



**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**

*D4.3 Amélioration du modèle mathématique développé pour la masse d'eau RWM021 dans le cadre de Synclin'EAU*

**Coordinateur du projet :**

Dr. ir. Serge Brouyère (HGE-ULg)

**Partenaires scientifiques :**

ULg-HGE : Dr. ir Philippe Orban, Pierre Briers, Thibault Willems

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 : Thibault Willems, Philippe Orban, Pierre Briers, Serge Brouyère

## Table des matières

1	Introduction .....	3
2	Rappels des activités de modélisation hydrogéologique de la masse d'eau souterraine RWM021 réalisées dans le projet Synclin'EAU .....	3
2.1	Outils de modélisation : la méthode HFEMC .....	4
2.2	Description succincte du modèle hydrogéologique de la masse d'eau RWM021 développé dans le cadre du projet synclin'Eau .....	5
2.3	Synthèse des résultats concernant le bassin du Hoyoux .....	7
3	Amélioration du modèle représentant le bassin du Hoyoux.....	10
3.1	Modèle conceptuel .....	11
3.1.1	Extension du modèle .....	11
3.1.2	Conditions aux frontières externes du modèle .....	12
3.1.3	Sollicitations appliquées au modèle .....	16
3.1.4	Division en sous-domaines et conditions aux frontières internes .....	19
3.1.5	Equations mathématiques choisies pour représenter les écoulements et le transport de solutés en milieu souterrain .....	21
3.1.6	Code de calcul utilisé .....	21
3.1.7	Discrétisation spatiale de la zone modélisée.....	21
3.1.8	Paramétrisation du modèle .....	22
3.2	Calibration du modèle d'écoulement en régime permanent .....	23
3.2.1	Observations utilisées pour la calibration du modèle d'écoulement.....	23
3.2.2	Calibration du modèle.....	25
3.3	Analyse des résultats du modèle d'écoulement en régime permanent.....	27
3.3.1	Distribution des hauteurs piézométriques calculées .....	27
3.3.2	Débits souterrains échangés au travers des frontières externes du modèle.....	28
3.3.3	Débits d'eau souterraine échangés entre sous-domaines du modèle .....	30
3.3.4	Echanges nappes-rivières.....	30
4	Conclusion.....	34
5	Bibliographie .....	36
6	Annexe .....	37

# 1 Introduction

Le projet ESO-ESU vise à acquérir les données et bases scientifiques permettant de statuer sur le caractère à risque et l'état des masses d'eau souterraine et de surface définies dans le cadre de la DCE, ainsi que d'estimer la ressource en eau souterraine qui alimente l'eau de surface en période d'étiage. Dans ce contexte, l'objectif de l'activité "modélisation hydrogéologique" est de développer un outil d'évaluation et de prédiction robuste de l'état quantitatif et qualitatif des eaux souterraines tenant compte des connaissances acquises dans les tâches connexes de la convention et capable de représenter les interactions entre les eaux souterraines (ESO) et les eaux de surface (ESU).

La tâche de modélisation telle qu'initialement prévue consistait à adapter et améliorer, sur base des résultats nouvellement acquis le modèle hydrogéologique développé pour la masse d'eau souterraine RWM021 dans le cadre du projet Synclin'Eau. Les travaux du projet ESO-ESU ayant principalement porté sur le bassin du Hoyoux, il a été choisi par le Comité d'Accompagnement du projet d'également focaliser les travaux de modélisation sur ce bassin. Ce modèle adapté permet d'intégrer les données nouvellement acquises, notamment sur les mécanismes de transfert d'eau et de soluté dans la zone non saturée (Délivrable D3.2), de transfert d'eau et de soluté dans la nappe (transfert rapide dans les couches superficielles de calcaires altérés, transfert plus lent dans les couches plus profondes, Délivrable D3.5) et les interactions nappe-rivières (localisation plus précise des zones d'échanges, définition du sens des échanges et quantification des flux échangés, Délivrable D3.5).

Après un bref rappel des activités de modélisations menées dans le cadre du projet Synclin'EAU, ce rapport présente les choix conceptuels effectués lors de la construction du modèle hydrogéologique développé dans le cadre du projet ESO-ESU ainsi que les travaux de calibration réalisés en régime permanent.

## 2 Rappels des activités de modélisation hydrogéologique de la masse d'eau souterraine RWM021 réalisées dans le projet Synclin'EAU

Lors du projet Synclin'EAU<sup>1</sup>, trois modèles hydrogéologiques simulant les écoulements et le transport de solutés en milieux souterrains ont été développés pour les masses d'eau souterraine RWM-011, -012 et -021 (Lorenzini et al., 2008a et 2008b; Leroy et al., 2010a et 2010b). Ces modèles, développés à une échelle régionale, avaient pour principal objectif de représenter les grandes tendances en termes d'écoulement souterrain, de transferts d'eau entre les sous-bassins versants et d'évaluation des concentrations en nitrates à l'échelle de la masse d'eau souterraine. Les caractéristiques majeures du modèle développé pour la masse d'eau souterraine RWM021 au sein de laquelle se situe le bassin du Hoyoux et les principaux résultats pour ce bassin sont présentés dans ce chapitre.

---

<sup>1</sup> Caractérisation hydrogéologique et support à la mise en œuvre de la Directive Européenne 2000/60 sur les masses d'eau souterraine en Région Wallonne, Convention RW et SPGE – AQUAPOLE

## 2.1 Outils de modélisation : la méthode HFEMC

La méthodologie suivie pour la modélisation hydrogéologique à l'échelle régionale des trois masses d'eau souterraine RWM-011, -012 et -021 est l'approche de modélisation régionale « HFEMC ». Cette méthode a été testée, développée et validée par l'équipe d'Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement de l'ULg notamment dans le cadre des projets PIRENE (Brouyère et al., 2004), AquaTerra (Orban et al., 2010) et Synclin'Eau. Cette méthode permet de s'adapter à la variabilité des données disponibles, au degré de caractérisation et aux différentes conditions hydrogéologiques rencontrées à l'échelle régionale de la masse d'eau. Basée sur le formalisme "éléments finis" (EF), l'approche de modélisation permet l'utilisation couplée d'expressions mathématiques de complexité variable pour représenter les écoulements souterrains et le transport de soluté.

En pratique, l'application de la méthode de modélisation est basée sur la division d'un maillage global en plusieurs sous-domaines (Figure 1). Dans chacun de ces sous-domaines, des équations mathématiques différentes peuvent être sélectionnées pour représenter les écoulements souterrains et le transport de solutés. Le couplage entre sous-domaines est réalisé par l'imposition, au niveau de l'interface qui sépare deux sous-domaines, de conditions aux frontières internes. Cette méthodologie permet le calcul des flux d'eau échangés entre sous-domaines et de bilans par sous-domaine.

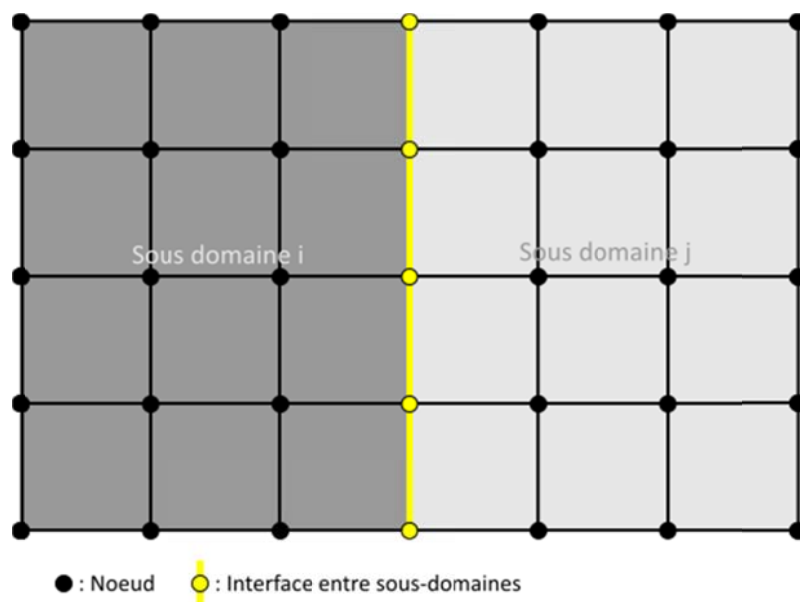


Figure 1 : Représentation 2D d'un maillage EF divisé en deux sous-domaines.

Trois types d'équations (Brouyère et al., 2009) peuvent être utilisées pour représenter les écoulements souterrains ou le transport de solutés (Tableau 1). Elles sont implémentées et résolues au sein du code éléments finis avec volumes de contrôle SUFT3D (Carabin et Dassargues, 1999 ; Brouyère, 2001). Le modèle basé sur le réservoir linéaire simple résume le comportement d'un sous-domaine en une seule variable représentative de son état moyen. Le réservoir linéaire distribué admet quant à lui une complexité intermédiaire entre le réservoir linéaire simple et le modèle complet d'écoulement et de transport en milieu poreux. Par ailleurs, il faut signaler que l'utilisation d'un modèle mathématique simplifié pour le calcul des écoulements souterrains entraîne

obligatoirement l'utilisation d'un modèle de complexité égale ou inférieure pour le calcul du transport.

Tableau 1 : Modèles mathématiques disponibles pour la représentation des écoulements souterrains et du transport de solutés en milieu souterrain variablement saturé en eau.

		Transport		
		Réservoir linéaire simple	Réservoirs distribués	Advection - dispersion
Ecoulement	Réservoir linéaire simple	✓	-	-
	Réservoir linéaire distribué	✓	✓	-
	Ecoulement en milieu poreux	✓	✓	✓

Les échanges d'eau entre sous-domaines adjacents peuvent être représentés par trois types de condition aux frontières internes :

1. par une condition de Dirichlet, qui assure une continuité des hauteurs piézométriques (ou des concentrations) de part et d'autre de l'interface. Ce type de conditions frontières permet de diviser la zone d'études en sous-domaines entre lesquels existe une continuité hydrogéologique et d'y calculer des bilans en eau.
2. par une condition de flux nul, qui assure qu'aucun flux d'eau ou de soluté ne s'écoule au travers de l'interface.
3. par une condition de Fourier, qui suppose que le flux d'eau (ou de soluté) échangé au travers de l'interface est fonction, selon une fonction de transfert du premier ordre, de la différence de hauteur piézométrique existant entre les deux côtés de l'interface. Ce type de condition frontière interne peut notamment être utilisé pour représenter implicitement des formations aquicludes de faibles épaisseurs, réduisant le nombre d'inconnue et évitant la présence d'éléments géométriquement distordus au sein du maillage EF.

Les conditions de Dirichlet et de Fourier sont dites "dynamiques" car les hauteurs piézométriques (ou les concentrations) le long d'une interface ne sont pas fixées mais demeurent des inconnues du problème, qui peuvent varier dans le temps.

## 2.2 Description succincte du modèle hydrogéologique de la masse d'eau RWM021 développé dans le cadre du projet synclin'Eau

Durant le projet Synclin'Eau, l'extension latérale des modèles hydrogéologiques a été établie en fonction des limites géographiques des masses d'eau souterraine étudiées et de leur cadre hydrogéologique. Afin de faire correspondre les limites externes des modèles à des limites naturelles au travers desquelles le flux d'eau souterraine qui s'écoule peu être négligé, les limites des modèles ont été modifiées localement par rapport aux limites des masses d'eau correspondantes. Pour la masse d'eau RWM021, la frontière sud du modèle a ainsi été déplacée pour être localisée au sein de

l'unité hydrogéologique peu perméable de l'aquiclude du Famennien-Frasnien (Figure 2). Les frontières nord du modèle ont pour leur part été ajustées pour suivre le tracé des limites de bassins versants au sein des formations géologiques peu perméables. La frontière est du modèle n'a pas pu être reportée sur une limite naturelle à flux nul. Les sections recoupant les aquifères du Famennien et du Givetien ont donc été représentées par une condition aux frontières de Fourier.

