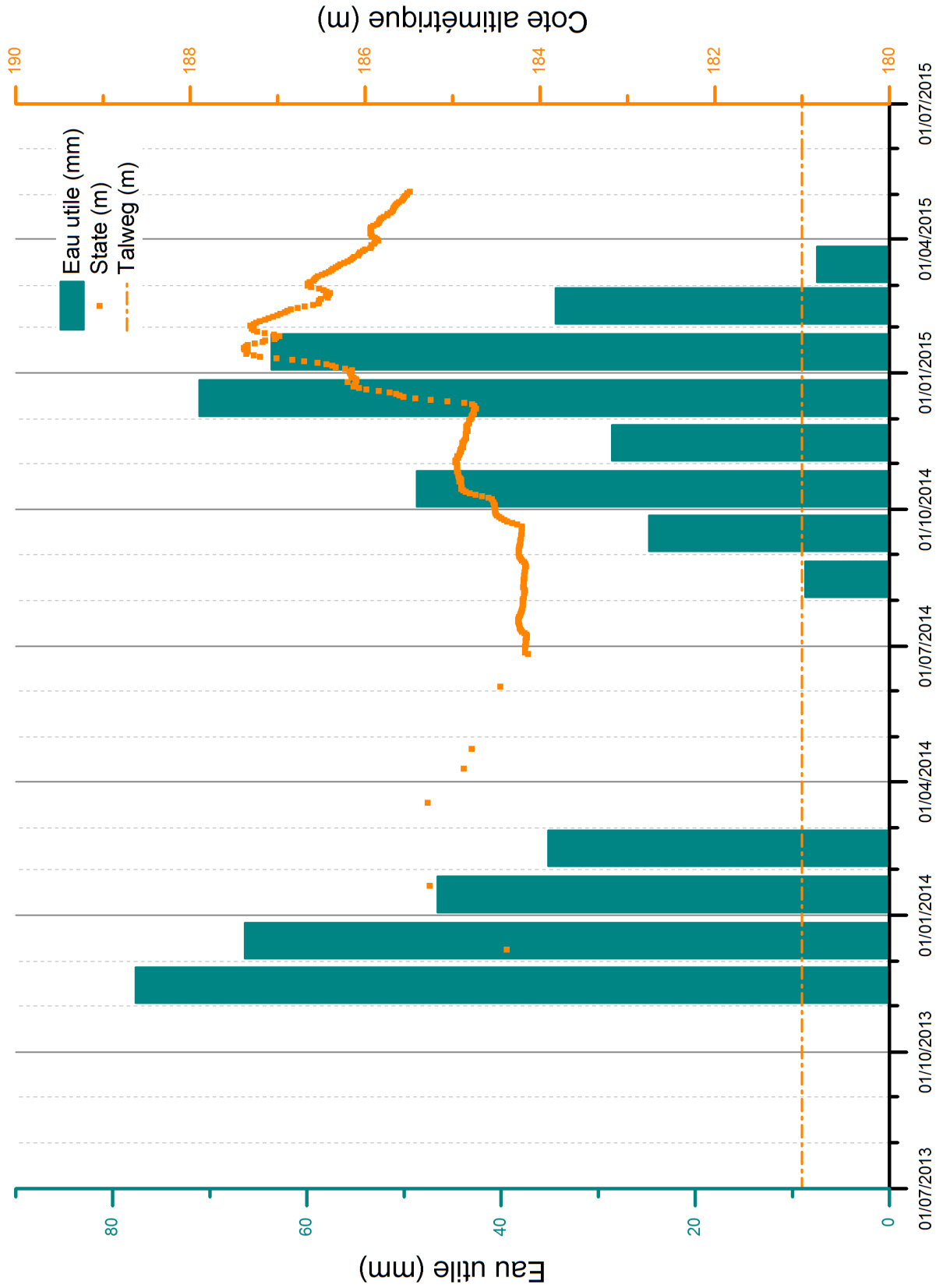


Figure 3-23 : Graphique de l'eau utile mensuelle et des relevés du piézomètre State.

3.3.6. Bilans hydrogéologiques : Station de Jamagne (ST4)

Le sous-bassin que délimite la Station « ST4-Jamagne » a une superficie de 25,2 km² et correspond la partie amont du bassin du Triffois (Figure 3-16).

Les caractéristiques techniques de cette station sont décrites à l'annexe 7.1.4 (page 86). Les données ont été collectées entre le 10 juillet 2013 et le 22 juin 2015.

L'hydrogramme (Figure 3-24) montre, qu'à l'exception d'évènements pluvieux, le débit du Triffois à cette station est très faible, à tel point qu'en période estival il peut être à sec (juillet 2014). Le débit maximal⁵ observé est de 0.89 m³/s.

⁵ Cette valeur est probablement exagérée suite à l'extrapolation de la courbe de tarage (2.2.3 Calcul des débits).

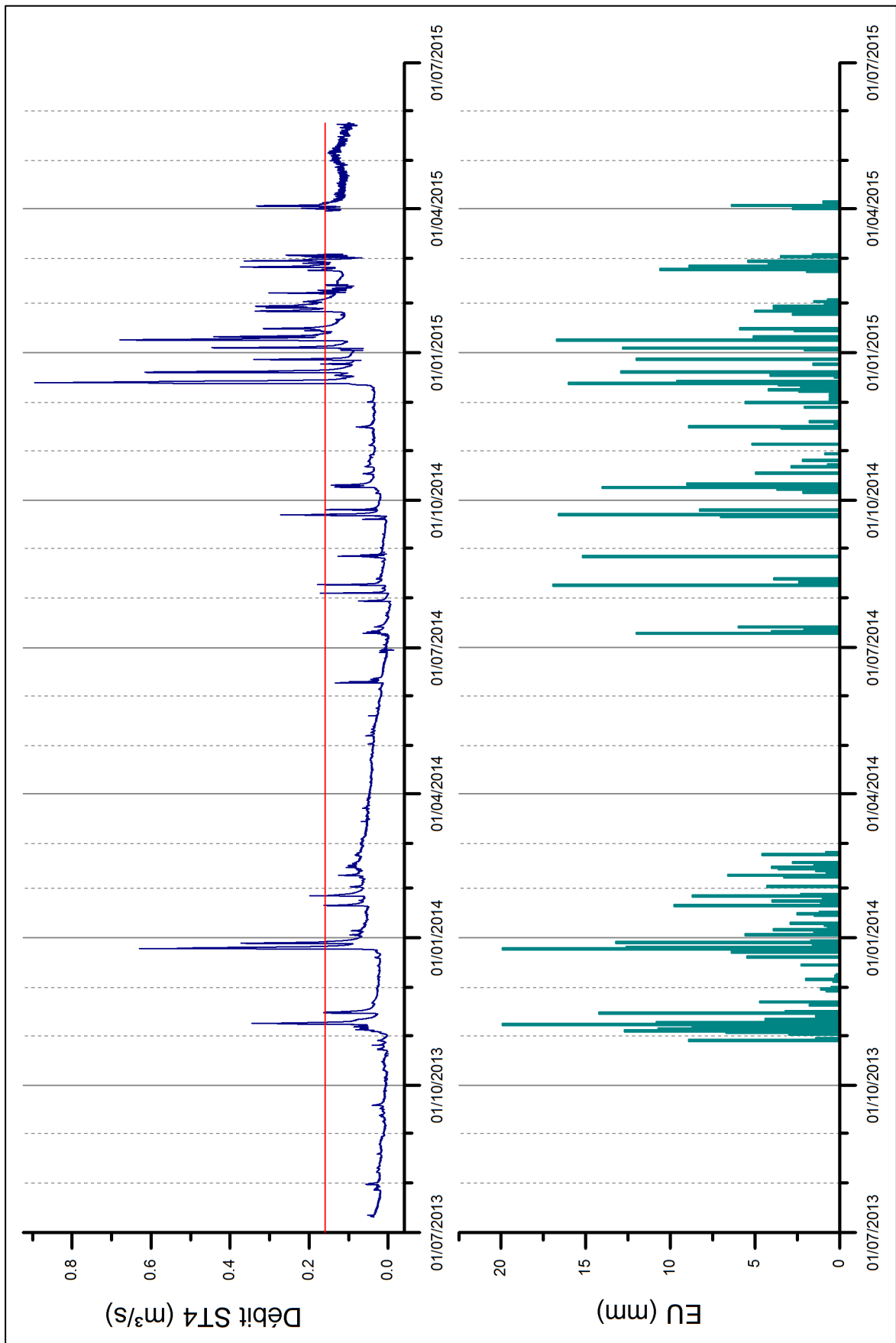


Figure 3-24 : Hydrogramme du Triffoy à Jamagne avec indication du débit maximal mesuré sur le terrain et graphique de l'eau utile.

3.3.6.1. Bilan annuel

Le bilan annuel de ce sous-bassin, calculé de septembre 2013 à août 2014, donne les valeurs suivantes :

P	= ETR	+ Q_{capt}	+ Q_t	+ ΔRes	+ ΔRFU	+ $\epsilon_{fermeture}$
896.90 mm	= 612.30 mm	+ 0 mm	+ 46.82 mm	- 1.53 mm	+ 67.25 mm	+ 172.06 mm
100 %	= 68.27 %	+ 0 %	+ 5.22 %	- 0.17 %	+ 7.50 %	+ 19.18 %

L'évapotranspiration réelle représente 68% des précipitations. Les 32 % restant correspondent à l'eau utile, soit la quantité d'eau disponible pour le ruissellement et l'infiltration. La lame d'eau écoulée à la station de Jamagne représente un peu plus de 5 % des pluies annuelles. Le bilan se montre déficitaire avec un terme de bouclage de 19 %, ce qui reflète un flux sortant (Terme Q_{out} du bilan, (Éq. 2-1)).

Le contexte hydrogéologique de ce sous-bassin explique ce déficit important : 62% de la superficie du bassin est située au niveau des calcaires du Carbonifère ; de plus les bancs calcaires se prolongent au SE vers le Samson et au NW vers le Hoyoux dont les cotes altimétriques des talwegs sont inférieures (respectivement 136 m à Faux-les-Tombes et 146 m au niveau de la confluence avec le Triffoiy) à celle du Triffoiy à Jamagne (200 m). En conséquence, le cours d'eau se retrouve perché au-dessus du niveau de la nappe et constitue ainsi un tronçon de rivière infiltrant.

3.3.6.2. Bilans mensuels

Les résultats des bilans mensuels représentés au Tableau 3-8 montrent qu'en l'absence d'eau utile, le terme de fermeture indique un léger excès d'écoulement ou le bouclage du bilan. Dès que l'eau utile est présente, le terme de fermeture indique un déficit d'écoulement pouvant atteindre 67% (décembre 2013).

	P mm	Eto mm	ETR mm	RFU mm	Δ RFU mm	EU mm	Qcapt mm	Qt mm	Δ Res mm	sfermeture		
										mm	%	
août-13	27.60	90.90	55.95	41.66	-28.35	0.00	0.00	2.14	-2.05	-0.09	-0.32	Excédent
sept.-13	57.30	50.50	50.50	48.46	6.80	0.00	0.00	1.16	-1.28	0.12	0.21	Déficit
oct.-13	71.00	30.90	30.90	88.56	40.10	0.00	0.00	0.95	0.60	-1.56	-2.19	Excédent
nov.-13	125.60	11.50	11.50	125.00	36.44	77.66	0.00	5.59	2.04	70.03	55.76	Déficit
déc.-13	80.40	14.00	14.00	125.00	0.00	66.40	0.00	6.82	5.66	53.92	67.07	Déficit
janv.-14	61.40	14.80	14.80	125.00	0.00	46.60	0.00	7.28	6.17	33.15	53.98	Déficit
févr.-14	57.00	21.80	21.80	125.00	0.00	35.20	0.00	7.07	-1.21	29.34	51.48	Déficit
mars-14	17.60	45.90	43.49	99.11	-25.89	0.00	0.00	5.79	-2.38	-3.41	-19.36	Excédent
avr.-14	13.40	67.90	49.12	63.39	-35.72	0.00	0.00	4.37	-2.27	-2.10	-15.68	Excédent
mai-14	60.80	83.80	71.70	52.50	-10.90	0.00	0.00	3.28	-5.20	1.92	3.15	Déficit
juin-14	104.20	102.50	102.50	54.20	1.70	0.00	0.00	1.56	-4.02	2.46	2.36	Déficit
juil.-14	127.40	94.00	94.00	87.60	33.40	0.00	0.00	0.80	-0.38	-0.42	-0.33	Excédent
août-14	120.80	74.70	74.70	125.00	37.40	8.70	0.00	2.15	0.69	5.85	4.84	Déficit
sept.-14	76.20	51.40	51.40	125.00	0.00	24.80	0.00	2.53	3.24	19.04	24.98	Déficit
oct.-14	76.00	27.30	27.30	125.00	0.00	48.70	0.00	4.49	4.33	39.88	52.47	Déficit
nov.-14	41.20	12.60	12.60	125.00	0.00	28.60	0.00	3.92	0.31	24.37	59.14	Déficit
déc.-14	80.80	9.70	9.70	125.00	0.00	71.10	0.00	14.19	14.68	42.23	52.27	Déficit
janv.-15	76.60	12.90	12.90	125.00	0.00	63.70	0.00	19.46	4.43	39.81	51.97	Déficit
févr.-15	49.00	14.60	14.60	125.00	0.00	34.40	0.00	14.73	2.18	17.49	35.70	Déficit
mars-15	43.20	35.70	35.70	125.00	0.00	7.50	0.00			problème instrumental		
avr.-15	44.80	67.30	65.86	103.94	-21.06	0.00	0.00	13.12	-2.49	-10.63	-23.72	Excédent
mai-15	43.40	85.90	73.98	73.36	-30.58	0.00	0.00	11.69	-7.07	-4.62	-10.64	Excédent

Tableau 3-8 : Bilans mensuels du Triffroy à Jamagne.

Les bilans mensuels permettent également de mieux comprendre la dynamique de la nappe aquifère par rapport à l'eau utile (Tableau 3-8). En prenant comme référence le piézomètre Jamagne (Figure 3-16), on constate que la fluctuation saisonnière en 2014-2015 est de l'ordre de 3 m (Figure 3-25). Une première petite remontée de la nappe a lieu au cours du mois de juillet précédant l'apparition de l'eau utile. De petits épisodes de remontée/vidange sont observés en août et septembre suite à la présence d'eau utile. Fin septembre, la nappe atteint un premier palier puis rapidement, elle atteint un deuxième palier au cours du mois d'octobre. Elle se stabilise à ce palier jusqu'au début du mois de décembre où la recharge reprend jusqu'à l'atteinte du niveau maximal en mars.