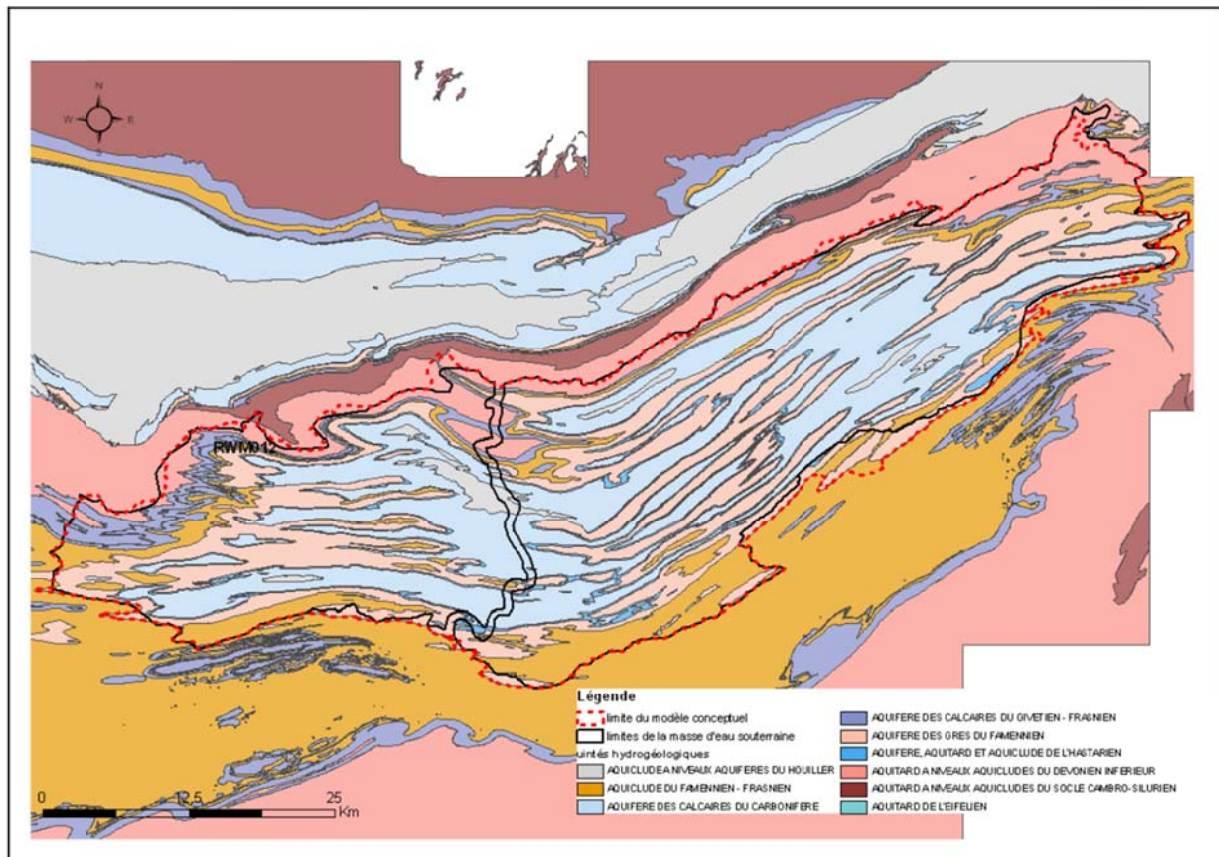


Figure 2 : Carte montrant les limites du modèle (pointillés), et les limites de la masse d'eau souterraine RWM021 (trait plein) telles que considérées dans le projet Synclin'EAU (Lorenzini et al, 2008b)

En l'absence d'informations détaillées, l'extension verticale du modèle a été fixée de manière à assurer une épaisseur constante de la zone saturée de 50 m. La surface supérieure du modèle a été fixée sur base du MNT de 150 m de résolution. La zone modélisée a été divisée en plusieurs sous-domaines afin de permettre à la fois la représentation, implicites via des conditions frontières internes, d'unités peu perméables et peu épaisses, comme les schistes du Pont d'Arcole situés à la base des calcaires du Carbonifère, et le calcul des flux souterrains échangés entre bassins versants.

Pour la masse d'eau RWM021, comme pour les deux autres masses d'eau souterraine considérées dans le projet Synclin'EAU, les écoulements souterrains ont été représentés par l'équation décrivant les écoulements en milieux poreux variablement saturés en eau. Le modèle de transport de solutés retenu pour l'échelle régionale des masses d'eau était le modèle simplifié de réservoirs distribués. Concernant les conditions aux frontières internes entre sous-domaines, la condition de Dirichlet a été utilisée pour représenter les interfaces entre sous-domaines situées au sein d'une même unité hydrogéologique, où la continuité du champ d'écoulement peut être supposée. A l'inverse, les

frontières internes situées le long de limites entre unités hydrogéologiques différentes ont été modélisées par une condition de Fourier, afin de reproduire une discontinuité dans le champ d'écoulement.

Vu l'extension spatiale importante de la zone modélisée et la nécessité de limiter les temps de calcul, des mailles de taille grossière (environ 500 m de côté) ont été utilisées. Verticalement, le maillage du modèle de la masse d'eau RWM021 est composé d'une seule couche d'éléments.

Les résultats produits par les modèles des 3 masses souterraines étudiées ont démontré la capacité de l'approche adoptée à produire des informations fiables à l'échelle régionale (Leroy 2010a) concernant des aspects quantitatifs :

- évolution spatiale et temporelle de la piézométrie et donc de la ressource en ESO;
- variation du débit de base alimentant les ESU;
- estimation des flux d'eau échangés via le milieu souterrain entre bassins versants adjacents;

et qualitatifs :

- tendance temporelle de l'évolution des concentrations en nitrates dans les eaux souterraines à l'échelle régionale.

### **2.3 Synthèse des résultats concernant le bassin du Hoyoux**

En addition des résultats précédents, des travaux supplémentaires de valorisation des modèles des masses d'eau RWM011 et RWM021 ont été menés (Leroy 2010b). Une attention particulière a été portée à la spatialisation des flux d'eau échangés à la fois entre sous-bassins et entre la nappe et le réseau hydrographique de surface. Dans la masse d'eau RWM021, le bassin du Hoyoux, sur lequel se concentrent les investigations effectuées dans le cadre du projet ESO-ESU, a fait l'objet de travaux approfondis. Du point de vue de la piézométrie, les résultats obtenus en régime permanent, pour des sollicitations moyennes correspondant à l'année 2006, ont montré des comportements piézométriques contrastés entre les bandes calcaires, où la conductivité hydraulique est assez élevée et où le gradient hydraulique est faible, et les bandes gréseuses où la conductivité hydraulique est plus faible et le gradient hydraulique plus important (Figure 3).



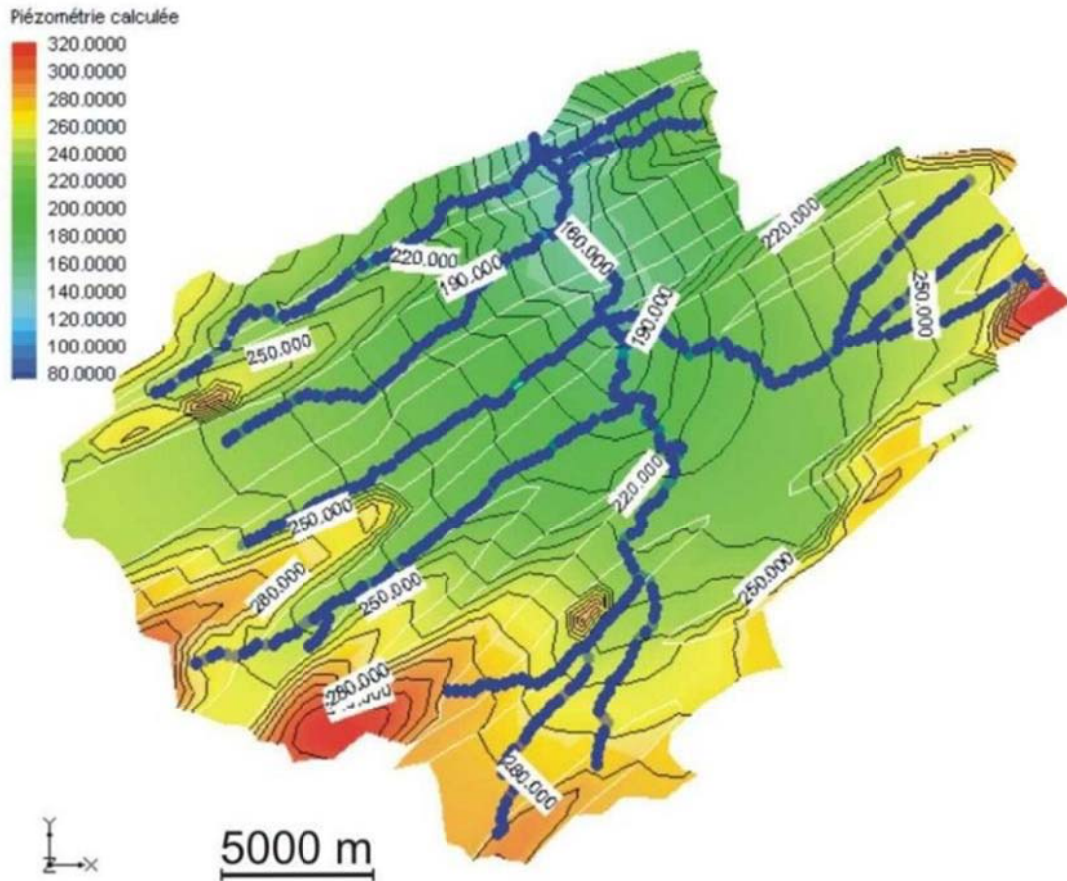


Figure 3 : Piézométrie détaillée du bassin du Hoyoux calculée par le modèle Synclin'EAU de la masse d'eau RWM021, en régime permanent correspondant aux sollicitations moyennes de l'année 2006 (Leroy, 2010b)

Concernant les échanges d'eau entre le bassin hydrologique du Hoyoux et les bassins versants adjacents, le modèle Synclin'EAU calcule un apport net non négligeable de  $0,112 \text{ m}^3/\text{s}$  sur la totalité des frontières du bassin (Figure 4). Les plus importants transferts d'eau souterraine sont observés au niveau des synclinaux calcaires, avec les entrées les plus significatives au niveau des deux synclinaux calcaires au nord est du bassin (contribution de  $0,0314 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $0,0544 \text{ m}^3/\text{s}$ ).