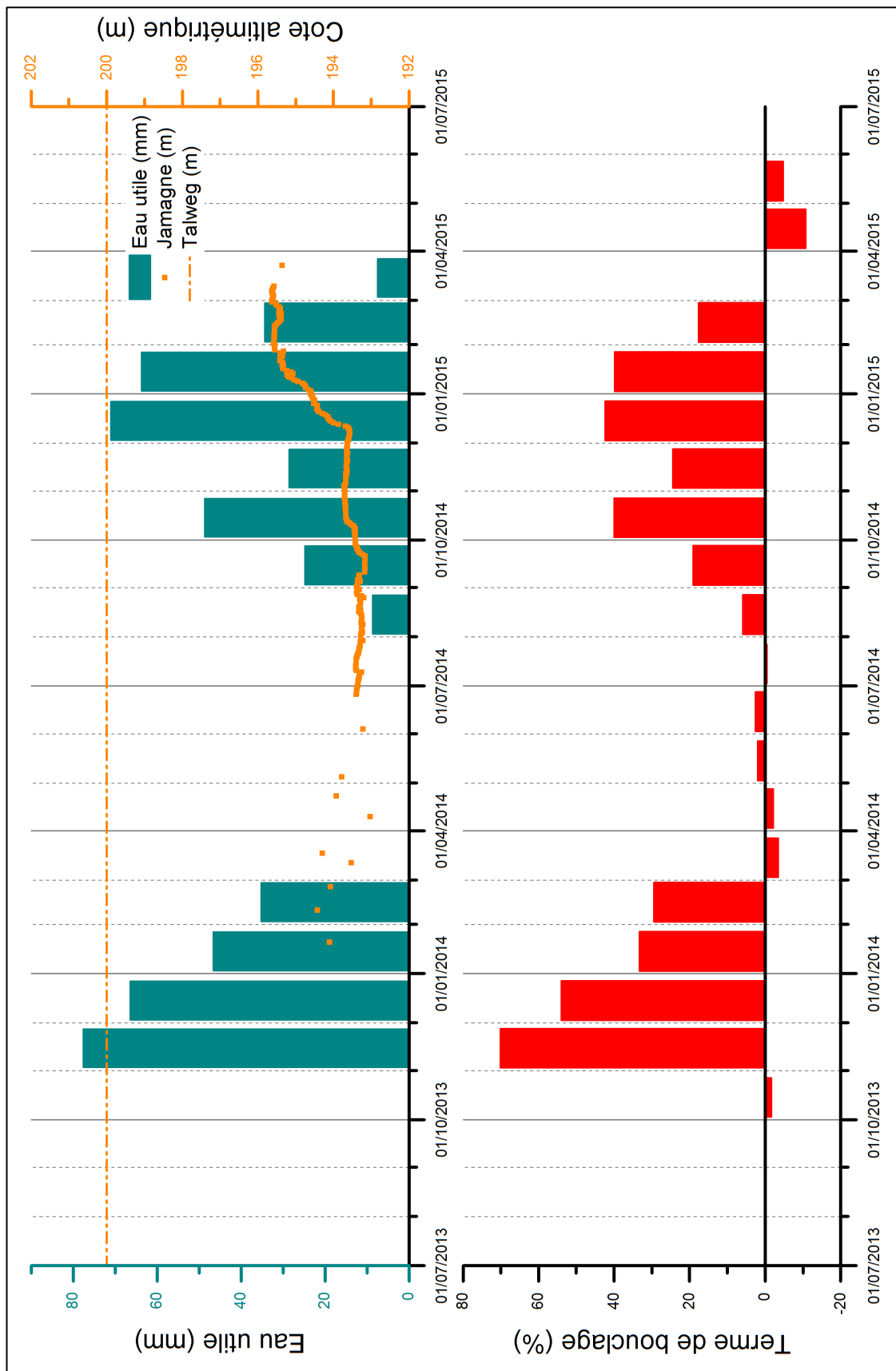


Figure 3-25 : Graphique des termes de bouclage mensuels de la station de Jamagne ; de l'eau utile mensuelle et des relevés piézométriques du piézomètre de Jamagne.

4. Conclusions

4.1. Bilans annuels

Les résultats des bilans annuels : déficitaire ou excédentaire, mettent en évidence respectivement l'existence de flux sortant ou entrant. Lorsqu'un bilan est bouclé, cela peut suggérer qu'aucun flux entrant ni sortant ne sont présents ou bien que les flux sortant et entrant sont équivalents ou que les flux sont très faibles et ne transparaissent pas dans le résultat du bilan.

Les résultats des bilans annuels pour les différentes stations, sont repris dans le Tableau 4-1:

Bassin versant	P	ETR	Q _{capt}	Q _t	ΔR	ε _{fermeture}	Résultat du bilan annuel
Sous- bassin / Tronçon							
Triffoy (ST1)	100%	68.27 %	13.15%	14.41%	6.13%	-1.96%	Bouclé
Source de Marchin (ST2)	100%	68.27 %	5.34%	14.99%	7.26%	4.14%	Bouclé
Jamagne (ST4)	100%	68.27 %	0%	5.22%	7.32%	19.18%	Déficitaire
Hoyoux Amont (ST5)	100%	68.27 %	28.06%	21.83%	3.87%	-22.04%	Excédentaire
Ruisseau de Pailhe (ST7)	100%	68.27 %	0%	10.43%	8.11%	13.19%	Déficitaire
Ruisseau d'Havelange (ST9)*	100%	28.5 %	1.80%	7.36%	0.20%	88.95%	(Déficitaire)
Petit Avin (ST8)	100%	68.27 %	4.67%	24.26%	8.17%	-5.37%	Bouclé
Torrent du Bonne (ST6)	100%	68.27%	0.04%	2.29%	7.41%	22%	Déficitaire

* Bilan réalisé sur une durée de 3 mois, en période hivernale.

Tableau 4-1 : Résultats des bilans annuels.

Le caractère déficitaire du bassin versant du Torrent de Bonne met en évidence un flux sortant important (Terme Q_{out} du bilan, Éq. 2-1) s'expliquant par le sens de l'écoulement des eaux souterraines dans les bandes calcaires. Cet écoulement se fait en direction du Hoyoux via la structure synclinale de Modave. L'écoulement déficitaire du bassin de Torrent de Bonne se retrouve dans le bassin du Hoyoux à Modave (ST5) via l'écoulement au sein des bancs calcaires de la structure synclinale de Modave, expliquant ainsi le caractère excédentaire du bassin versant du Hoyoux Amont. Les termes de fermeture exprimés en pourcentage pour les bassins versants du Hoyoux Amont et le Torrent de Bonne (-22.04 et 22%, respectivement), laissent penser que l'excès d'écoulement du Hoyoux Amont s'explique uniquement par l'écoulement en provenance du Torrent de Bonne. Cependant, lorsqu'on considère le résultat des bilans en termes de volume, on constate que le volume d'eau souterraine provenant du Torrent de Bonne (10 042 333 m³) ne suffit pas à expliquer le volume excédentaire (18 629 843 m³) observé dans le bassin versant du Hoyoux. D'autres flux entrants sont donc à envisager.

Les bilans annuels des sous-bassins du Hoyoux Amont montrent que le ruisseau de Pailhe (ST7) et le ruisseau d'Havelange (ST9)⁶ sont déficitaires. La partie amont du bassin (ST8 – Petit Avin) ne semble présenter aucun flux sortants ou entrants nets ; la situation de la station après le seuil hydrogéologique entre les calcaires carbonifères et les famenniens explique le bouclage du bilan.

Le bouclage du bilan annuel du bassin versant du Triffoy ainsi que celui de la station juste à l'amont de l'exutoire (ST2 – Source de Marchin), semble indiquer l'absence de flux entrant et sortant nets. Le

⁶ Le bilan de la station « ST9 - Ruisseau d'Havelange n'a pu être réalisé que sur 3 mois.

bilan à la station « ST4 – Jamagne » déficitaire montre que le ruisseau est perché et donc perdant sur cette section.

4.2. Bilans annuels et piézométrie

4.2.1. Identification des flux d'eau souterraine

Afin de confirmer les flux d'eau souterraine estimés par le calcul des bilans annuels, des gradients piézométriques ont été calculés :

- entre le bassin versant du Torrent de Bonne et le talweg du Hoyoux : il en résulte des gradients de l'ordre de 1 à 2% en direction du Hoyoux.
- Le sous-bassin du Ruisseau de Pailhe et le bassin versant du Hoyoux amont : le gradient (0,9%) serait orienté vers le NE. Sachant que le ruisseau de Pailhe est perché au niveau du village du même nom, le caractère déficitaire de ce sous-bassin pourrait donc être expliqué par un flux sortant lié à un écoulement souterrain en direction de la station « ST5 – Modave ».
- entre le piézomètre F1-CILE et le talweg du Hoyoux, et d'autre part entre le piézomètre F1-CILE et le talweg du Triffoiy : il en résulte que les deux gradients sont équivalents de l'ordre de 1,5 – 2%. Il y a donc un écoulement souterrain général en direction du NE permettant à la fois un drainage de la nappe par le Triffoiy et par le Hoyoux. Cette situation explique la fermeture des stations aval du Triffoiy (« ST1 – Exutoire du Triffoiy » et « ST2 – Source de Marchin »)

Les bilans annuels et le calcul des gradients piézométriques permettent d'identifier les flux entre les bassins et sous-bassins (Figure 4-1), répondant ainsi au premier objectif de ce travail.

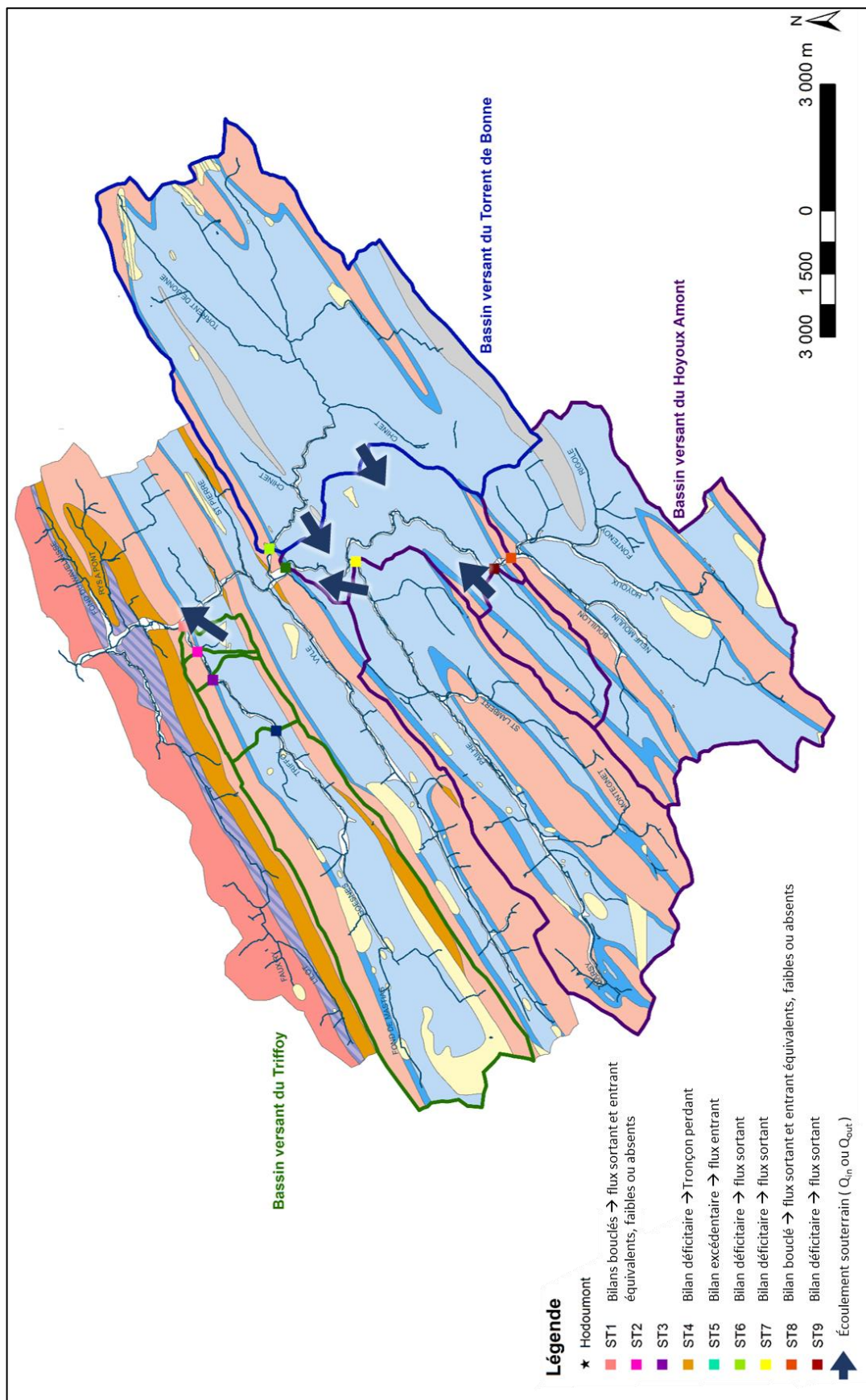


Figure 4-1 : Carte hydrogéologique de la zone d'étude avec indication des écoulements souterrains (Termes Q_{in} et Q_{out} du bilan, Éq. 2-1).

4.2.2. Identification de la typologie des cours d'eau

L'analyse de la piézométrie permet de répondre au deuxième objectif qui était d'identifier le caractère (drainant, infiltrant, pseudo-équilibre) des cours d'eau et donc le sens des échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines. En comparant les cotes altimétriques des talwegs des cours d'eau et la nappe au droit des piézomètres, le sens des échanges est facilement identifiable. Cependant, cette méthode ne rend compte de la situation qu'à proximité du piézomètre ce qui ne permet pas d'extrapoler la typologie à toute la masse d'eau, et elle ne permet pas de quantifier les échanges qui dépendent de la perméabilité des alluvions de la rivière.

Les bilans hydrogéologiques ne semblent pas être la méthode la plus indiquée dans l'optique d'une étude qui ne s'intéresserait qu'à la typologie d'un cours d'eau, d'un affluent ou d'un tronçon. La méthode des jaugeages de sections successives utilisée lors du projet Synclin'Eau (Brouyère et al., 2008d), permet d'une part d'identifier le sens de ces interactions mais également de les quantifier.

L'ensemble des données Synclin'Eau couplées aux nouvelles investigations, permet de confirmer la typologie des cours d'eau telle que présentée à la Figure 4-2.

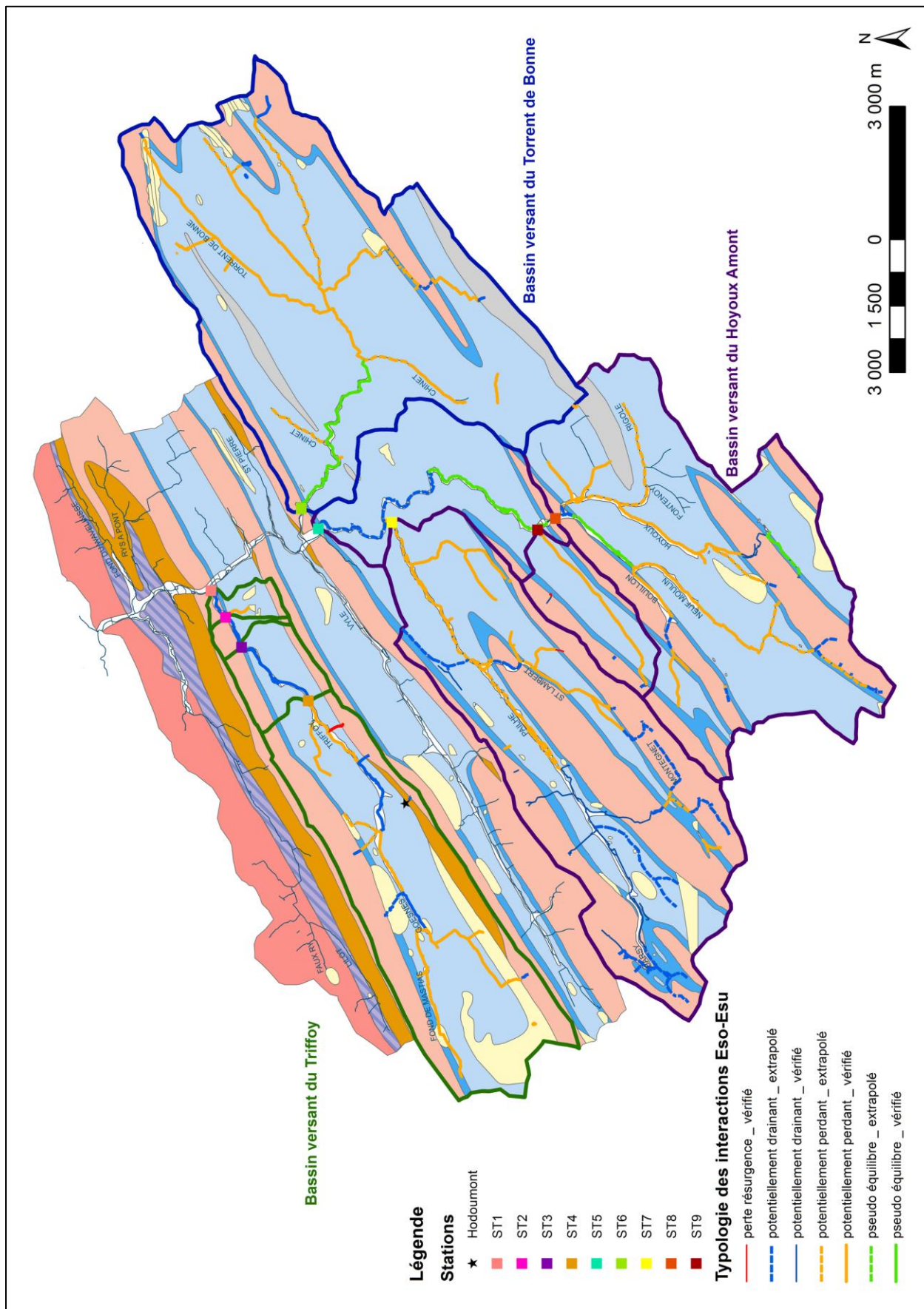


Figure 4-2 : Carte hydrogéologique de la zone d'étude avec indication de la typologie des interactions Eso-Esu et la localisation des stations limnimétriques.