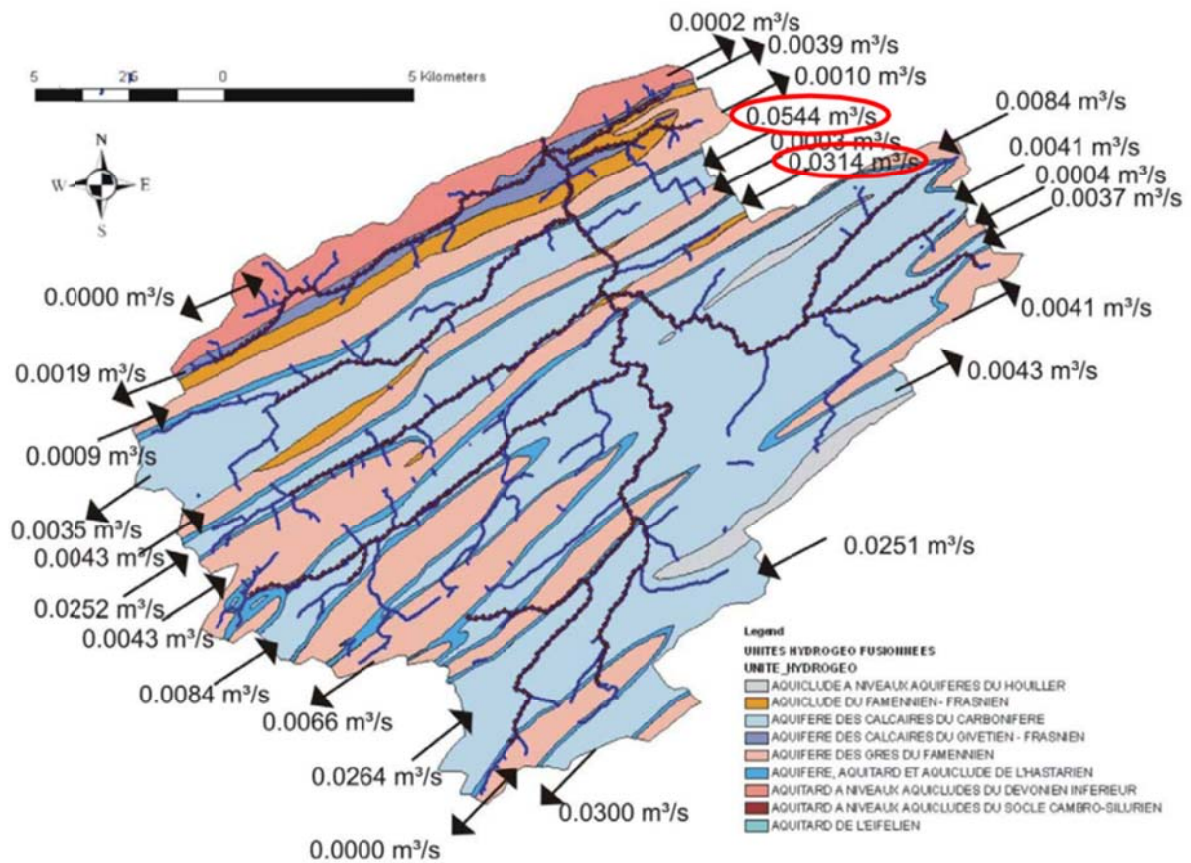


Figure 4 : Flux d'eaux souterraines échangés entre le bassin hydrologique du Hoyoux et ceux qui l'entourent, calculés en régime permanent correspondant aux sollicitations moyennes de l'année 2006 (Leroy, 2010b)

Le sens et l'intensité des échanges nappes-rivières ont également été évalués par le modèle Synclin'EAU (Figure 5). Toutefois, au vu de l'échelle régionale du modèle et de la taille importante des mailles utilisées, les détails locaux du tracé des rivières n'ont pu être représentés dans le modèle. En outre, du fait de la grande sensibilité des flux échangés entre les eaux souterraines et les rivières à la piézométrie locale, les résultats illustrés sur la Figure 5 sont fortement dépendants à la qualité de la calibration. Cette dernière ayant été effectuée à l'échelle de la masse d'eau RWM021, il se peut que le sens des échanges et les débits échangés entre les nappes et les rivières calculés soient peu précis sur certaines portions de rivières.

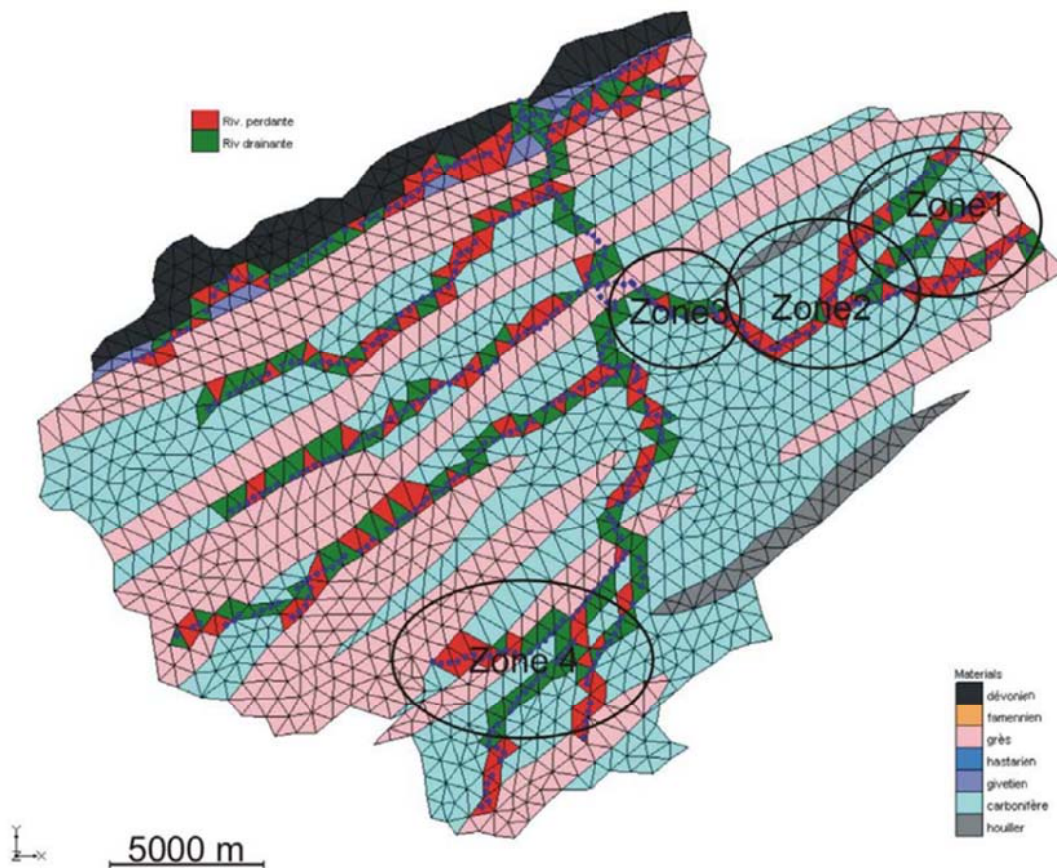


Figure 5 : Visualisation maille par maille des interactions ESO-ESU dans le bassin du Hoyoux calculées par le modèle Synclin'EAU, en régime permanent correspondant aux sollicitations moyennes de l'année 2006 (Leroy, 2010b)

### 3 Amélioration du modèle représentant le bassin du Hoyoux

Les investigations réalisées dans le cadre du projet ESO-ESU apportent de nouvelles connaissances sur les mécanismes de transfert d'eau et de soluté dans les aquifères calcaires. Elles ont également permis d'affiner la caractérisation des interactions entre les nappes aquifères et les cours d'eau du bassin du Hoyoux. Afin d'intégrer ces nouvelles connaissances dans l'outil de modélisation simulant les écoulements des eaux souterraines et de transport de solutés dans le bassin du Hoyoux, diverses améliorations ont été apportées au modèle développé lors du projet Synclin'EAU. Les principales modifications apportées au modèle ESO-ESU développé pour le bassin du Hoyoux sont résumées ci-dessous :

- afin de permettre une représentation plus précise du tracé des rivières et des interactions nappes-rivières, une discrétisation plus fine de la zone modélisée est réalisée notamment autour des tronçons de rivière ayant fait l'objet d'une caractérisation poussée pendant le projet ESO-ESU.
- afin de représenter de manière plus détaillée les transferts d'eau et de soluté dans la zone non-saturée et/ou altérée, le modèle intègre les variations verticales des propriétés hydrogéologiques.

- la zone modélisée est divisée en sous-domaines en tenant compte à la fois du contexte hydrogéologique et des différents sous-bassins versants présents dans le bassin du Hoyoux, pour obtenir un calcul des bilans hydrogéologiques par sous-bassin.

Les différentes améliorations sont expliquées plus en détails dans la description du modèle conceptuel du modèle ESO-ESU.

### 3.1 Modèle conceptuel

#### 3.1.1 Extension du modèle

L'extension géographique de la zone modélisée dans la suite des travaux est principalement basée sur la délimitation du bassin hydrologique du Hoyoux, plus précisément sur la partie comprise dans la masse d'eau RWM021 (Figure 6). Toutefois, au vu des résultats obtenus lors du projet Synclin'EAU et de la configuration géologique locale, il a été décidé d'étendre la zone modélisée en y incluant la partie amont du bassin versant du Ruisseau d'Oxhe (MV12R). De cette manière, l'extrémité NE des synclinaux calcaires présents en rive droite du Hoyoux, par lesquels des flux significatifs sont supposés entrer dans le bassin du Hoyoux, est complètement intégrée au modèle. Ce choix permettra d'attribuer des conditions aux frontières plus naturelles dans cette zone.

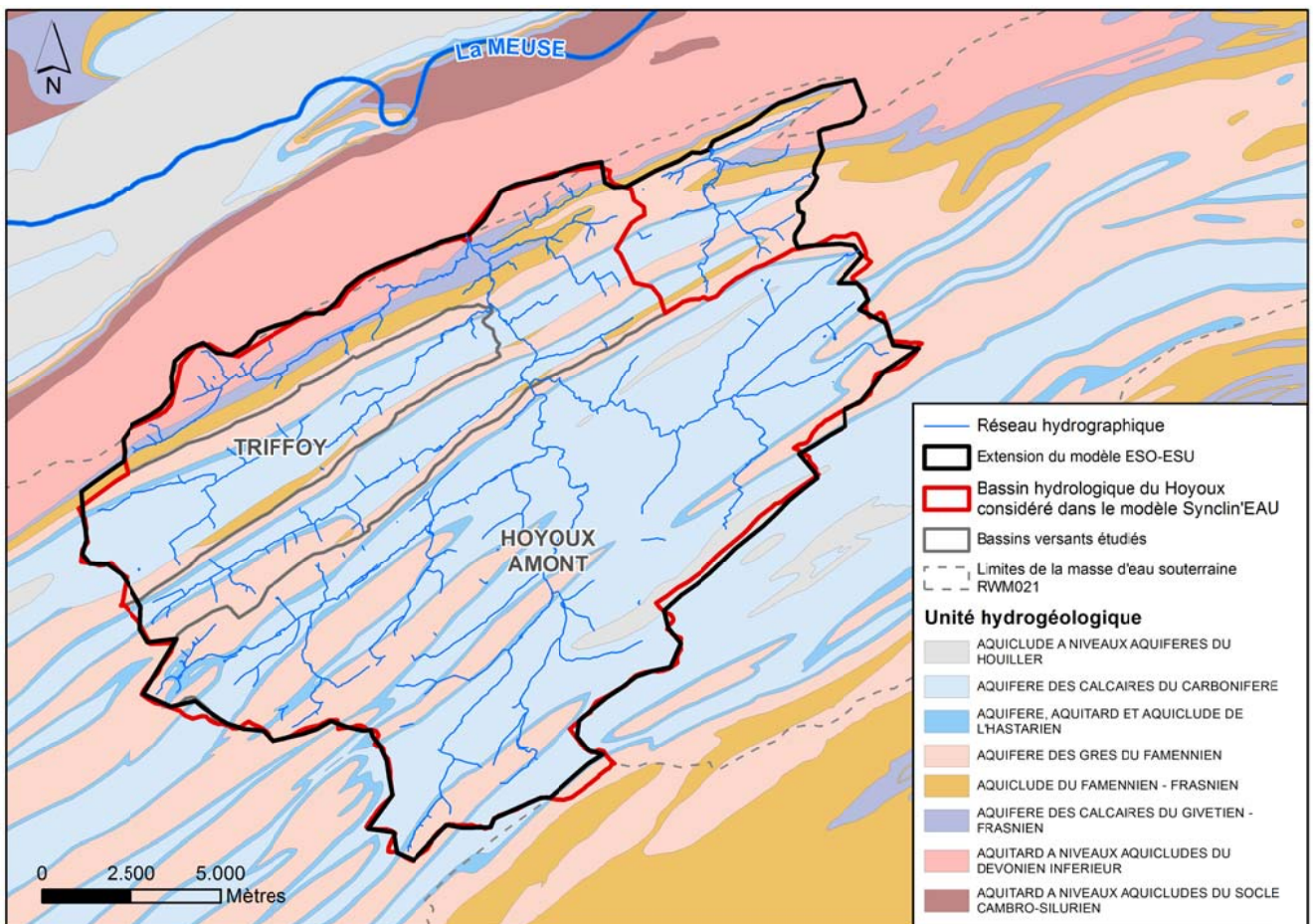


Figure 6 : Extension de la zone modélisée dans le projet ESO-ESU et comparaison avec le bassin versant du Hoyoux tel que considéré dans le projet Synclin'EAU et les sous-bassins versants ayant fait l'objet d'études de caractérisation lors du projet ESO-ESU.



Verticalement, le modèle s'étend de la surface topographique jusqu'à une profondeur de 80 m. Les niveaux d'eau les plus bas mesurés dans le bassin étant situés à environ 50 m de profondeur, ce choix garantit la présence d'une zone saturée d'épaisseur suffisante dans le modèle.

### 3.1.2 Conditions aux frontières externes du modèle

Les limites de la zone à modéliser ne correspondent pas systématiquement à des limites hydrogéologiques naturelles, à travers lesquelles le flux d'eau s'écoulant est nul (contact imperméable ou crête hydrogéologique stable dans le temps). Par ailleurs, la partie du cycle de l'eau représentée dans le modèle est également en interactions avec d'autres composantes de ce cycle (eau de surface). Le système modélisé n'étant pas fermé, il est nécessaire de tenir compte des interactions se déroulant à ses frontières externes.

#### Conditions aux frontières latérales du modèle

Les résultats du projet Synclin'EAU ont montré que des flux significatifs d'eau souterraine pouvaient être échangés à travers les frontières du bassin hydrologique du Hoyoux, via les aquifères des calcaires du Carbonifère et, dans une moindre mesure, des grès du Famennien. Ces flux ont été estimés à l'aide du modèle développé pour la masse d'eau souterraine RWM021 (Figure 4).

Dans le modèle construit pour le projet ESO-ESU et limité au seul bassin du Hoyoux, il est important d'intégrer via les conditions aux frontières ces échanges d'eau souterraines (et de solutés) avec les bassins adjacents. Les conditions frontières de Fourier ont été choisies pour représenter ces échanges (Figure 6). Comparé aux autres possibilités (conditions de Dirichlet ou de Neumann), le choix des conditions de Fourier offre une plus grande liberté au modèle. En effet, l'utilisation de telles conditions n'impose ni une hauteur piézométrique, contrairement à une condition de Dirichlet, ni un flux échangé, contrairement à une condition de Neumann, mais bien une relation entre ces deux grandeurs. En d'autres mots, la hauteur piézométrique et le flux échangé le long d'une portion de frontière peuvent varier durant une simulation, suivant une évolution fonction des paramètres  $\alpha$  et  $h_{ref}$  de la condition de Fourier.

Les hauteurs piézométriques de référence  $h_{ref}$  des conditions de Fourier sont les hauteurs piézométriques calculées par le modèle Synclin'EAU (Tableau 4 en annexe) en bordure du bassin du Hoyoux. Cependant, étant donné que le modèle Synclin'EAU a été calibré à l'échelle de la masse d'eau RWM021, ses résultats peuvent être localement imprécis, avec, par endroit, des hauteurs piézométriques calculées supérieures à la surface topographique. Afin de rester cohérent avec les observations de terrains, qui ne montrent pas l'existence d'une nappe artésienne dans la région, les hauteurs de référence du modèle ESO-ESU ont été par endroits adaptées. Les zones concernées se situent au niveau des anticlinaux gréseux dans l'ouest et dans l'est du bassin du Hoyoux.

Pour leur part, les coefficients d'échange  $\alpha$  des conditions de Fourier ont été fixés en fonction des conductivités hydrauliques attribuées, dans le modèle Synclin'EAU, aux zones adjacentes aux portions de frontières. Des valeurs plus grandes ont donc été données aux portions de frontière situées le long des synclinaux calcaires. Ce choix, effectué après observation des résultats du modèle Synclin'EAU,

doit permettre de reproduire, dans le modèle ESO-ESU, des flux échangés plus importants au travers des frontières des formations calcaires.

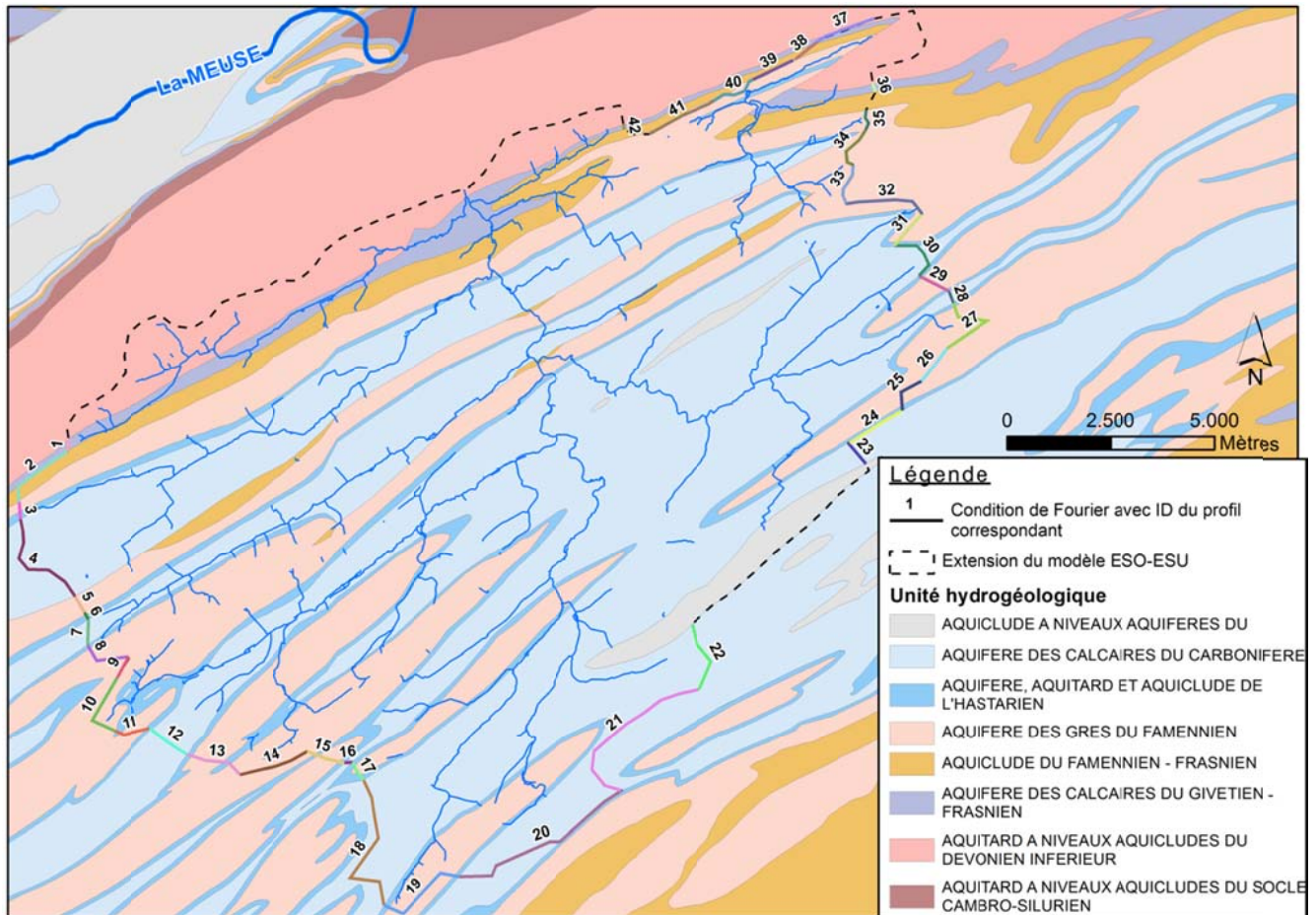


Figure 7 : Localisation des conditions aux frontières de type Fourier avec l'identification des profils définis pour l'attribution des hauteurs de référence et coefficients d'échange (Tableau 4 en annexe). Les autres frontières du modèle (en pointillé) se voient attribuer une condition de type flux nul.

Les frontières latérales du modèle auxquelles aucune condition de Fourier n'est appliquée sont considérées comme n'étant traversée par aucun flux (condition de Neumann avec un flux imposé nul). Ces limites étant situées sur des unités hydrogéologiques de faibles conductivités (aquitard ou aquiclude), il est peu probable qu'un flux significatif y soit échangé avec les bassins adjacents.

### Représentation des interactions nappe-rivière

Au vu des objectifs du projet ESO-ESU, qui portent notamment sur la caractérisation des échanges nappes-rivières, tant en terme de sens des échanges que de quantification des flux échangés, il est important d'incorporer dans le modèle développé une représentation réaliste des interactions entre le réseau hydrographique de surface et les eaux souterraines.

Le réseau hydrographique du bassin du Hoyoux pris en compte dans le modèle ESO-ESU (Figure 8) est quasiment identique à celui considéré dans le modèle Synclin'EAU. Il reprend les cours d'eau les plus importants du bassin du Hoyoux, additionnés de la partie amont du Ruisseau d'Oxhe. Les parties de

rivières qui ne sont pas considérées dans le modèle sont de faible importance par rapport aux sections principales (débit très faible voire ruisseau à sec en période d'étiage). Leurs interactions avec la nappe peuvent donc être supposées négligeables à l'échelle du bassin. Des propriétés (altitude des tronçons de rivière, largeur du cours d'eau) caractérisant le réseau hydrographique modélisé sont disponibles à des points régulièrement espacés le long du tracé des rivières, délimitant des segments droits (Figure 9). Le long de ces segments, les valeurs des différentes données peuvent être interpolées à partir des valeurs nodales. Ces données sont issues du projet PIRENE et avaient déjà été utilisées pour le développement des modèles Synclin'EAU. Toutefois, comparé au projet Synclin'EAU, les paramètres caractérisant le réseau de rivière ont été partiellement modifiés. Les altitudes de référence des cours d'eau ont été corrigées grâce au modèle numérique de terrain (MNT) publié récemment (2013-2014) par la Région Wallonne. La fine résolution de ce MNT (1 m), levé par technologie Lidar, permet une estimation plus fiable de l'altitude réel des cours d'eau, notamment ceux situés dans le fond de vallées encaissées où les anciennes données surestiment significativement (jusqu'à 10 m) la cote topographique.