4.3. Bilans mensuels

Les résultats des bilans mensuels de toutes les stations mettent en évidence l'alternance du caractère excédentaire (ou un bilan bouclé dans le cas des cours d'eau perdant) aux périodes avec peu ou sans eau utile et du caractère déficitaire lors des périodes où l'eau utile est présente. En couplant les résultats des bilans mensuels avec les données de piézométrie, on constate les bilans déficitaires sont systématiquement liés à la recharge de la nappe qui se fait en deux phases :

1°) la stabilisation du rabattement ;

2°) la remontée de la nappe.

La phase directe probablement liée à un apport direct et rapide mais de flux limités, transitant par des zones karstifiées ou d'écoulements préférentiels, stabilise le niveau de la nappe (ST5 – Modave et ST6 –Torrent de Bonne), ou occasionne de petites remontées de la nappe (dans le Triffoy et dans le sous bassin du ruisseau d'Havelange). Cette première phase ne s'observe pas dans le sous-bassin du ruisseau de Pailhe.

Dans le cas des aquifères carbonatés, la phase retardée peut s'expliquer par la présence d'un épikarst dans les formations calcaires de la région étudiée. La présence d'un épikarst entraîne la formation, lors des périodes d'eau utile, d'une zone saturée qui alimentera lentement et avec un certain délai, la zone d'infiltration. En effet, l'épikarst et son aquifère perché temporaire peut être considéré comme une zone d'amortissement/ tampon, qui retarde l'infiltration en stockant de l'eau dans une zone saturée discontinue (Daher et al, 2011) (Bakalowicz, 2013). On comprend donc les délais entre l'apparition de l'eau utile et la remontée de la nappe, de 3 à 5 mois pour la station « ST6-Torrent de Bonne » et jusqu'à 7 mois pour la « ST7-Ruisseau de Pailhe ». La recharge maximale de la nappe est observée 6 à 9 mois après l'apparition d'eau utile. Ce délai de recharge varie selon la disponibilité de l'eau utile et selon la conductivité hydraulique de l'aquifère calcaire. Du fait de ce délai, la nappe assure, en se vidangeant, l'alimentation des cours d'eau lorsque l'eau utile est absente ; c'est ce qui explique les excès d'écoulement observés dans les bilans mensuels en absence d'eau utile.

Au niveau de la station de Modave (ST5), on constate un déficit lors du début de la recharge de la nappe malgré l'apport d'eau venant du Torrent de Bonne.

5. Recommandations et perspectives

Au terme de l'activité bilan de cette étude, différentes recommandations peuvent être proposées dans l'optique d'améliorer et faciliter la réalisation de bilans hydrogéologiques futurs.

Tout d'abord au vu des résultats des différents bilans, la réalisation de ceux-ci à l'échelle mensuelle permet une meilleure compréhension du fonctionnement hydrogéologique tant à l'échelle du bassin versant qu'à celle de sous-bassin. Il est donc recommandé pour des travaux futurs de travailler à l'échelle mensuelle.

Le bilan annuel reste néanmoins intéressant à calculer car il permet de quantifier aisément les flux d'eau souterraine échangés entre bassins.

Du fait d'un travail à l'échelle mensuelle, certains paramètres nécessitent d'être obtenus à une meilleure résolution temporelle au minimum identique :

1. Les volumes captés :

Lors de cette étude, ceux-ci ont été obtenus sous la forme d'un volume annuel total par site de captage. Ce volume total a donc été réparti uniformément au cours des mois de l'année concernée. Or les volumes captés ne sont pas homogènes durant les différents mois de l'année, en raffinant la résolution temporelle de ce paramètre, les bilans seront donc eux aussi plus précis.

2. Les données piézométriques :

Lors de ce travail, elles ont permis d'approcher la dynamique de la recharge de la nappe en fonction de l'eau utile. Lorsque certaines chroniques piézométriques présentent des lacunes, cette dynamique n'est pas mise en évidence par manque de données. Des chroniques piézométriques mensuelles couplées aux bilans mensuels, permettraient de suivre la dynamique de la nappe concernée.

De cette utilisation des données piézométriques découle une autre exigence, celle d'avoir un piézomètre de référence dans chaque bassin ou sous-bassin étudié. Pour que les données piézométriques représentent bien les variations de la hauteur de la nappe, le piézomètre devrait idéalement se situer dans l'amont du bassin/sous-bassin afin que ces variations de hauteur soient importantes.

Lors d'une étude à l'échelle du tronçon du cours d'eau, avoir un piézomètre proche de chaque station limnimétrique permettrait d'affiner la compréhension de la dynamique de la nappe au sein d'un même bassin/sous-bassin.

Concernant les perspectives de valorisations des données fournies par les bilans, deux axes sont à envisager :

1. Le couplage des stations limnimétriques avec des sondes de conductivité :

Le calcul des variations de réserve de la nappe et du débit de base peut être amélioré par le couplage des stations limnimétriques avec des sondes relevant la conductivité à une même échelle temporelle. En effet, la méthode de calcul utilisée au cours de cette étude (méthode

du VCN3, voir 2.2.4 Estimation de la variation de la réserve d'eau souterraine) n'est probablement pas la plus adéquate. La discussion quant aux méthodes de séparation d'hydrogrammes n'a pas été poussée plus avant dans ce rapport car elle fera l'objet d'un chapitre dans le livrable 4.1. Cependant, on peut déjà constater que la méthode de séparation d'hydrogramme basée sur les données de conductivité semble offrir de belles perspectives quant au calcul du débit de base et à l'évaluation des variations de la réserve d'eau souterraine même si elle présente des difficultés au point de vue instrumental.

2. La réalisation des bilans à l'échelle hebdomadaire :

La réalisation des bilans mensuels est déjà très intéressante car elle permet de mettre en évidence la dynamique saisonnière de la nappe. Néanmoins, en réalisant également des bilans hebdomadaires, il sera probablement possible de comprendre les événements de recharge et de vidange de la nappe ayant lieu à des résolutions temporelles plus fines, par exemple : des épisodes de recharge ponctuels suivis d'une vidange qui ne s'inscrivent pas dans la dynamique saisonnière de la nappe.

À titre expérimental, les bilans hydrogéologiques ont été réalisés à l'échelle hebdomadaire au cours de cette étude (Annexe 7.4 Résultats des bilans hydrogéologiques hebdomadaires). L'interprétation des résultats de ces bilans hebdomadaires n'a pas été réalisée, faute de temps.

Au niveau instrumental, il faudrait placer aux stations limnimétriques des sondes transmettant les données, permettant ainsi une réponse plus rapide aux problèmes instrumentaux et donc d'éviter toute perte de données.

6. Bibliographie

- Bakalowicz, M. *Epikarst Processes*. Vol. 6, chez *Treatise on Geomorphology*, de Shorder J & Frumkin A, 164-171. San Diego, CA: Academic Press, 2013.
- Brouyère S., Gesels J., Jamin P., Robert T., Thomas L., Dassargues A., Bastien J., Vanwittenberge F., Rorive A., Dossin F., Lacour JL., Le Madec D., Nogarède P., Hallet V. *Projet Synclin'EAU : Rapport de caractérisation de la MESO RWM021*. délivrable D.3.42 dans le cadre de la convention RW et SPGE-Aquapole : Caractérisation hydrogéologique et support à la mise en oeuvre de la Directive Européenne 2000/60 sur les masses d'eau souterraine en Région Wallonne, Belgique: Université de Liège, Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix Namur, Facultés polytechniques de Mons, 2008c.
- Brouyère S., Gesels J., Jamin P., Robert T., Thomas L., Dassargues A., Bastien J., Vanwittenberge F., Rorive A., Dossin F., Lacour JL., Le Madec D., Nogarède P., Hallet V. *Projet Synclin'EAU : Rapport de caractérisation de la MESO RWM021*. délivrable D.3.12 dans le cadre de la convention RW et SPGE-Aquapole : Caractérisation hydrogéologique et support à la mise en oeuvre de la Directive Européenne 2000/60 sur les masses d'eau souterraine en Région Wallonne, Belgique: Université de Liège, Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix Namur, Facultés polytechniques de Mons, 2008b.
- Brouyère S., Gesels J., Jamin P., Robert T., Thomas L., Dassargues A., Bastien J., Vanwittenberge F., Rorive A., Dossin F., Lacour JL., Le Madec D., Nogarède P., Hallet V. *Projet Synclin'EAU : Rapport de caractérisation de la MESO RWM021*. délivrables D3.52 et D4.52 dans le cadre de la convention RW et SPGE-Aquapole : Caractérisation hydrogéologique et support à la mise en oeuvre de la Directive Européenne 2000/60 sur les masses d'eau souterraine en Région Wallonne, Belgique: Université de Liège, Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix Namur, Facultés polytechniques de Mons, 2008d.
- Daher W., Pistre S., Kneppers A., Bakalowicz M., Najem W. «Karst and artificial recharge: Theoretical and practical problem; A preliminary approach to artificial recharge assessment.» *Journal of Hydrology* 408 (2011): 189-202.
- Fetter, C.W. *Applied Hydrogeology 4th ed*. New Jersey: Prentice-Hall, 2001.
- Raes, D. *Reference Manuel: The ETo Calculator Version 3.2*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations - Land and Water Division, 2012.

- Bakalowicz, M. *Epikarst Processes*. Vol. 6, chez *Treatise on Geomorphology*, de Shorder J & Frumkin A, 164-171. San Diego, CA: Academic Press, 2013.
- Brouyère S., Gesels J., Jamin P., Robert T., Thomas L., Dassargues A., Bastien J., Vanwittenberge F., Rorive A., Dossin F., Lacour JL., Le Madec D., Nogarède P., Hallet V. *Projet Synclin'EAU : Rapport de caractérisation de la MESO RWM021*. délivrable D.3.42 dans le cadre de la convention RW et SPGE-Aquapole : Caractérisation hydrogéologique et support à la mise en oeuvre de la Directive Européenne 2000/60 sur les masses d'eau souterraine en Région Wallonne, Belgique: Université de Liège, Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix Namur, Facultés polytechniques de Mons, 2008c.
- Brouyère S., Gesels J., Jamin P., Robert T., Thomas L., Dassargues A., Bastien J., Vanwittenberge F., Rorive A., Dossin F., Lacour JL., Le Madec D., Nogarède P., Hallet V. *Projet Synclin'EAU : Rapport de caractérisation de la MESO RWM021*. délivrable D.3.12 dans le cadre de la convention RW et SPGE-Aquapole : Caractérisation hydrogéologique et support à la mise en oeuvre de la Directive Européenne 2000/60 sur les masses d'eau souterraine en Région Wallonne, Belgique: Université de Liège, Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix Namur, Facultés polytechniques de Mons, 2008b.
- Daher W., Pistre S., Kneppers A., Bakalowicz M., Najem W. «Karst and artificial recharge: Theoretical and practical problem; A preliminary approach to artificial recharge assessment.» *Journal of Hydrology* 408 (2011): 189-202.
- Fetter, C.W. *Applied Hydrogeology 4th ed*. New Jersey: Prentice-Hall, 2001.
- Raes, D. *Reference Manuel: The ETo Calculator Version 3.2*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations - Land and Water Division, 2012.

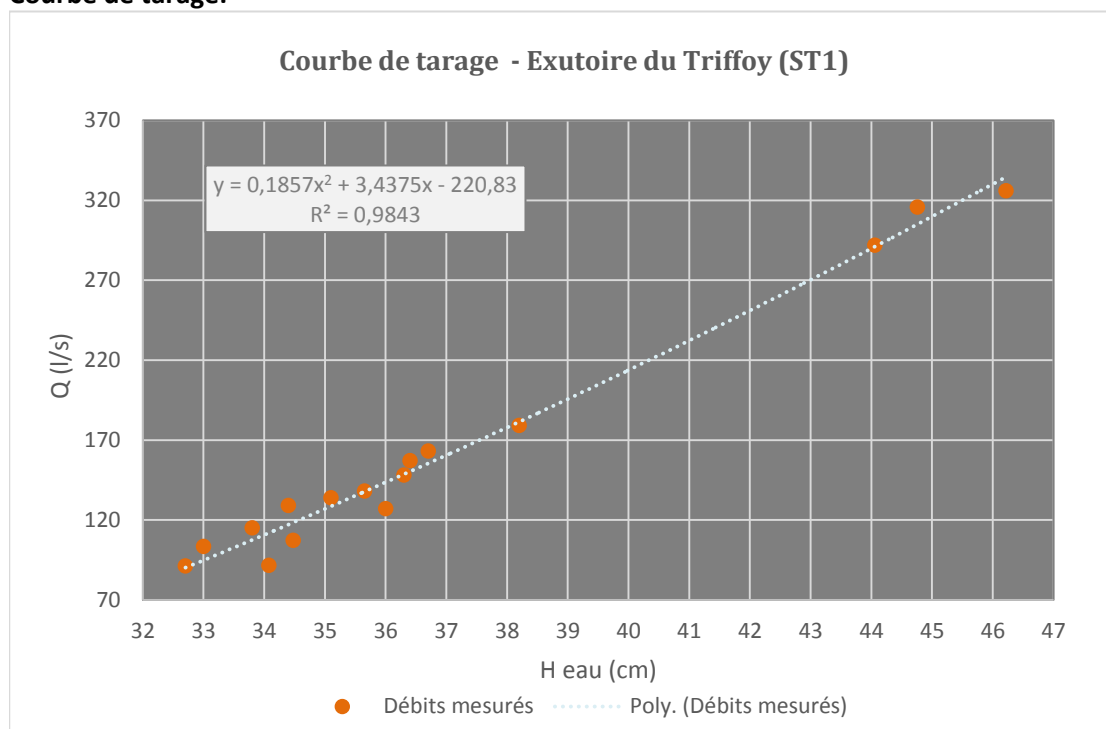
7. Annexes

7.1. Caractéristiques des stations limnimétriques

7.1.1. Station 1 : Exutoire du Triffoy

Nom: ST1 - Exutoire du Triffoy			
Localisation:			
X		213733	
Y		129179	
BV	Triffoy		
ssB	/		
Type(s) de sonde:		Multi-paramètre Echantillonneur automatique	
Autre équipement:			
Chronique limnimétrique:			
Début		10/07/2013	
Fin		Toujours en place	
Interruption			
Jaugeages:			
1er		11/07/2013	
Nombre		16	
Max jaugé		0.33 m ³ /s	
Hauteur en pleins bords	87.6 cm	Débit PB calculé	1.47 m ³ /s