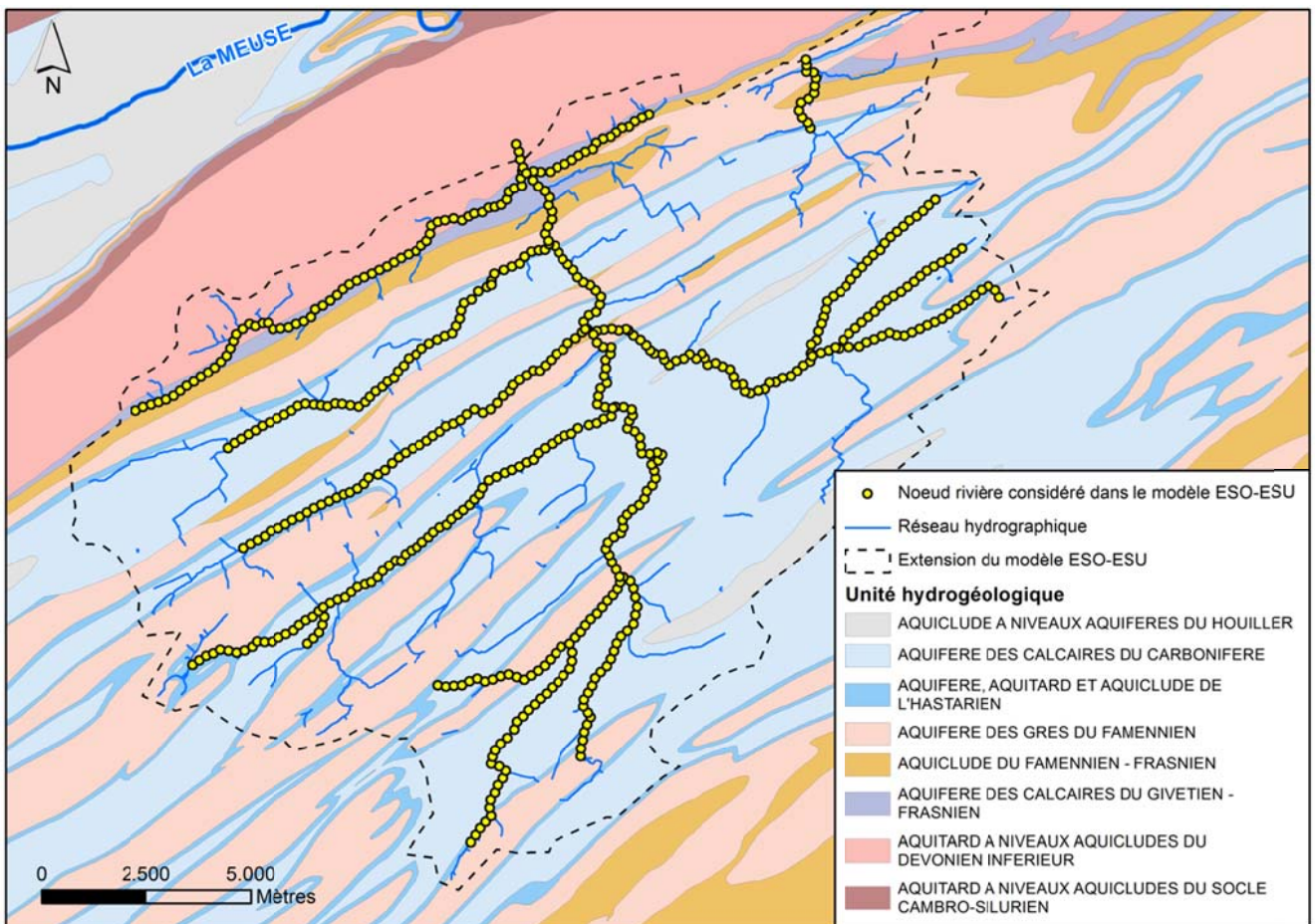


Figure 8 : Réseau hydrographique du bassin du Hoyoux et la partie prise en compte dans le modèle ESO-ESU

Dans le modèle développé pour le projet ESO-ESU, de manière identique aux modèles du projet Synclin'EAU, les interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface sont représentées par des conditions aux frontières de Fourier, qui sont appliquées sur la face supérieure des éléments du maillage traversés par le réseau hydrographique. Les paramètres des conditions de Fourier ( $h_{ref}$  et  $\alpha$ )



sont estimés, pour chaque maille, à partir de données caractérisant le réseau des rivières de Wallonie décrites dans le paragraphe précédent.



Figure 9 : Représentation d'un réseau de rivière dans un maillage illustratif. Les points jaunes représentent les nœuds auxquels les données caractérisant la rivière sont connues, les points rouges les points d'intersection entre les segments de rivière et les limites des mailles (Lorenzini, 2008a).

De cette manière, la hauteur piézométrique de référence ( $H_{riv}$ ) des conditions de Fourier correspond à la cote altimétrique du réseau hydrographique au point milieu du segment de rivière qui traverse la maille considérée (Figure 9). Le coefficient d'échange est lui fonction de la conductivité hydraulique et de l'épaisseur des matériaux formant le lit de la rivière ainsi que de la largeur du cours d'eau. Il est calculé, pour chaque maille traversée par une portion de rivière, par la formule suivante :

$$\alpha = \frac{K_r \times L \times l}{e}$$

où  $K_r$  est la conductivité hydraulique moyenne du lit de la rivière sur la portion traversant la maille,  $L$  est la longueur du segment de rivière traversant la maille,  $l$  est la largeur moyenne du segment de rivière et  $e$  est l'épaisseur moyenne du lit de la rivière. Le débit échangé entre la nappe et la rivière peut alors être obtenu, maille par maille, par la formule ci-dessous :

$$Q_{riv-nappe} = \frac{K_r \times L \times l}{e} (H_{nappe} - H_{riv})$$

une valeur positive dénotant un débit s'écoulant de la nappe vers la rivière. Le débit de base en un point d'un cours d'eau est alors obtenu en sommant les débits échangés au niveau de toutes les mailles situées en amont de ce point.

Le coefficient d'échange des conditions de Fourier a été localement modifié afin de tenir compte des spécificités du réseau hydrographique modélisé. Il a ainsi été abaissé (fixé à  $10^{-15} \text{ s}^{-1}$ ) le long de deux tronçons de rivière, afin de limiter les échanges entre la rivière et la nappe. Le premier tronçon est situé le long du Triffoiy, à proximité du captage de Jamagne, où le ruisseau est canalisé pour éviter de potentielles venues d'eau de surface vers le captage. Le deuxième est composé du Torrent de Bonne,



qui est le plus souvent à sec en période d'étiage et dont le débit de base peut donc être considéré comme nul. Le coefficient de la conditions de Fourier correspondant au tronçon du Hoyoux canalisé autour des galeries de modave n'a lui pas été modifié. En effet, dans le modèle, les galeries drainantes de Modave sont localisées dans les mêmes mailles que le tronçon de rivière canalisé. Le flux échangé au niveau de ces mailles est donc à attribuer au débit capté par les galeries drainantes et non au flux échangé entre la nappe et le cours d'eau, qui est supposé négligeable vu la canalisation du lit de la rivière.

### 3.1.3 Sollicitations appliquées au modèle

Les sollicitations appliquées au modèle permettent de représenter tous les flux entrants ou sortants de la zone modélisée sous forme de recharge vers la nappe aquifère (flux entrants) ou de captages (flux sortants)

#### Recharge vers la nappe

Dans la cadre du projet, des bilans hydro(géo)logique à l'échelle du bassin du Hoyoux et de ses principaux sous-bassins ont été calculés (Délivrable D3.3). Ces calculs, basés sur les données climatiques enregistrées spécifiquement dans le cadre du projet ESO-ESU à la station météorologique d'Hodoumont, ont fourni des valeurs journalières d'eau utile pour la période allant d'août 2013 à juin 2015 (Figure 10).

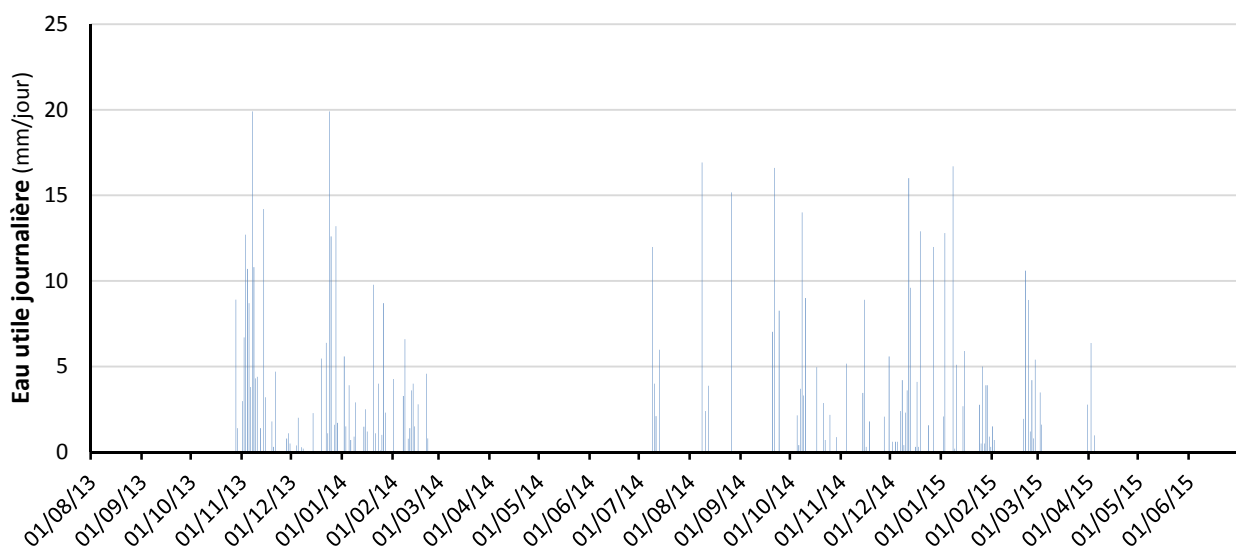


Figure 10 : Données journalières d'eau utile calculées d'après les bilans hydrogéologiques présentés dans le livrable D3.3

Afin de compléter le jeu de données, notamment pour les simulations qui seront effectuées en régime transitoire, des calculs supplémentaires utilisant les données climatiques de la station météo de Strée (IRM) ont été effectués sur une période allant de 1994 et 2011. Les données disponibles pour cette période étant moins complètes que celles mesurées à Hodoumont, les valeurs d'eau utile ont été obtenues à une fréquence mensuelle (Figure 11). La méthode qui a été suivie est basée sur la formule et le modèle conceptuel simplifié de Thornthwaite pour estimer respectivement l'évapotranspiration potentielle et l'eau utile (via le calcul de l'évapotranspiration réelle et du stock

d'humidité du sol). La capacité maximale du stock d'humidité du sol a été fixée à 125 mm, de manière identique aux calculs effectués pour la période 08/2013-06/2015 (délivrable D3.3)

Une fois les valeurs d'eau utile estimées, la recharge à appliquer au modèle peut être déduite par le biais d'un coefficient d'infiltration ( $CI$ ), qui définit le rapport entre l'infiltration efficace ( $I$ ) rechargeant réellement la nappe et l'eau utile ( $EU$ ) :

$$CI = \frac{I}{EU}.$$

La différence entre ces deux termes est formée par le ruissèlement et une partie des écoulements hypodermiques rapides, qui s'écoulent directement vers le réseau hydrographique de surface sans passer par la nappe souterraine.

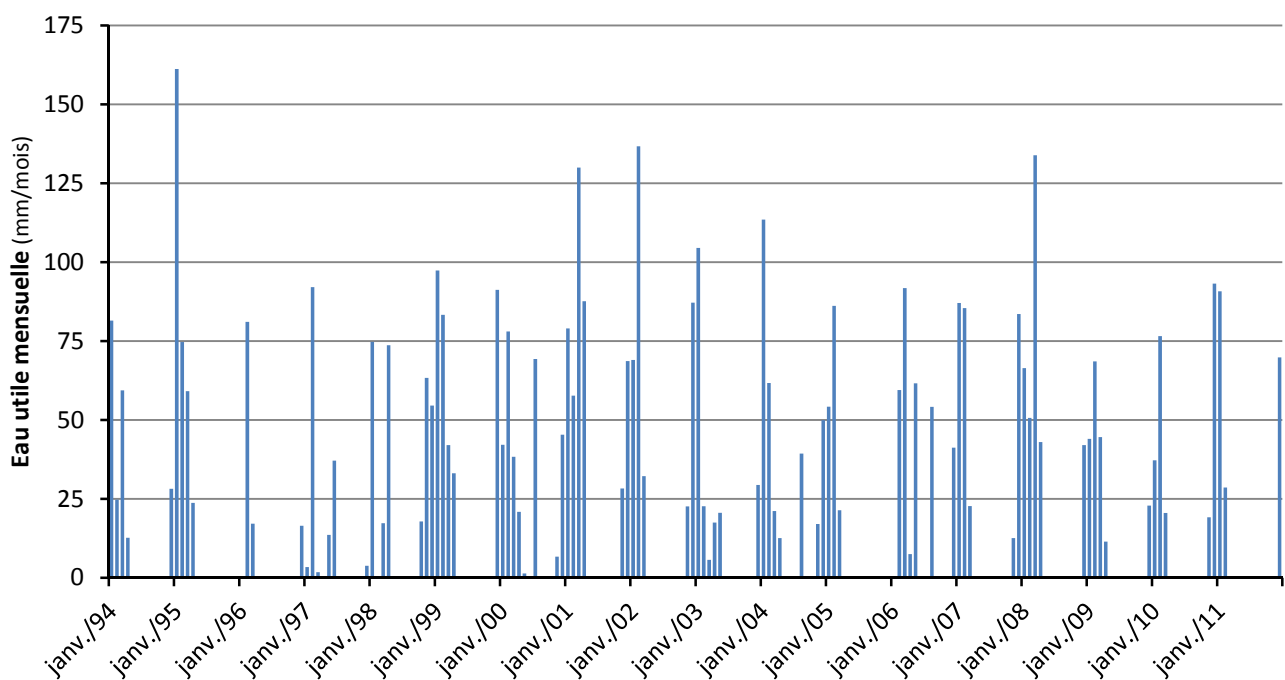


Figure 11 : Données mensuelles d'eau utile calculées sur la période 1994-2012 d'après les données climatiques de la station météorologique de Strée.

Dans le cadre du projet, un coefficient d'infiltration moyen par sous-bassin a été calculé dans le cadre du projet pour les bassins du Triffoy et du Hoyoux amont (indicateur  $I_{eso}$  dans le livrable D4.1). Les calculs réalisés sont basés sur les valeurs d'eau utile issues des bilans hydrogéologiques et des infiltrations calculées en soustrayant du débit total à l'exutoire le débit de base estimé par des méthodes de séparation d'hydrogramme. Ils montrent que le coefficient d'infiltration est toujours supérieur à 90 % (variant entre 91 et 96 % précisément), quelque soit le bassin ou la technique de séparation d'hydrogramme considérée.

En réalité, le coefficient d'infiltration varie en fonction de la conductivité hydraulique des terrains dans lesquelles l'eau des précipitations s'infiltré. Les coefficients estimés dans le livrable D4.1, qui sont des valeurs globales valables à l'échelle des sous-bassins considérés, doivent donc être

différenciées selon l'unité hydrogéologique sur laquelle le flux de recharge est prescrit. Le bassin du Triffoiy étant formé quasi exclusivement par les aquifères des grès du Famennien et des calcaires du Carbonifère (Figure 6), les coefficients estimés pour ce bassin peuvent être associés à ces unités hydrogéologiques. Les valeurs utilisées par la suite (Tableau 2) ont donc été ajustées entre 90 et 95 % pour ces unités aquifères, avec une valeur plus élevée pour les formations calcaires, qui sont caractérisée par une conductivité hydraulique en général plus élevée que les grès. De leur côté, les formations aquitard et aquiclude se sont vues attribuer des coefficients d'infiltration plus faibles. Etant donné le manque d'information permettant d'estimer un coefficient d'infiltration pour ces unités hydrogéologiques, les valeurs utilisées dans la suite sont celles estimées dans le cadre du projet Synclin'Eau. Toutefois, au vu de l'extension réduite de ces formations au sein du modèle, l'incertitude concernant la recharge appliquée sur ces unités peu perméables ne doit avoir qu'une influence limitée sur les résultats du modèle.

**Tableau 2 : Valeurs des coefficients d'infiltration utilisés pour déterminer la recharge appliquée au modèle ESO-ESU**

Unité hydrogéologique	Coefficient d'infiltration
Aquifère des calcaires du Carbonifère	0.95
Aquifère des grès du Famennien	0.9
Aquifère des calcaires du Givetien	0.95
Aquitard à niveaux aquicludes du Dévonien Inférieur	0.206
Aquiclude à niveaux aquifères du Houiller	0.4

La recharge est représentée dans le modèle par une condition aux frontières de Neumann (flux imposé) prescrite sur la face supérieure du maillage.

### Captages d'eau souterraine

Les prises d'eau souterraine considérées dans le modèle sont localisées à la Figure 12. Elles correspondent aux captages d'importance significative (volume prélevé annuellement supérieur à 15 000 m<sup>3</sup>) présents dans la zone modélisée. Les prises d'eau modélisées sont celles prises en compte pour le calcul des bilans hydrogéologiques (délivrable D3.3). Le captage de Marnave, qui est localisé hors du bassin hydrologique du Hoyoux dans la partie NE ajoutée à la zone modélisée est également représenté dans le modèle. Les données sur les volumes prélevés ont été collectées auprès des compagnies productrices d'eau (CIESAC, CILE, Vivaqua, AIEC et IDEN). Les autres captages privés situés dans la zone du modèle mais non modélisés ne prélèvent que de faibles quantité d'eau (moins de 5 % du volume total prélevé). Leur influence régionale sur la nappe souterraine comme sur le bilan hydrogéologique du bassin peut être supposée négligeable.

La majorité des captages de la Figure 12 sont modélisés par des conditions de Neuman de flux imposés au niveau de l'élément inférieur du maillage correspondant à la localisation du captage considéré. Deux prises d'eau, correspondant aux prises d'eau gravitaires de Jamagne et de Modave qui sont formées par un réseau plus ou moins étendu de galeries drainantes, sont représentées par une condition de Fourier (3<sup>ème</sup> type). Le coefficient de la condition de Fourier sera ajusté pendant la phase de calibration du modèle de manière à reproduire au mieux le débit sortant par les conditions de Fourier utilisées pour représenter ces deux captages.

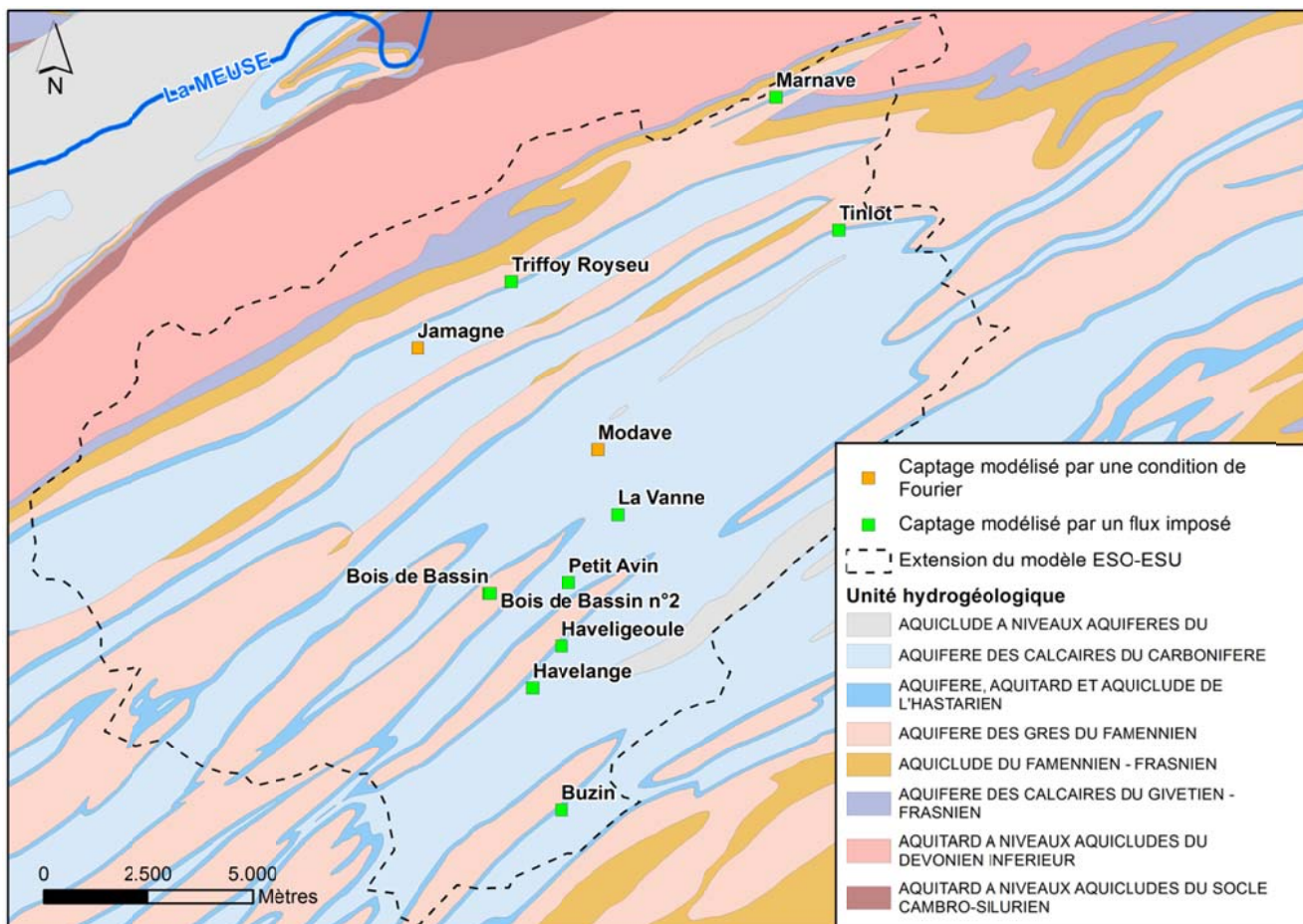


Figure 12 : Localisation des captages d'eau souterraine pris en compte dans le modèle

### 3.1.4 Division en sous-domaines et conditions aux frontières internes

La division de la zone modélisée en plusieurs sous-domaines (Figure 13) répond à deux objectifs, (1) délimiter des zones correspondant aux sous-bassins étudiés dans le projet pour lesquelles des bilans hydrogéologiques pourront être calculés et (2) éviter d'introduire dans le maillage des éléments distordus en représentant implicitement par des conditions frontières internes les formations géologiques peu perméables et peu épaisses. Le découpage en sous-domaine tient donc compte à la fois des limites des sous-bassins versants étudiés dans le projet Synclin'EAU (Triffoy, Hoyoux amont et Torrent de Bonne), pour lesquels le calcul de bilans hydrogéologiques est désiré, et de la configuration géologique. En effet, les formations géologiques peu perméables et peu épaisses que sont les schistes du Pont d'Arcole (Hastarien, base du Carbonifère) et l'aquiclude du Famennien-Frasnien sont représentées dans le modèle par des interfaces entre sous-domaines.

Les frontières internes entre sous-domaines situées à l'intérieur d'une même unité hydrogéologique, où une continuité hydrogéologique peut être attendue, sont modélisées par une condition de Dirichlet « dynamique ». Les frontières correspondant à des limites entre unités hydrogéologiques différentes sont, quant à elles, modélisées par une condition de Fourier « dynamique ». Les valeurs attribuées aux coefficients d'échange des conditions de Fourier sont estimées par le rapport de la conductivité hydraulique de l'unité géologique représentée par l'interface, divisée par son épaisseur. Les valeurs de ces coefficients sont à ajuster pendant la calibration.