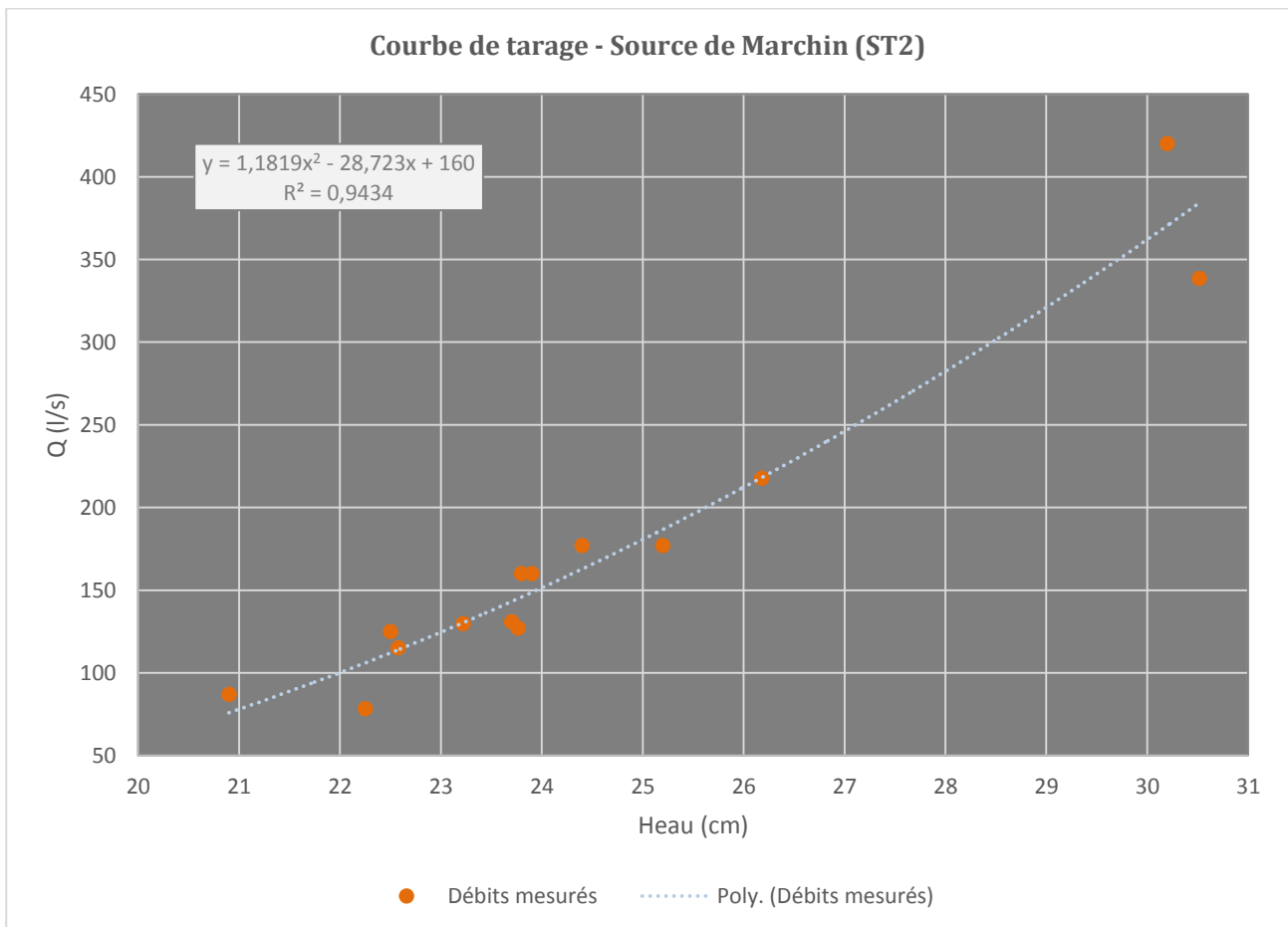
Courbe de tarage:



7.1.2. Station 2 : Source de Marchin

Nom: ST2 - Source de Marchin	
Localisation:	
X	213129
Y	128851
BV	Triffoiy
ssB	Source de Marchin
Type(s) de sonde:	Troll + Diver
Autre équipement:	Diver conductivité (ST10)
Chronique limnimétrique:	
Début	10/07/2013
Fin	Toujours en place
Interruption	
Jaugeages:	
1er	11/07/2013
Nombre	14
Max jaugé	0.42 m ³ /s
Hauteur en pleins bords	72.32 cm Débit PB calculé 4.26 m ³ /s

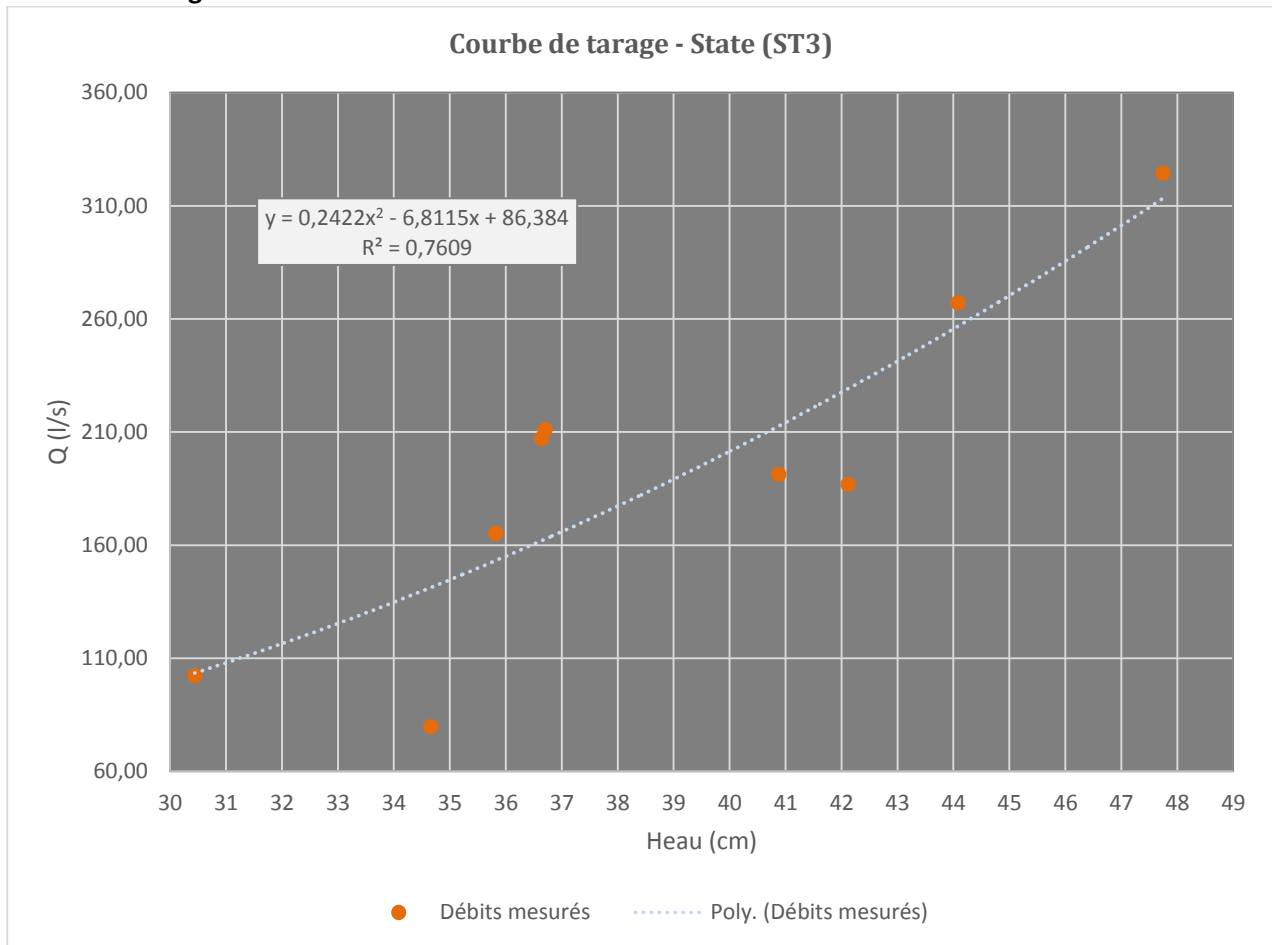
Courbe de tarage:



7.1.3. Station 3 : State

Nom:	ST3 - State		
Localisation:			
X	212453		
Y	1298487		
BV	Triffoy		
ssB	State		
Type(s) de sonde:	Multi-paramètre + Troll + Diver		
Autre équipement:			
Chronique limnimétrique:	Troll	Diver	
Début	10/07/2013	24/09/2014	
Fin	24/02/2015	Toujours en place	
Interruption			
Jaugeages:			
1er	11/07/2013		
Nombre	21		
Max jaugé	0.32m ³ /s		
Hauteur en pleins bords	128.5 cm	Débit PB calculé	3.18 m ³ /s

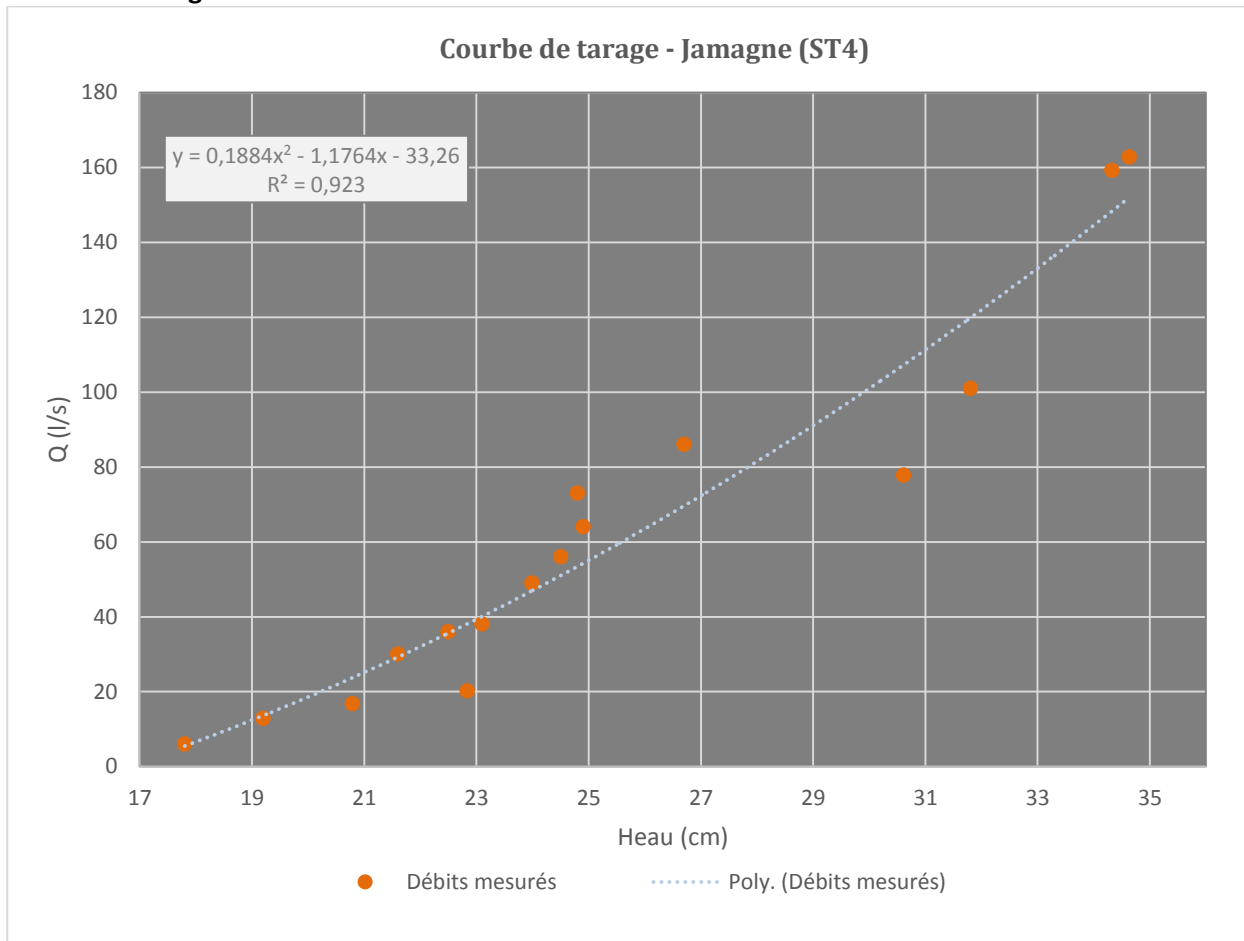
Courbe de tarage:



7.1.4. Station 4 : Jamagne

Nom:	ST4 - Jamagne		
Localisation:	X	211246	
	Y	126981	
	BV	Triffoy	
	ssB	Jamagne	
Type(s) de sonde:	Troll +Diver		
Autre équipement:			
Chronique limnimétrique:	Troll	Diver	
	Début	10/07/2013 30/03/2015	
	Fin	9/02/2015 Toujours en place	
	Interruption	09/02/2015 - 30/03/2015	
Jaugeages:	1er	11/07/2013	
	Nombre	16	
	Max jaugé	0.16 m ³ /s	
	Hauteur en pleins bords	70 cm	Débit PB calculé 0.81 m ³ /s

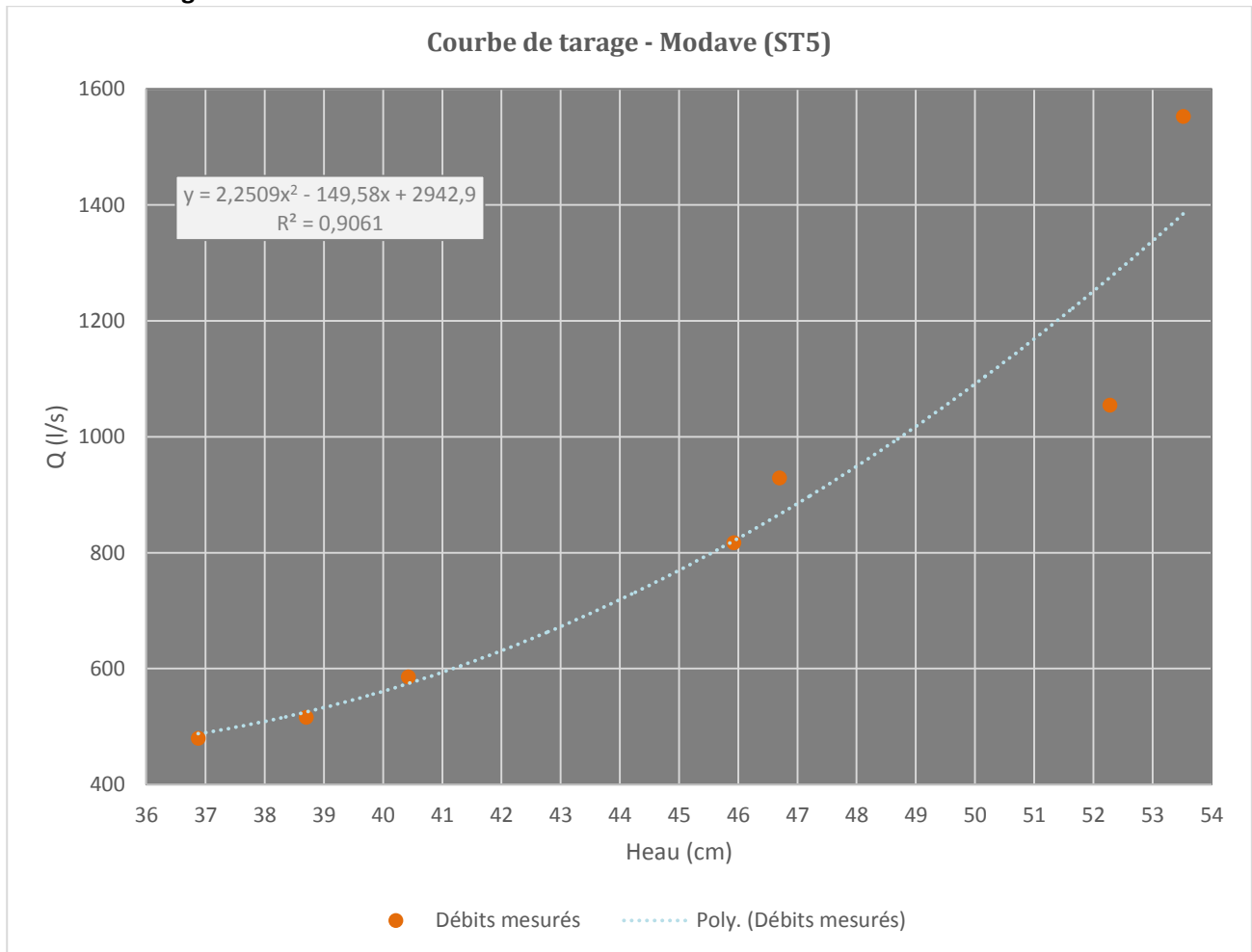
Courbe de tarage:



7.1.5. Station 5 : Modave

Nom: ST5 - Modave	
Localisation:	
X	215128
Y	126751
BV	Hoyoux amont
ssB	/
Type(s) de sonde:	Multi-paramètre
Autre équipement:	
Chronique limnimétrique:	
Début	10/07/2013
Fin	
Interruption	
Jaugeages:	
1er	15/05/2014
Nombre	8
Max jaugé	1.55 m ³ /s
	70.32
Hauteur en pleins bords	209.4 cm
	Débit PB calculé m ³ /s

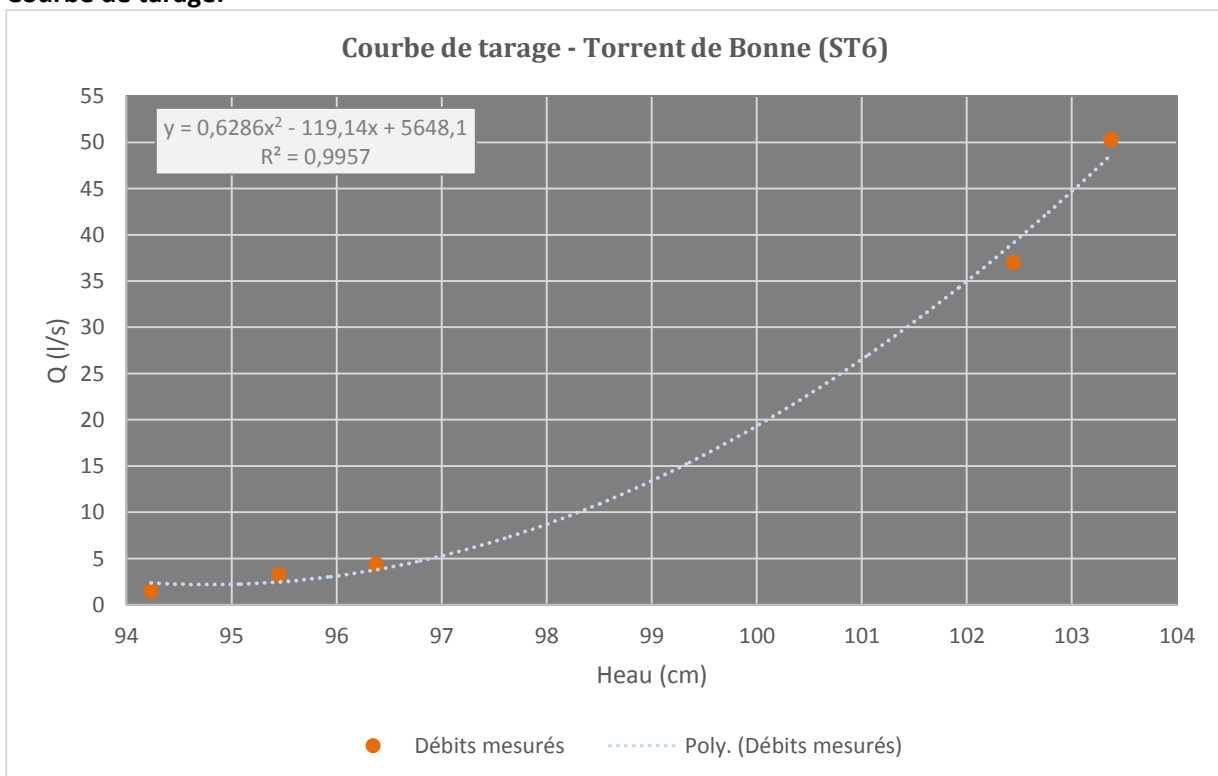
Courbe de tarage:



7.1.6. Station 6 : Torrent de Bonne

Nom:	ST6 - Torrent de Bonne	
Localisation:	X	215581.685
	Y	127137.393
	BV	Torrent de Bonne
	ssB	/
Type(s) de sonde:	Troll	
Autre équipement:		
Chronique limnimétrique:	Début	11/07/2013
	Fin	03/03/2015
	Interruption	
Jaugeages:	1er	28/05/2014
	Nombre	5
	Max jaugé	0.05 m ³ /s

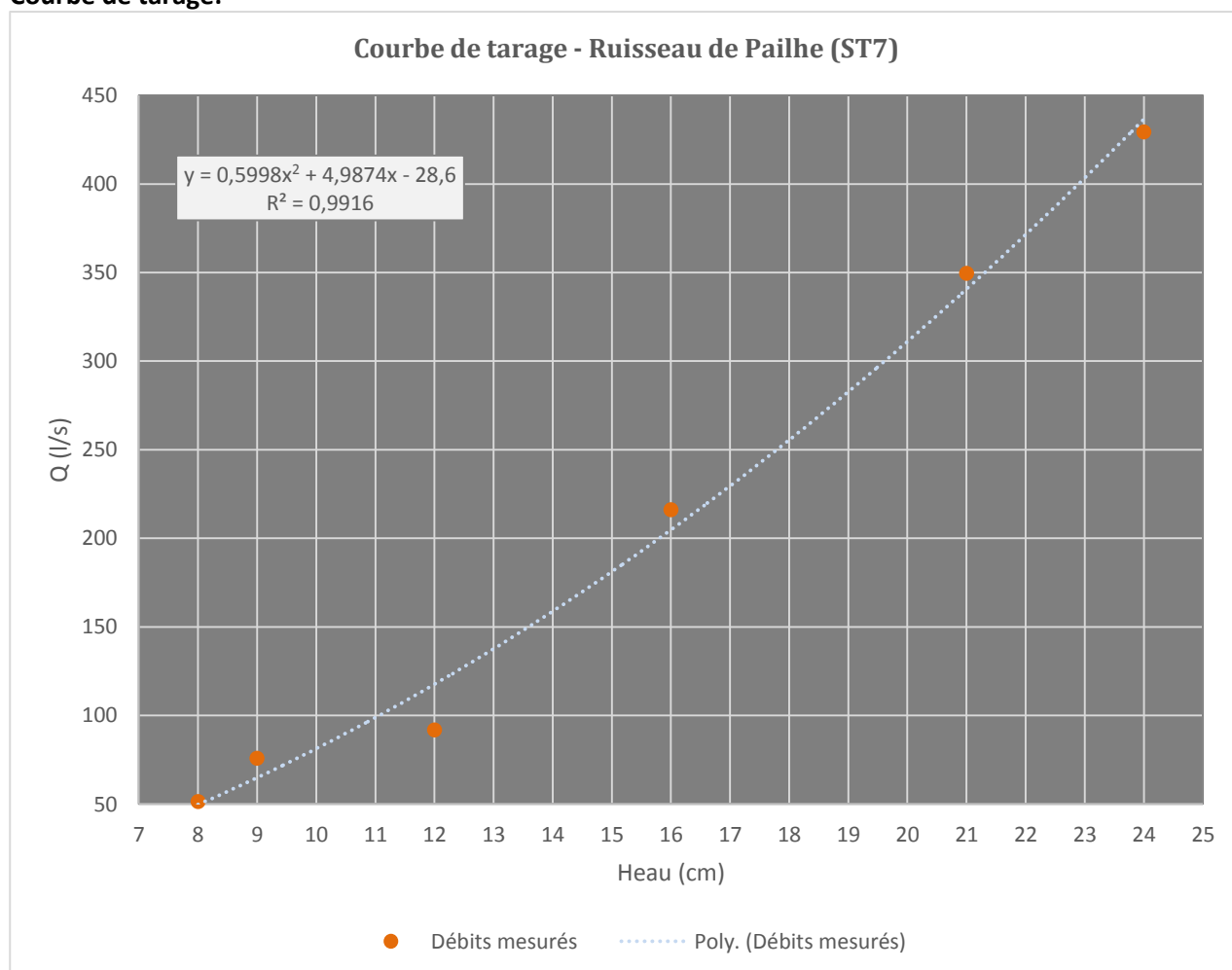
Courbe de tarage:



7.1.7. Station 7 : Ruisseau de Pailhe

Nom:	ST7 - Ruisseau de Pailhe	
Localisation:	X	215274
	Y	125090
	BV	Hoyoux Amont
	ssB	Pailhe
Type(s) de sonde:	Troll + Diver	
Autre équipement:	Baro diver	
Chronique limnimétrique:	Troll	Diver
	Début	11/07/2013 07/01/2015
	Fin	~5/11/2014 Toujours en place
	Interruption	~5/11/2014 - 07/01/2015
Jaugeages:	1er	13/03/2014
	Nombre	7
	Max jaugé	0.43 m³/s

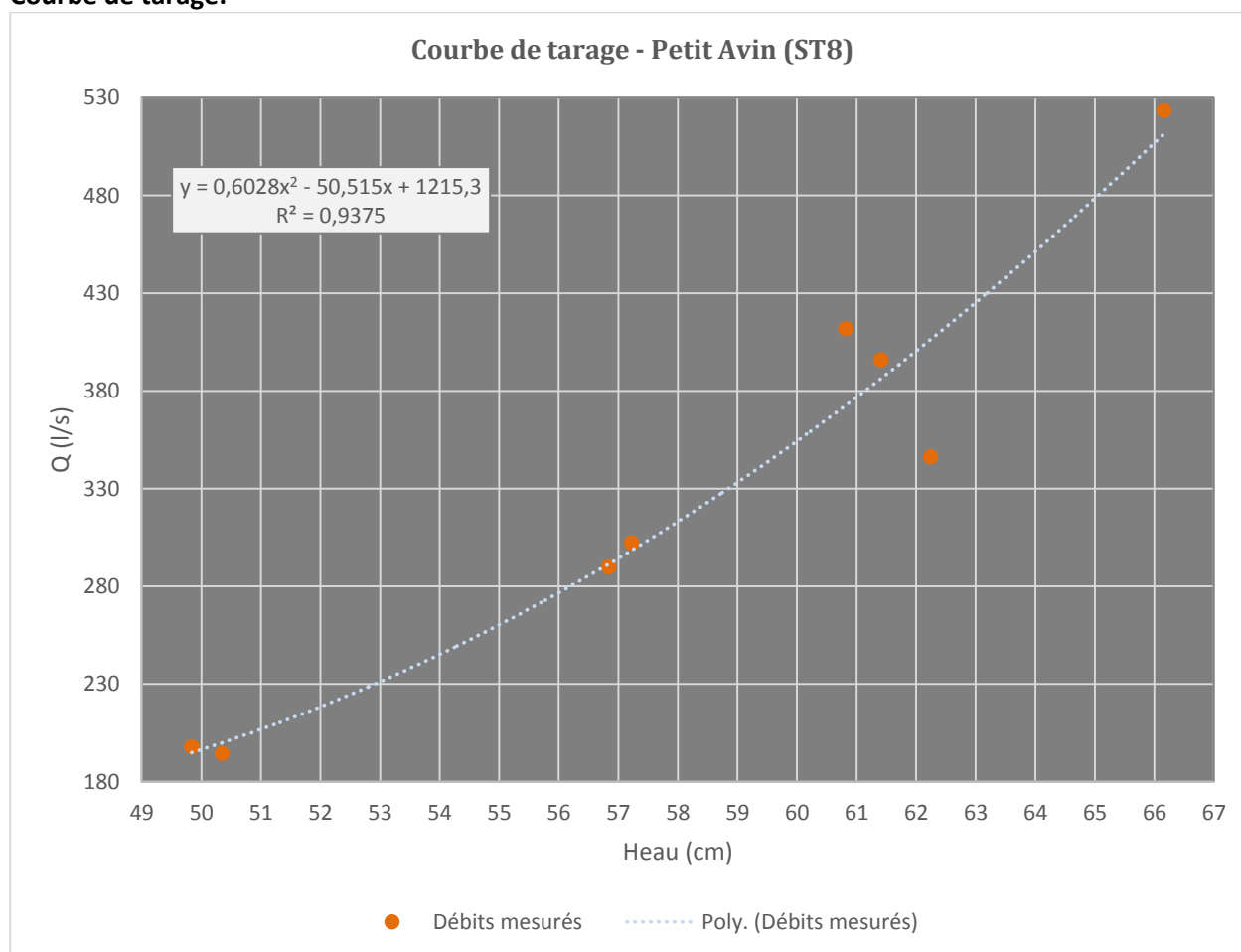
Courbe de tarage:



7.1.8. Station 8 : Petit Avin

Nom:	ST8 - Petit Avin		
Localisation:			
X		215362.064	
Y		121397.215	
		Hoyoux	
BV		Amont	
ssB		Petit Avin	
Type(s) de sonde:		Troll	
		Sonde	
Autre équipement:		Nitrate	
Chronique limnimétrique:			
Début		11/07/2013	
Fin		29/04/2015	
Interruption			
Jaugeages:			
1er		25/02/2014	
Nombre		8	
Max jaugé		0.52 m ³ /s	
Hauteur en pleins bords		97.94 cm	Débit PB calculé 2.05 m ³ /s

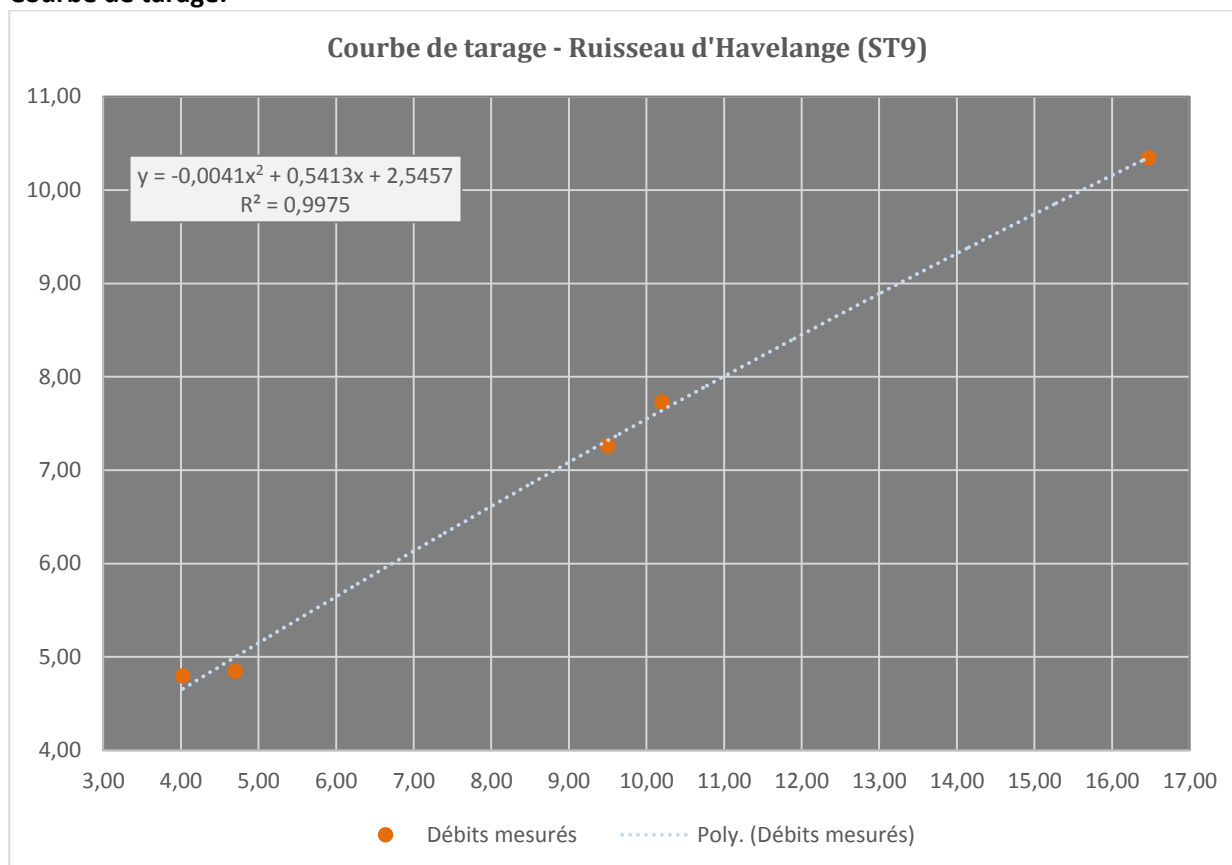
Courbe de tarage:



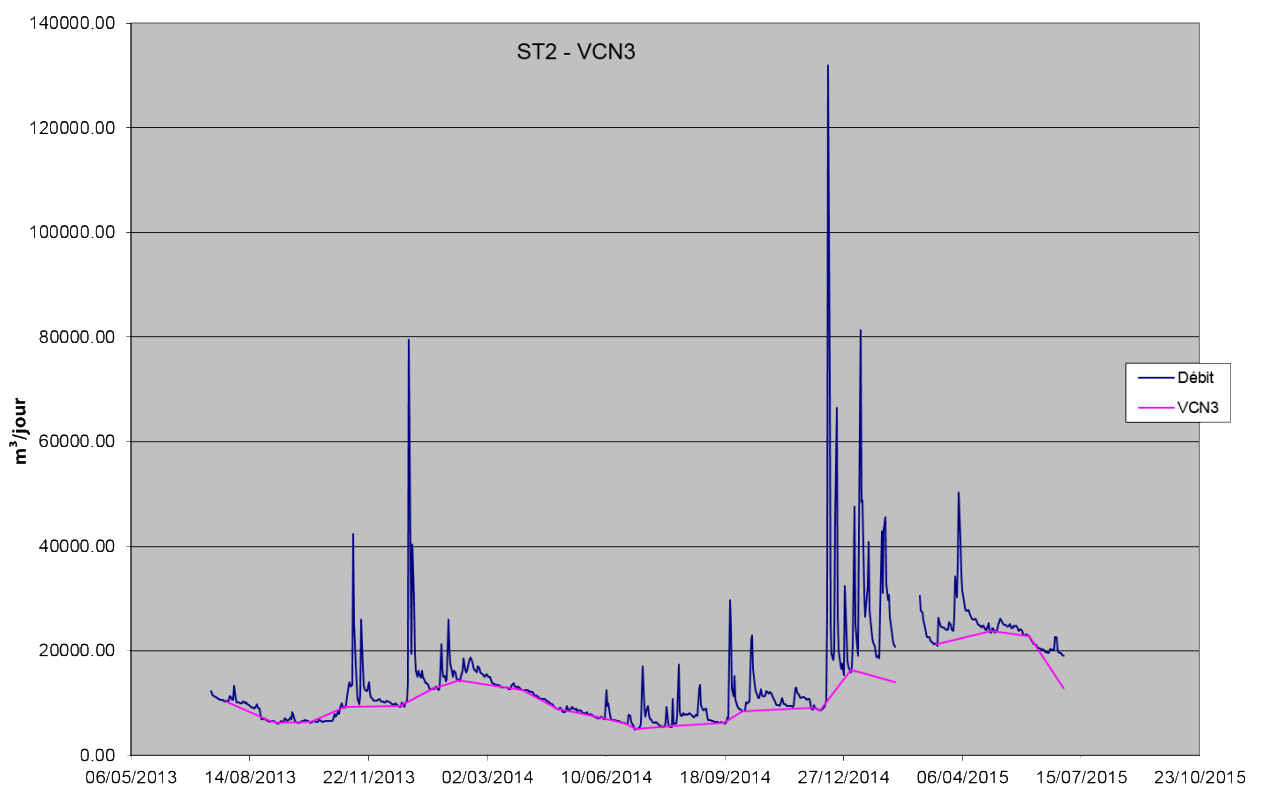
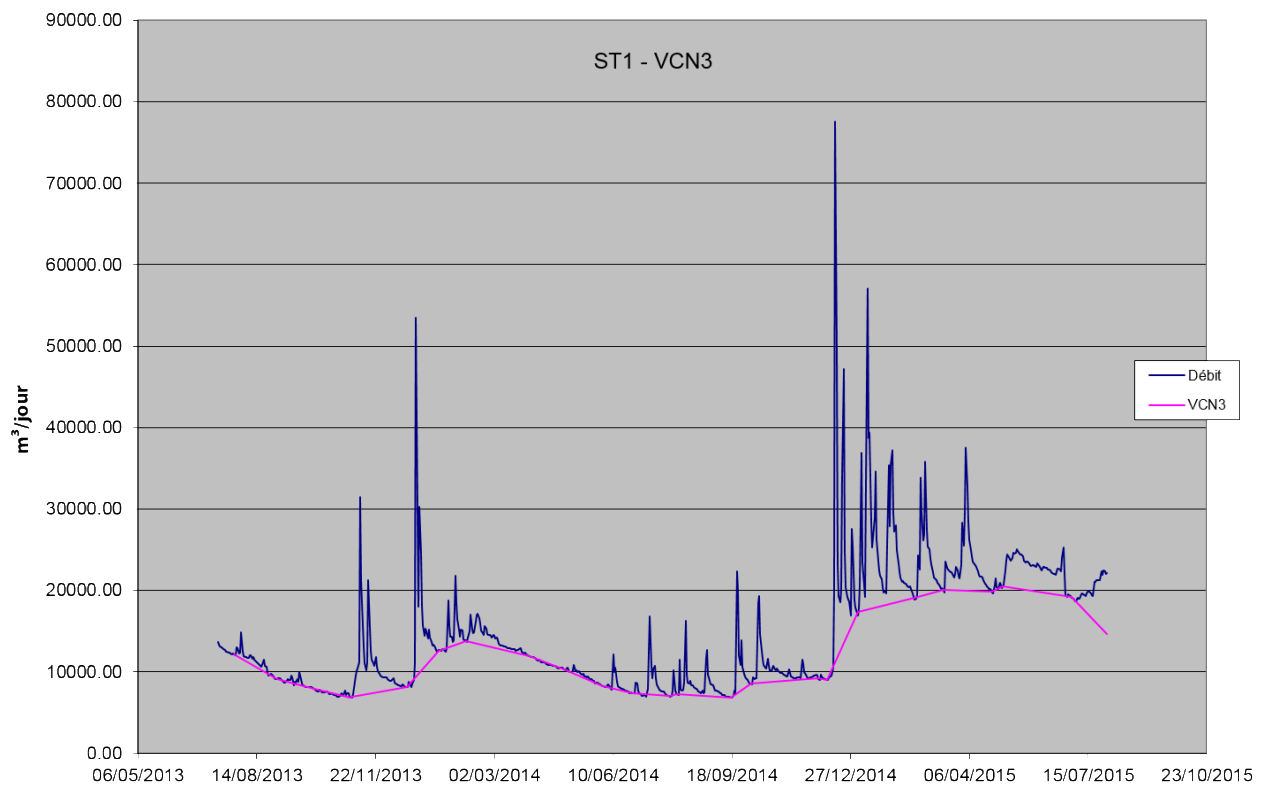
7.1.9. Station 9 : Ruisseau d'Havelange

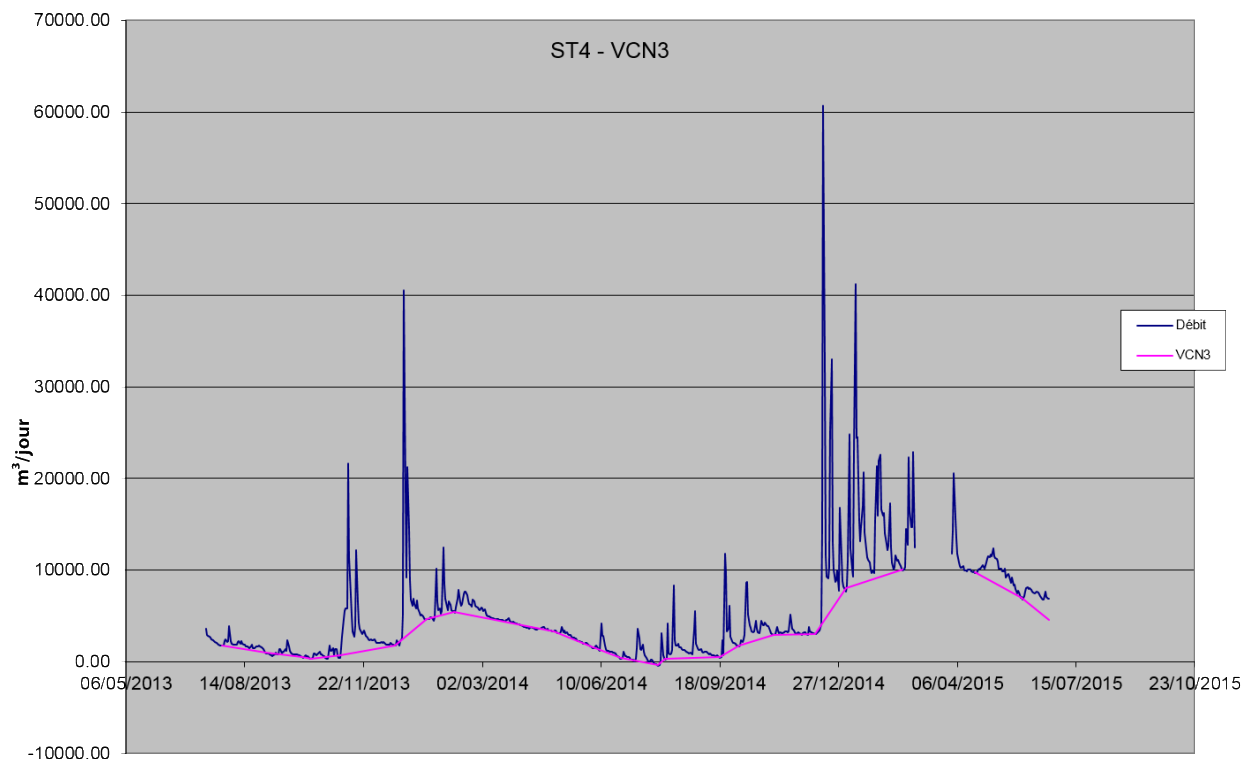
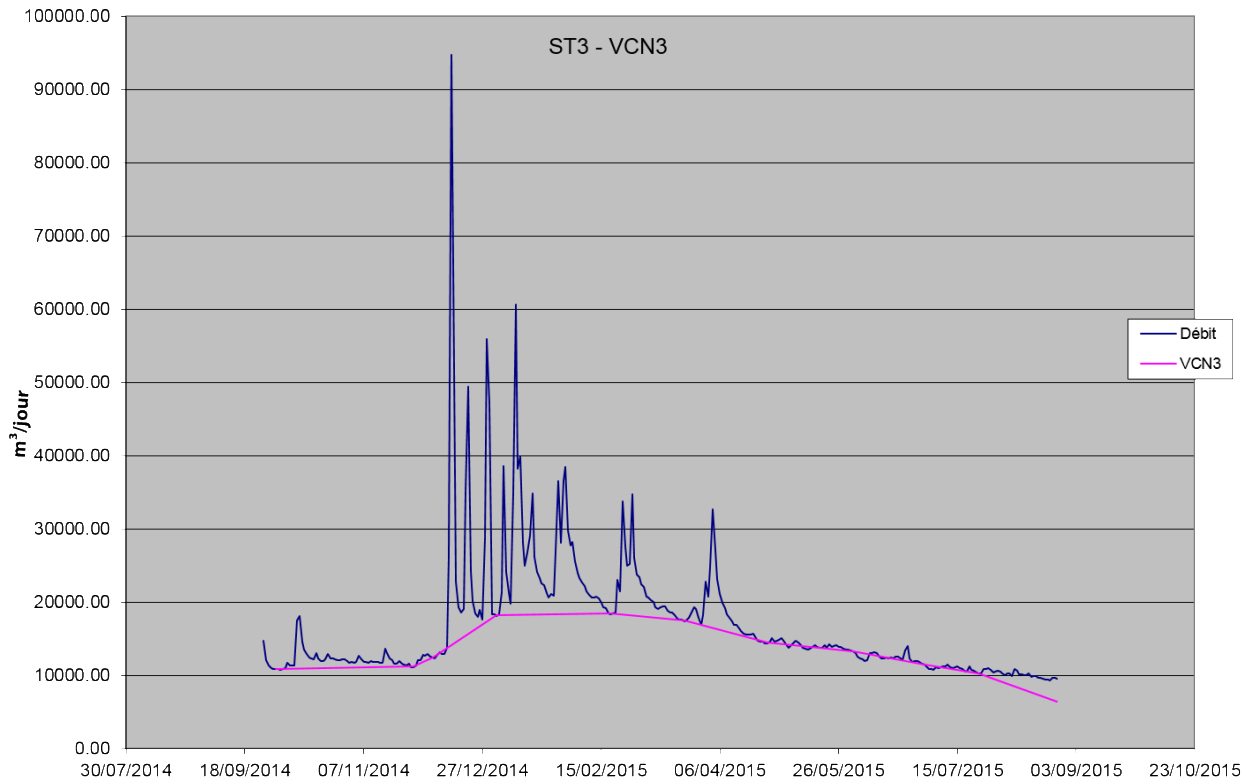
Nom:	ST6 - Torrent de Bonne		
Localisation:			
X	215581.685		
Y	127137.393		
BV	Torrent de Bonne		
ssB	/		
Type(s) de sonde:	Troll		
Autre équipement:			
Chronique limnimétrique:			
Début	11/07/2013		
Fin	03/03/2015		
Interruption			
Jaugeages:			
1er	28/05/2014		
Nombre	5		
Max jaugé	0.01 m ³ /s		
Hauteur en pleins bords	73.10 cm	Débit PB calculé	0.02 m ³ /s