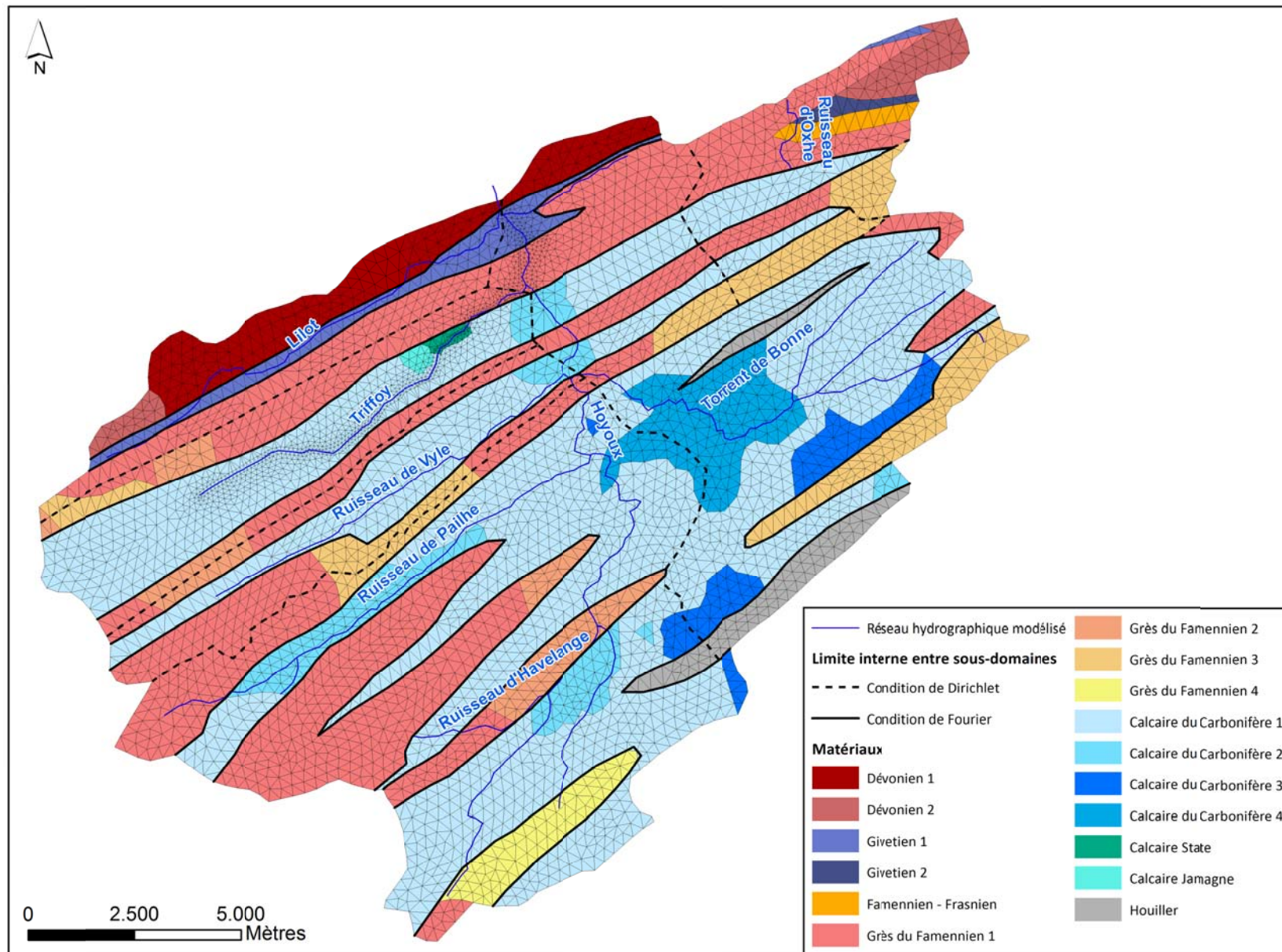


Figure 13 : Illustration 2D du maillage et des matériaux définis pour l'attribution des propriétés hydrogéologiques du milieu souterrain aux différentes couches du modèle, avec la division en sous-domaines.

### *3.1.5 Equations mathématiques choisies pour représenter les écoulements et le transport de solutés en milieu souterrain*

Comme dans le modèle développé dans le cadre du projet Synclin'EAU, les écoulements en milieu souterrain sont représentés dans le modèle par l'équation de Richards, qui décrit les écoulements en milieu poreux partiellement saturés.

Les équations choisies pour représenter le transport de soluté seront celles du modèle de réservoirs distribués. Au vu de l'échelle du modèle, l'utilisation du modèle classique d'advection-dispersion n'est, en effet, ici pas envisageable. La résolution de l'équation d'advection-dispersion requerrait l'utilisation de mailles de tailles trop petites pour éviter les problèmes de dispersion numérique et d'instabilités, ce qui engendrerait des temps de calculs énormes. Le choix du modèle de mélange distribué à l'avantage de garantir la stabilité numérique du problème quelle que soit la taille des mailles utilisées et de permettre un gain en temps de calcul.

### *3.1.6 Code de calcul utilisé*

Le code de calcul employé pour résoudre les équations d'écoulement et de transport sélectionnées est le code éléments finis SUFT3D, dans sa version utilisée pour le projet Synclin'EAU. Cette version avait fait l'objet d'améliorations numériques visant à réduire les temps de calcul et d'ajouts concernant notamment le calcul des bilans par sous-domaine et des flux échangés via les conditions aux frontières de Fourier.

### *3.1.7 Discrétisation spatiale de la zone modélisée*

La discrétisation spatiale du milieu souterrain repose sur la construction d'un maillage composé d'éléments volumiques. A chaque élément peut être associé un ensemble de paramètres caractéristiques des propriétés hydrodynamiques ou hydrodispersives du volume représenté. Le choix de la taille des éléments utilisés détermine le nombre total de nœuds constitutifs du maillage, qui influence lui-même le temps de calcul requis par la résolution numérique du système d'équations. Le choix de la discrétisation utilisée doit donc constituer un bon compromis entre la précision demandée par les objectifs de la modélisation et la nécessité de garder des temps de calculs raisonnables.

Comparé au projet Synclin'EAU, le maillage utilisée pour le présent modèle (Figure 13) est basée sur des éléments de taille réduite, dont les côtés ont une extension horizontale d'environ 300 m en moyenne (contre 500 m dans le modèle Synclin'EAU). La prise en compte d'une zone plus restreinte (le bassin du Hoyoux au lieu de l'entièreté de la masse d'eau souterraine) permet, en effet, de réduire la taille des éléments sans en augmenter trop fortement le nombre. De plus, en tenant compte des informations collectées durant le projet ESO-ESU, le maillage a été raffiné au niveau de la vallée du Triffooy (Figure 13). Ce choix doit permettre une représentation du tracé de la rivière plus proche de la réalité ainsi qu'une meilleure reproduction des nombreuses données mesurées durant le projet sur ce tronçon de rivière.

En outre, afin de représenter les écoulements dans la zone non-saturée du modèle plus précisément que dans le modèle Synclin'EAU et de pouvoir modéliser la composante rapide de l'écoulement dans la zone superficielle altérée du bedrock, il a été décidé de diviser verticalement le maillage en 5 couches d'éléments. Le sommet de la couche supérieure est déterminé par l'interpolation des données du MNT ERRUISSOL, d'une résolution de 10m. Chaque couche d'éléments est considérée à une épaisseur constante sur son extension horizontale. Les couches supérieures ont une faible épaisseur, qui croît pour les couches plus profondes. Cette division doit permettre d'attribuer des propriétés hydrogéologiques différentes à la couverture quaternaire composée de limons, à la partie superficielle altérée du bedrock et à la partie saine du bedrock (Figure 14).

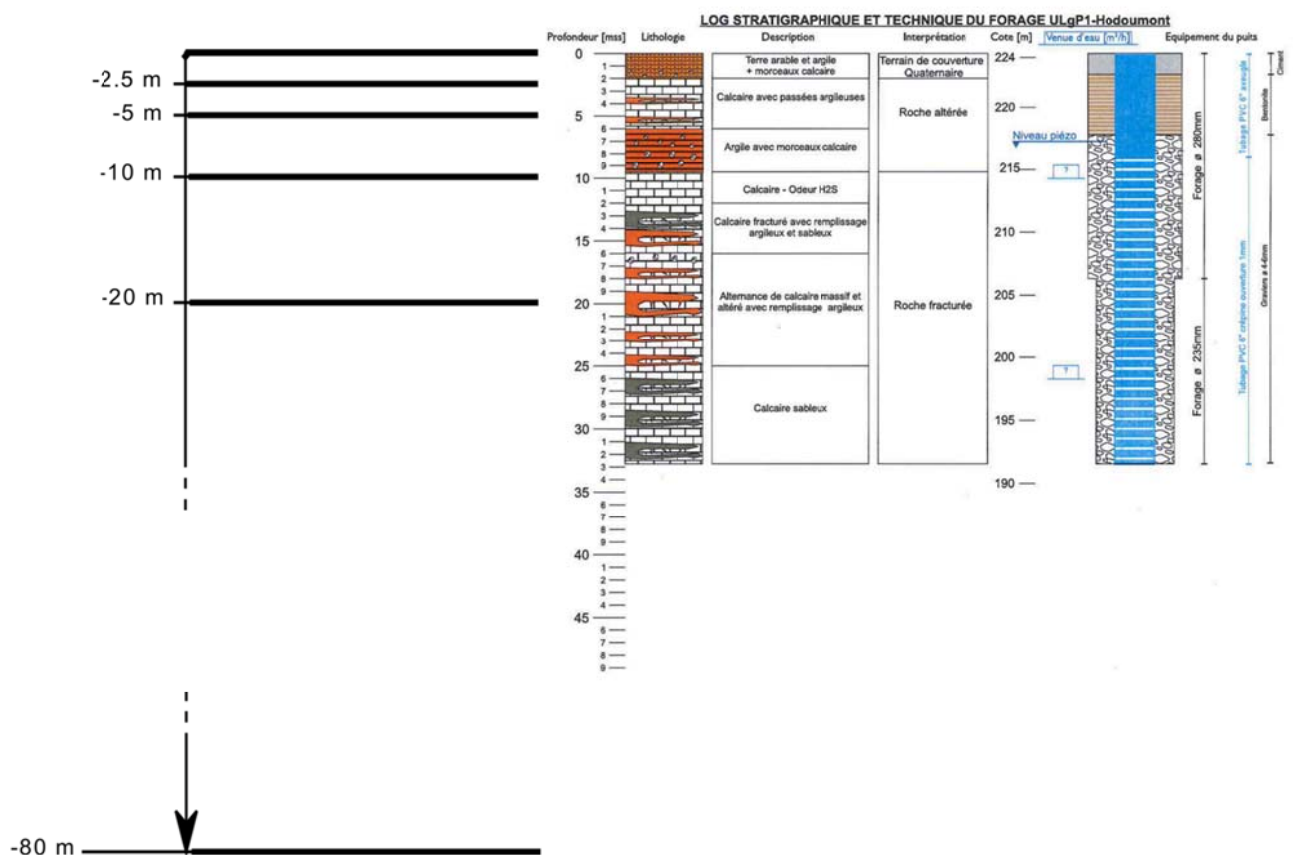


Figure 14 : Illustration du principe de discrétisation verticale du maillage avec indication de la profondeur des différentes couches sous la surface topographique. Comparaison avec le log lithologique du forage P1 réalisé à Hodoumont.