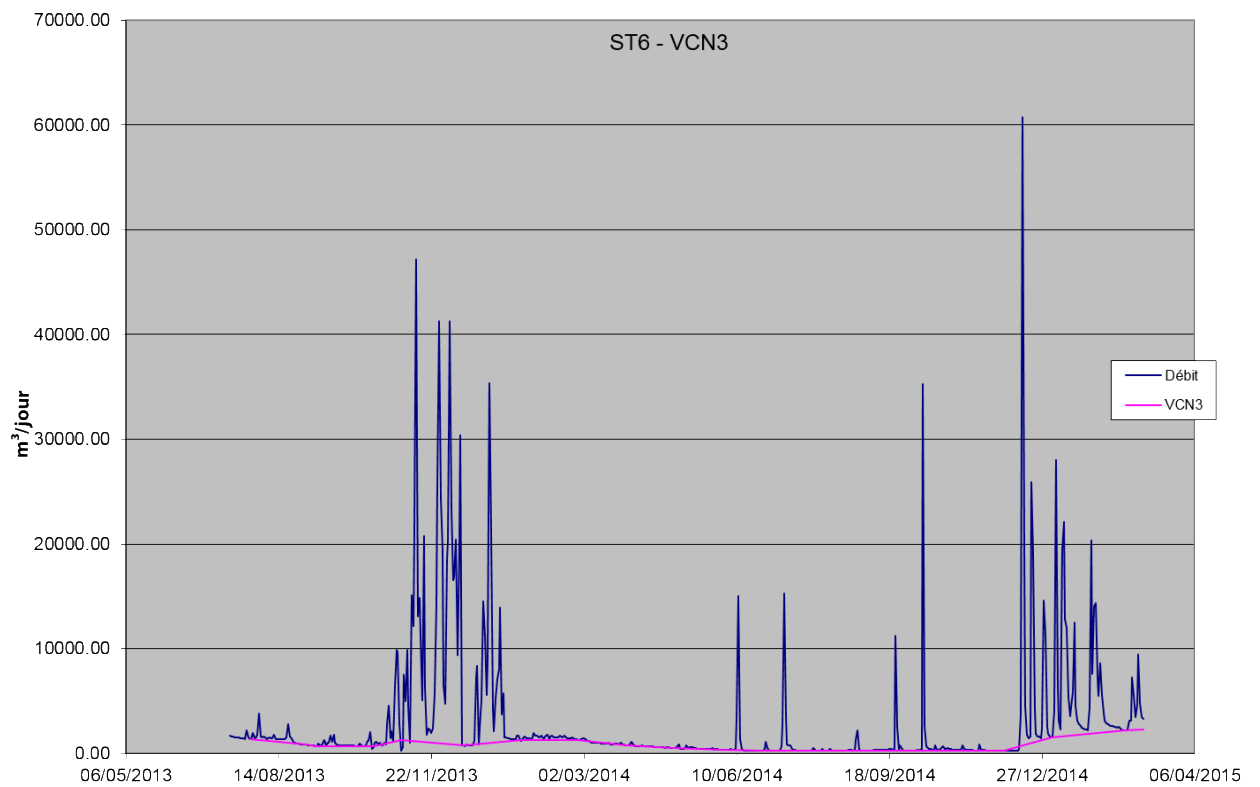
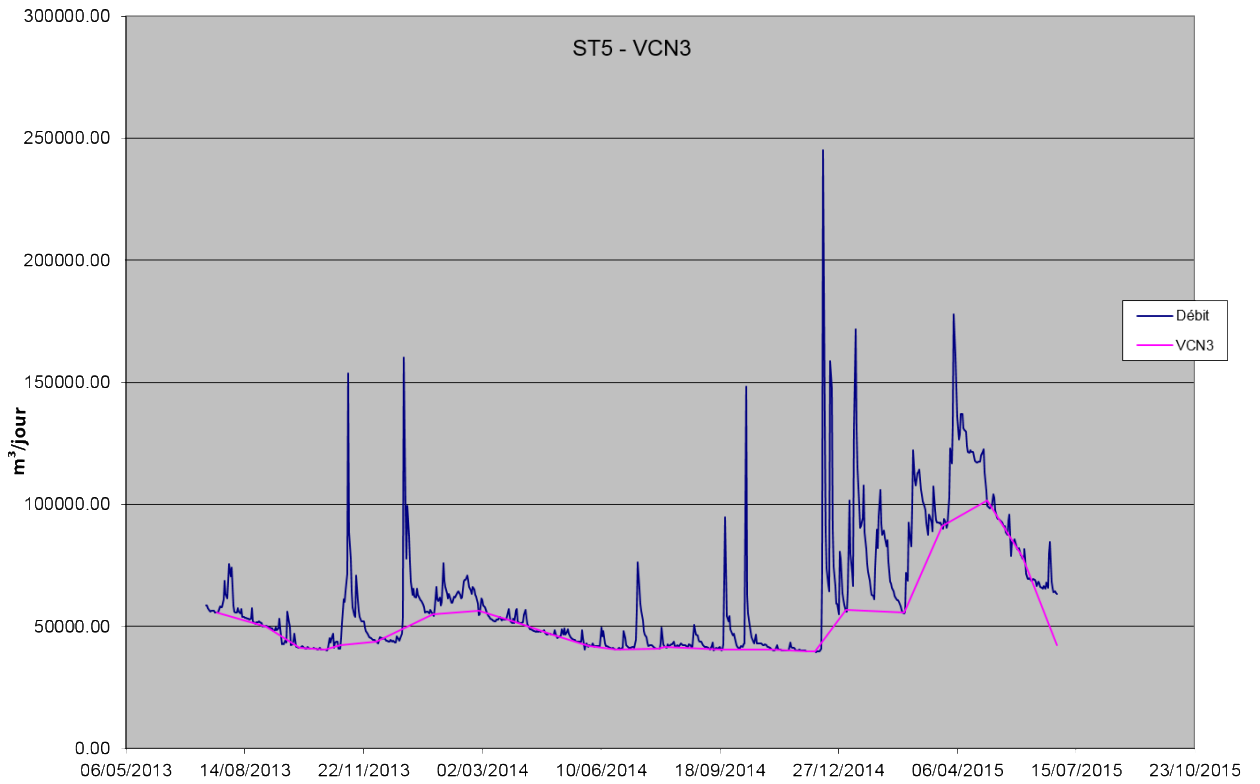
Courbe de tarage:

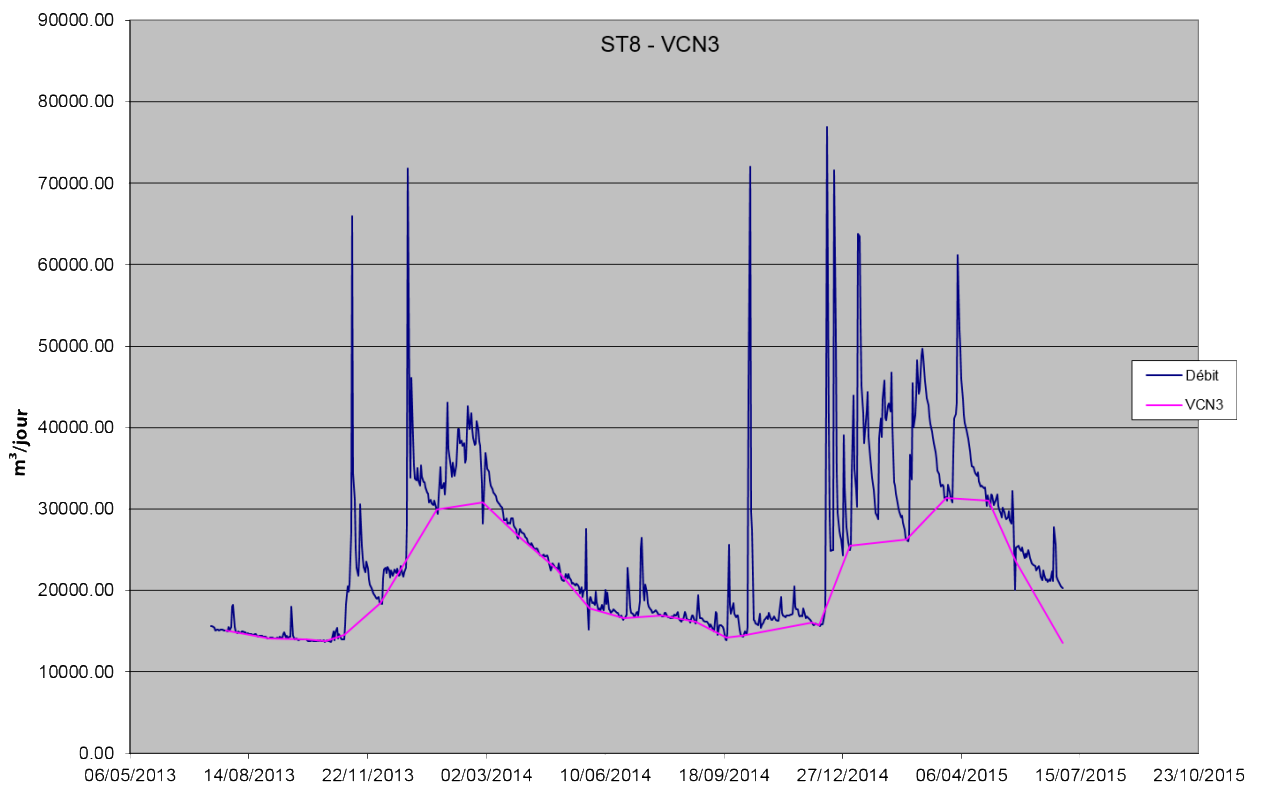
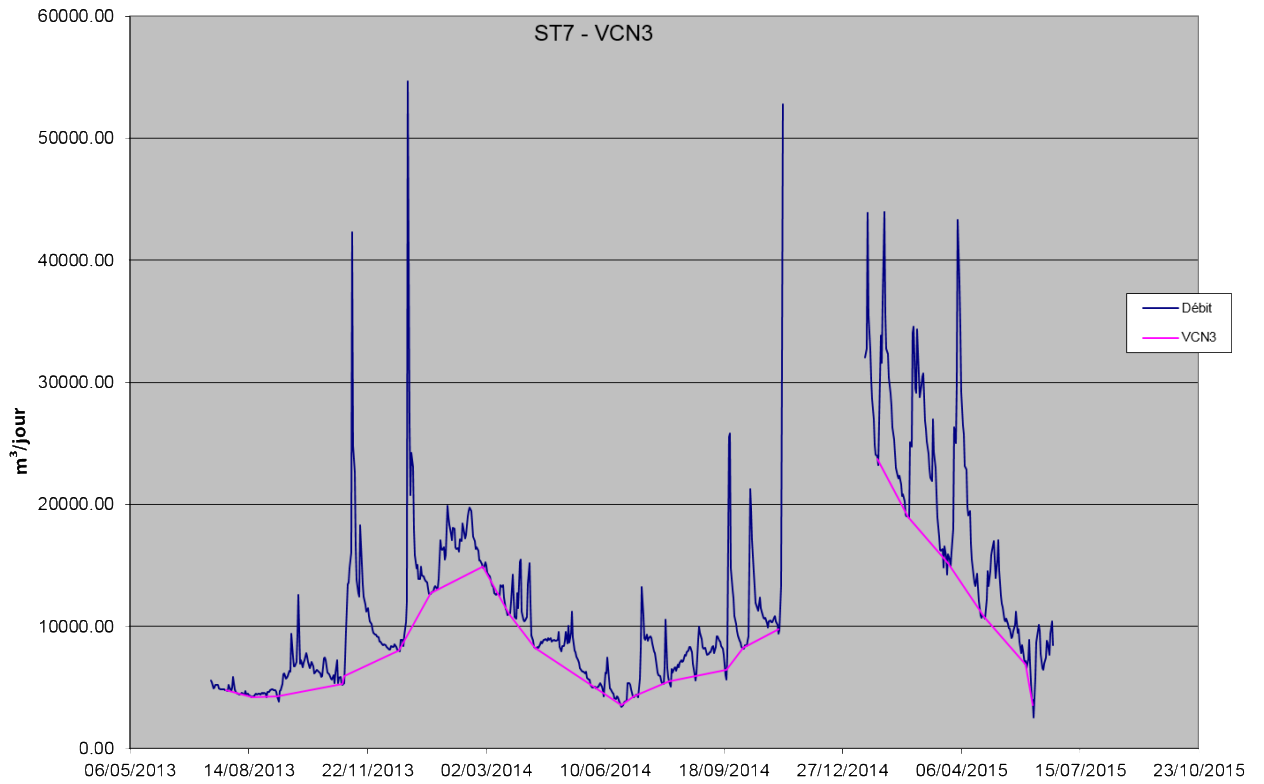


7.2. Résultats de la séparation d'hydrogramme par le VCN3





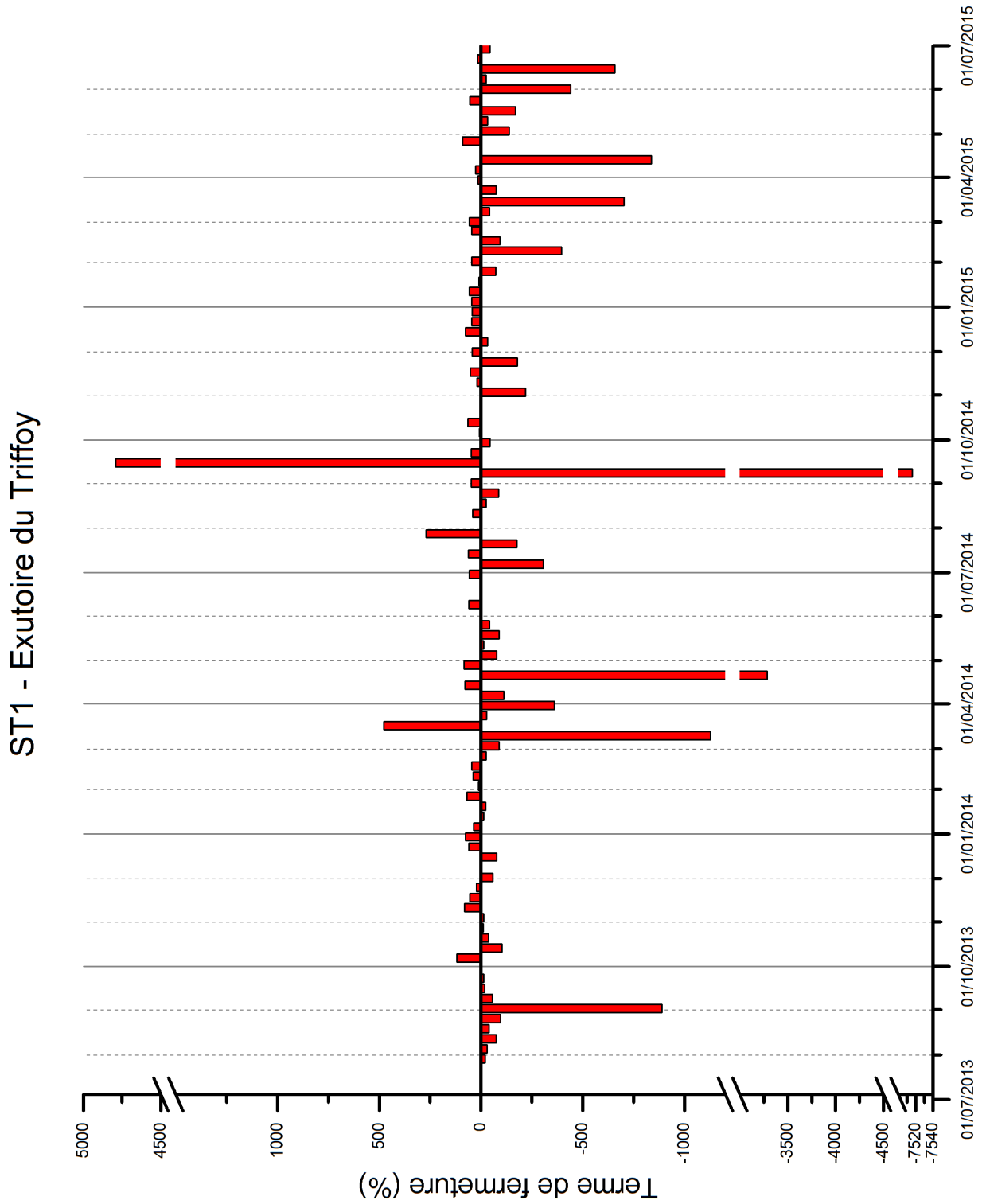




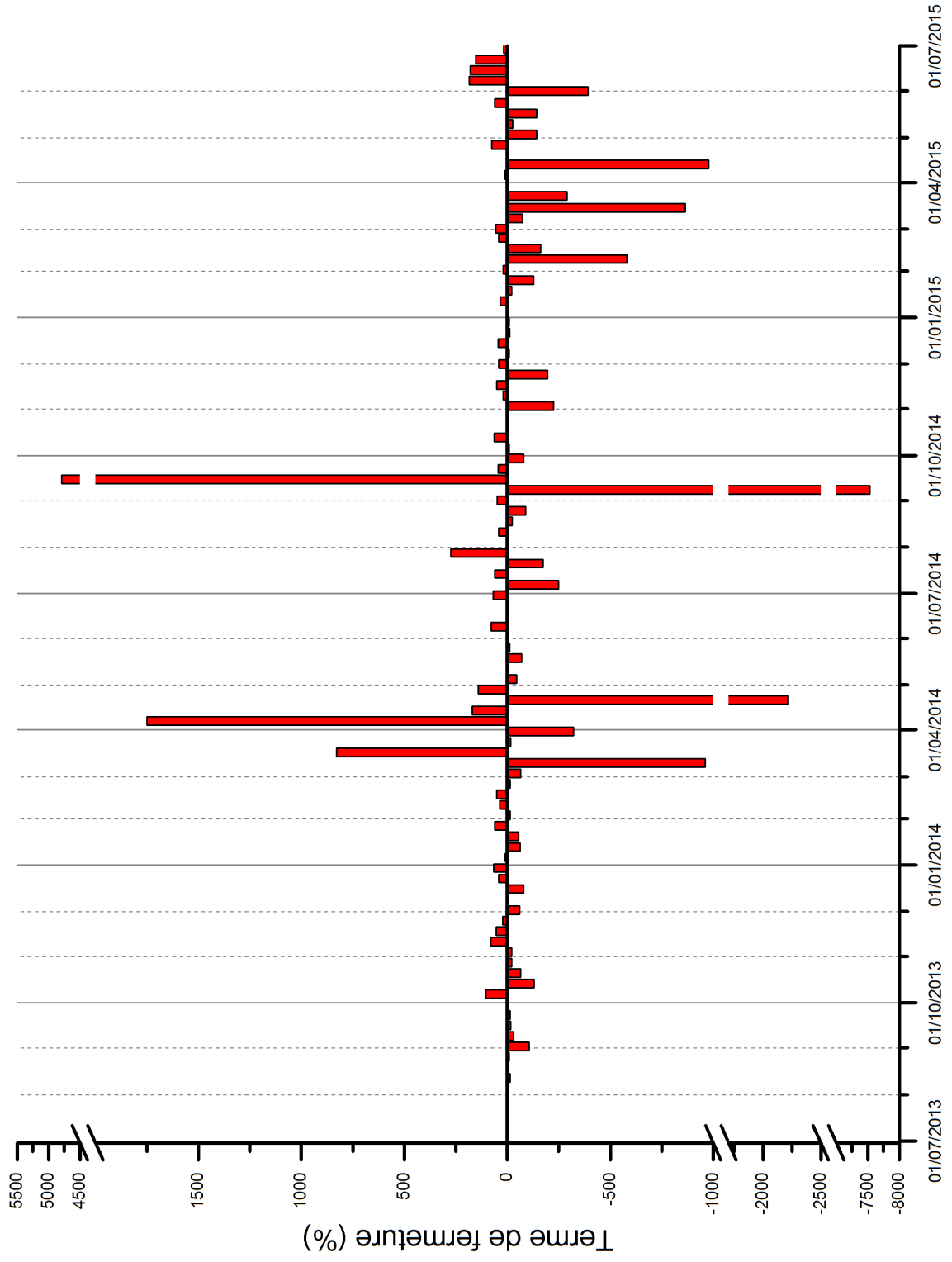
7.3. Résultats du calcul des coefficients α

Station	Date Qi	lnQi	Date Qf	lnQf	Nbre de jours	coefficient de tarissement α [j ⁻¹]
ST1	07/03/2014	9.495	24/06/2014	8.916	109	0.005
ST2	07/03/2014	9.528	25/06/2014	8.722	110	0.007
ST3	15/04/2015	9.659	22/08/2015	9.137	129	0.004
ST4	07/03/2014	8.511	31/05/2014	7.406	85	0.013
ST5	08/03/2014	10.883	01/06/2014	10.644	85	0.003
ST6	07/03/2014	6.958	23/06/2014	5.530	108	0.013
ST7	07/03/2014	9.492	23/06/2014	8.142	108	0.012
ST8	08/03/2014	10.369	18/05/2014	9.923	71	0.006

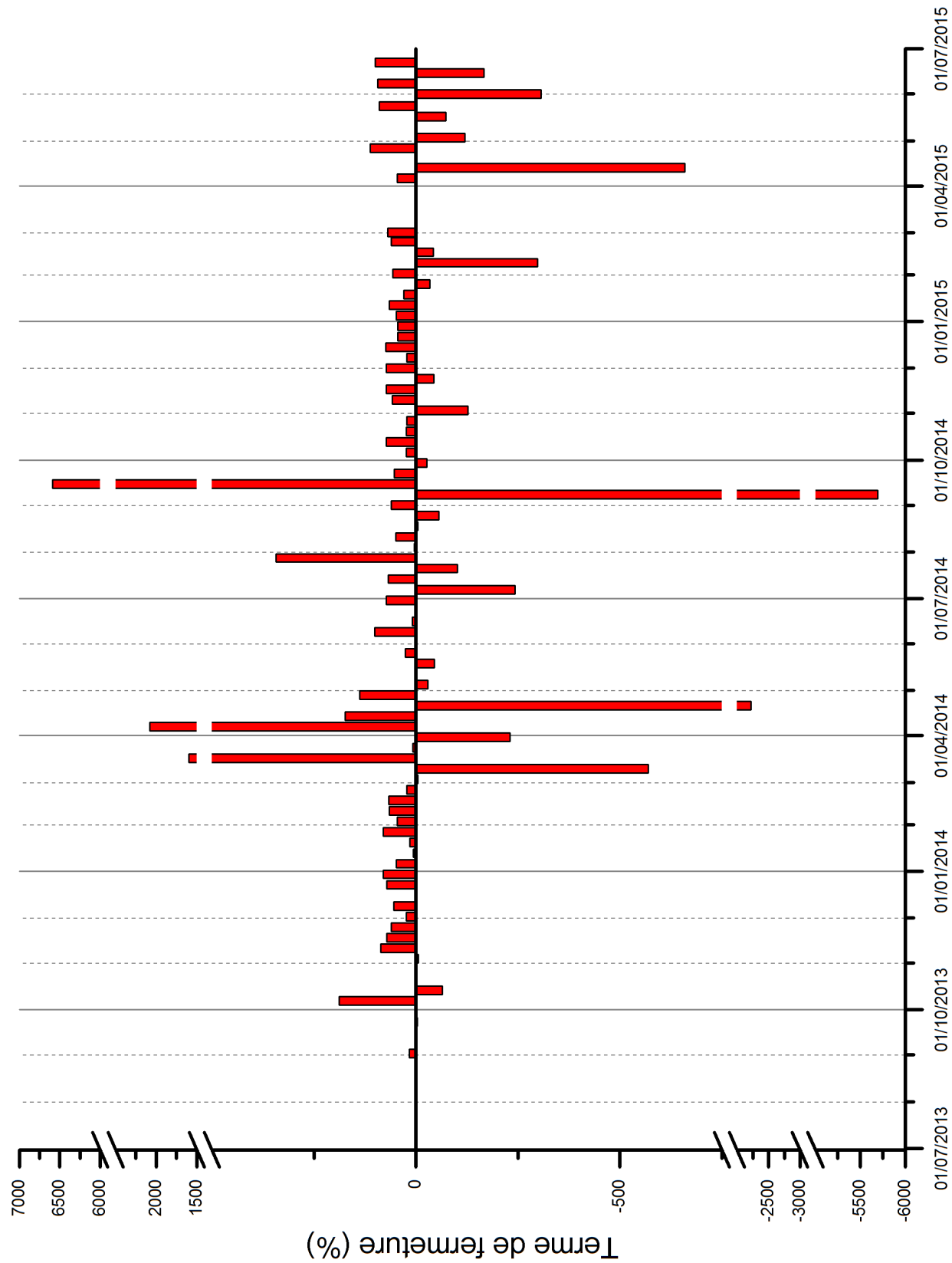
7.4. Résultats des bilans hydrogéologiques hebdomadaires



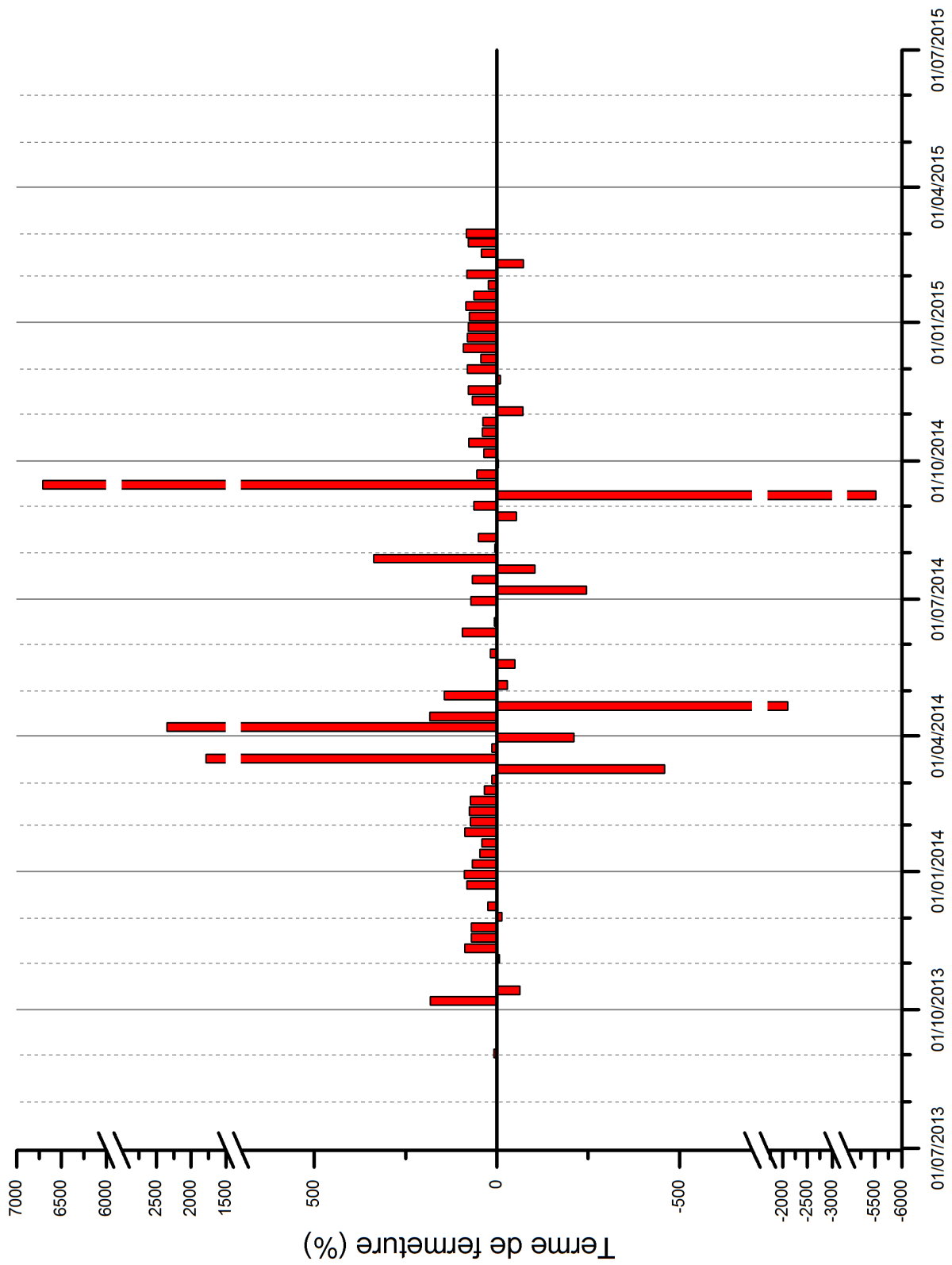
ST2 - Source de Marchin



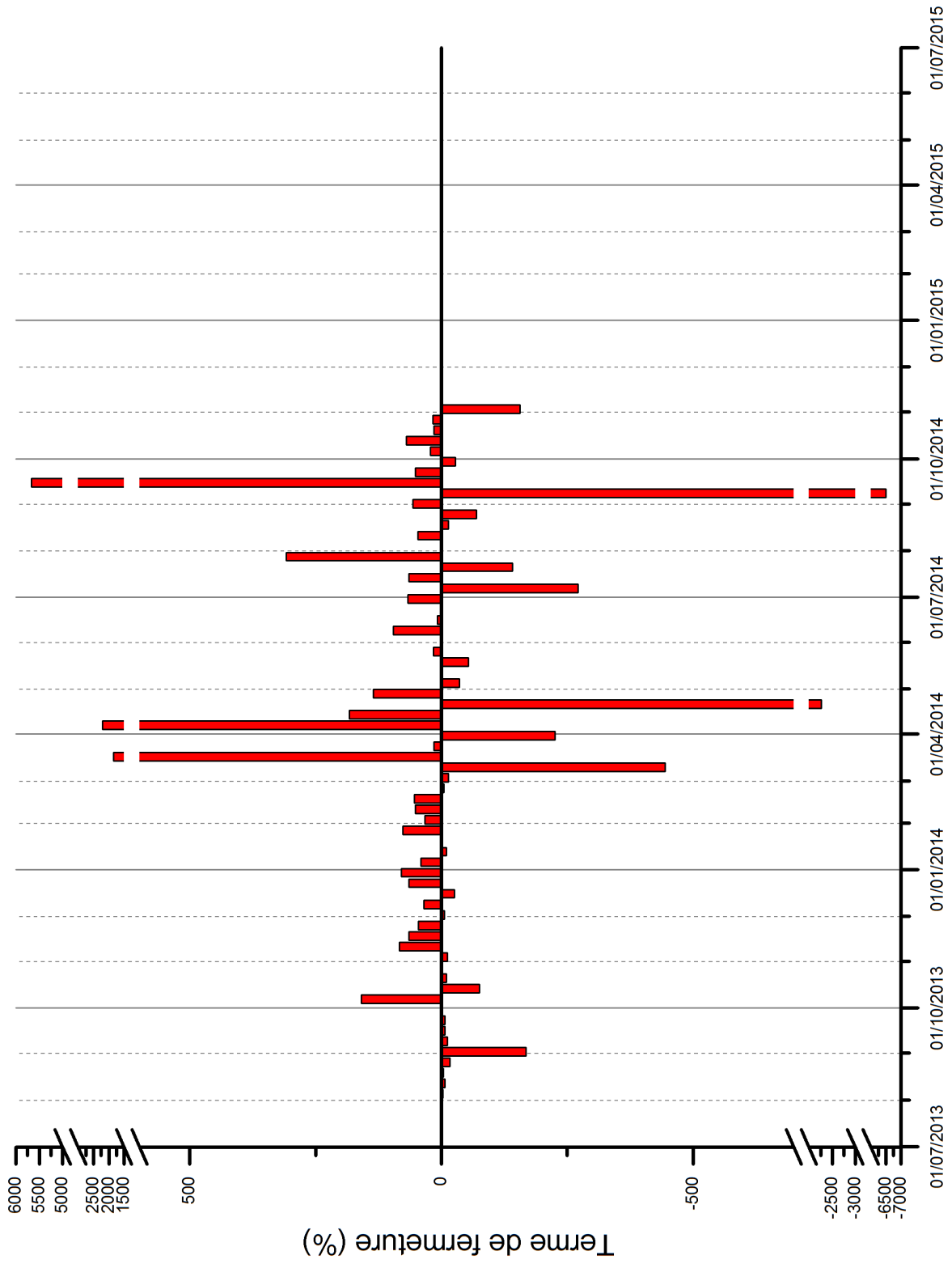
ST4 - Jamagne



ST6 - Torrent de Bonne



ST7 - Ruisseau de Pailhe



ST8 - Petit Avin