### 3.1.8 Paramétrisation du modèle

La définition de différents matériaux au sein du maillage permet de distribuer spatialement les propriétés hydrogéologiques du milieu (Figure 13). Cette distribution spatiale des propriétés hydrogéologiques est basée principalement sur la répartition utilisée dans le modèle du projet Synclin'EAU, qui avait été obtenue à l'issue de la calibration du modèle de la masse d'eau RWM021 (Leroy et al., 2010a). Elle a été modifiée localement dans la partie aval de la vallée du Triffoy, dans le but de permettre une calibration plus précise dans cette zone. Par ailleurs, chacune des 5 couches du maillage s'est vue définir des matériaux propres, ce qui autorise la définition de propriétés hydrogéologiques variant selon la profondeur.



## 3.2 Calibration du modèle d'écoulement en régime permanent

Avant d'utiliser le modèle construit pour modéliser différents scénarii et faire des prédictions, il est nécessaire de procéder à sa calibration. Celle-ci consiste à ajuster, dans une gamme de valeurs réalistes, les différents paramètres du modèle de manière à ce que les résultats calculés par le modèle soient le plus représentatif possible des observations de terrain. La calibration du modèle ESO-ESU est menée en plusieurs temps. Une première étape de calibration du modèle simulant les écoulements en milieu souterrain, effectuée en régime permanent avec des sollicitations moyennes correspondant à la période juillet 2013 - juillet 2015, est présentée ci-dessous. Le but de cette étape est d'obtenir un premier jeu de paramètres représentatifs et des conditions initiales proches des observations pour les modélisations en régime transitoire. Dans un deuxième temps, cette calibration sera complétée par une calibration en régime transitoire, afin d'obtenir une reproduction de la dynamique des écoulements souterrains et des échanges d'eau nappes-rivières.

### 3.2.1 Observations utilisées pour la calibration du modèle d'écoulement

En pratique, calibrer un modèle demande de disposer d'une quantité suffisante de données, permettant de comparer les résultats modélisés avec les observations de terrain. Deux types de données observées sur le terrain peuvent être utilisées pour calibrer le modèle d'écoulement : des mesures des hauteurs piézométriques, qui caractérisent le niveau des nappes modélisées, et des mesures de débits (ou de flux), qui caractérisent les quantités d'eau échangées entre les nappes souterraines et les rivières par exemple. La combinaison de ces deux types d'observations doit permettre d'améliorer la fiabilité de la calibration.

#### Données piézométriques utilisées lors de la calibration du modèle

Les mesures piézométriques utilisées pour la calibration du modèle (Figure 15) sont tirées des données collectées dans le cadre du projet ESO-ESU. Ces données ont été soit mesurées directement par les équipes universitaires impliquées dans la convention ESO-ESU, soit collectées auprès des sociétés distributrices d'eau qui possèdent un réseau de monitoring dans le bassin. En fonction des points considérés, des chroniques plus ou moins complètes sont disponibles. Ces dernières ont été moyennées, afin de retenir une valeur représentative de la période de sollicitation (07/2013-07/2015). Afin de compléter le jeu de données, les hauteurs piézométriques utilisées lors de la calibration en régime permanent du modèle Synclin'EAU ont aussi été considérées pendant la calibration du modèle Synclin'EAU. Ces valeurs ont été moyennées pour l'année 2006 à partir des chroniques piézométriques issues de la base de données hydrogéologiques de la région wallonne (BD-Hydro). Toutefois, le poids attribué à ces données observées sur une période ne correspondant pas à la période des sollicitations, doit être moindre que celui attribué aux données collectées lors du projet ESO-ESU sur la période correspondant aux sollicitations modélisées. Des variations naturelles importantes de hauteur piézométrique, de plus de 10 m par endroit, peuvent en effet être observées dans le bassin du Hoyoux. Les observations tirées du projet Synclin'EAU peuvent toutefois fournir des informations utiles pour déterminer la direction des écoulements souterrains.

### Mesures de débits utilisées lors de la calibration du modèle

Les données moyennes des débits de base des rivières utilisées pour la calibration du modèle ont été calculés à partir des données de débits relevées durant le projet ESO-ESU. Ces débits ont été mesurés grâce à des sondes limnimétriques placées à différents endroits le long des cours d'eau du bassin du Hoyoux (Figure 15). Les débits de base ont ensuite été calculés par la méthode de séparation d'hydrogramme VCN3, qui retient le débit minimum observé sur 3 jours consécutifs sur le mois considéré. Ces données sont disponibles pour la période comprise entre juillet 2013 et juillet 2015.

L'incertitude relative communément admise pour les mesures de débits est d'environ 10 % (Pobanz et al., 2008). Elle s'explique par les erreurs qui touchent les jaugeages effectués et la courbe de tarage utilisée pour calculer le débit d'un cours d'eau à partir des données limnimétriques. Ces erreurs sont plus importantes pour les cours d'eau dont le débit est important ou sujet à de grandes variations. L'erreur touchant les débits de base calculés par la méthode VCN3 peut être estimée au minimum à 10%.

Comme signalé précédemment, les débits captés au niveau des captages gravitaires de Modave et de Jamagne constituent également des données de calibration. Les volumes captés mensuellement à ces stations ont été collectés auprès des compagnies d'eau exploitant les prises d'eau.

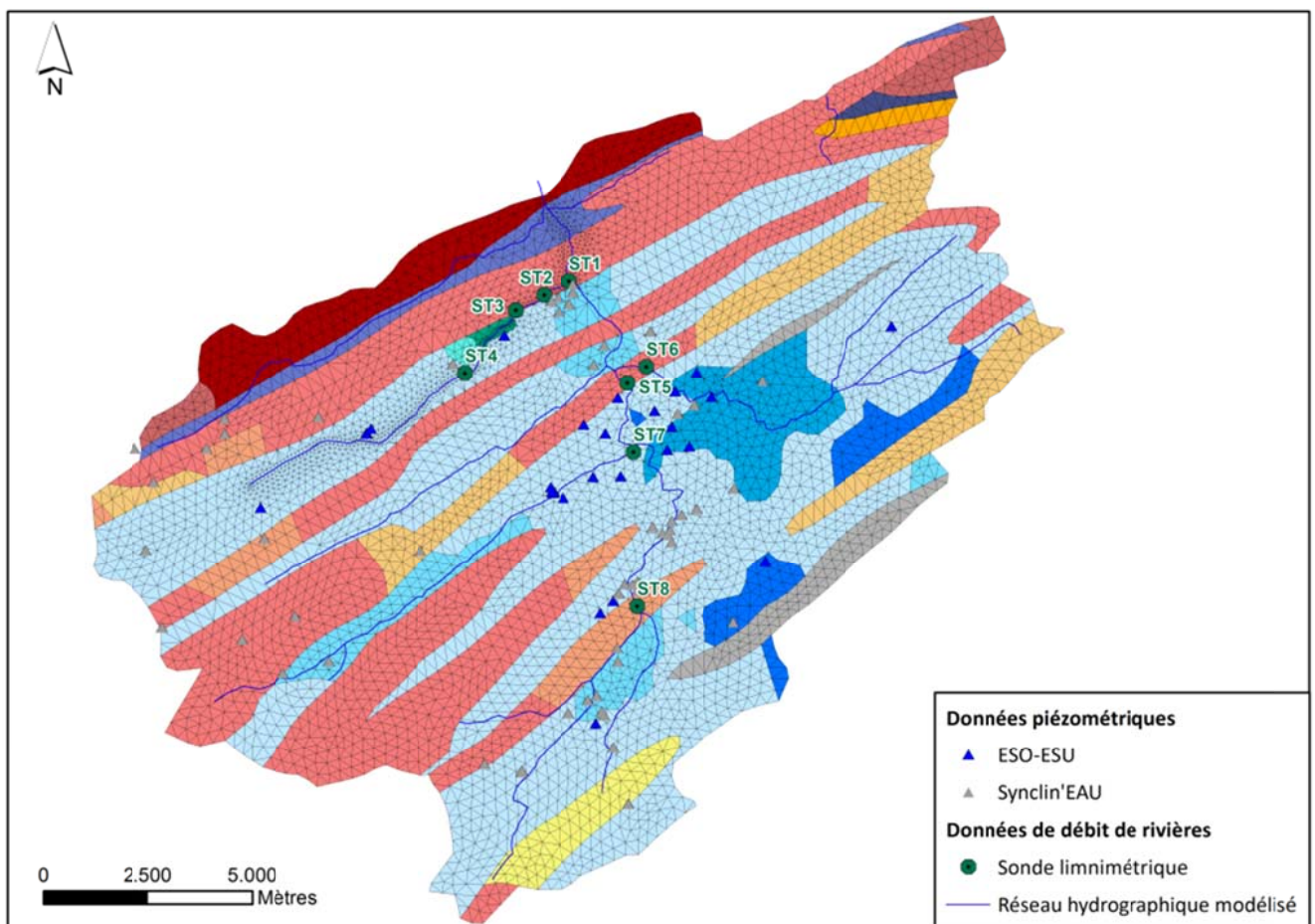


Figure 15 : Carte de localisation des points de mesures dont les données ont été utilisées pour la calibration du modèle ESO-ESU.

### 3.2.2 Calibration du modèle

Le modèle a été calibré par essais-erreurs en ajustant manuellement la distribution spatiale et les valeurs des paramètres (conductivités hydrauliques et valeurs des coefficients des différentes conditions de Fourier) du modèle jusqu'à reproduction satisfaisante des observations de terrain.

Les paramètres du modèle ajustés suite à la phase de calibration du modèle en régime permanent sont repris dans le Tableau 3. Les conductivités hydrauliques attribuées au modèle ne sont ici pas différenciées en fonction de la profondeur (une même valeur pour les 5 couches du maillage situées sous un même matériau dans la Figure 13).

Au vu des figures 16 et 17, la calibration du modèle d'écoulement en régime permanent semble satisfaisante. D'une part, les hauteurs piézométriques calculées par le modèle (Figure 16) sont proches des observations collectées durant le projet ESO-ESU et représentatives de la période modélisée. La différence entre valeurs observées et calculées est en général inférieure à 5 m, avec des écarts maximaux ne dépassant pas 10 m dans le pire des cas. D'autre part, les débits de base modélisés sont, eux aussi, proches des valeurs observées (Figure 17). Pour 9 des 10 points d'observations, l'écart entre valeur observée et valeur calculée est inférieure à 10 % du débit de base mesuré. Seule la valeur calculée à la station ST7, située à l'exutoire du bassin versant du Ruisseau de Pailhe, présente un écart important à la réalité, d'environ 100 %. La valeur calculée par le modèle correspond en fait au débit de base maximal du cours d'eau, observé en période de hautes eaux. La surestimation du débit de base du ruisseau de Pailhe s'explique par une surévaluation du niveau d'eau modélisé de la nappe à proximité du cours d'eau. Ce point pourrait être amélioré par une calibration plus précise dans la zone du modèle concernée, en ajoutant par exemple de nouveaux matériaux pour définir de nouvelles valeurs de conductivité hydraulique. Il est également probable que la recharge appliquée au modèle dans le bassin du ruisseau de Pailhe soit surestimée par rapport à la réalité. La recharge a en effet été calculée à partir des coefficients d'infiltration estimés pour le bassin du Triffoy, dans lequel l'infiltration est très importante. Cependant, peu de données sont disponibles dans cette région du modèle pour procéder à une calibration plus précise.

**Tableau 3 : Conductivités hydrauliques optimisées attribuées aux différents matériaux du modèle suite à la calibration en régime permanent du modèle.**

Matériau	K (m/s)	Matériau	K (m/s)
Dévonien 1	$6.80 \times 10^{-7}$	Grès du Famennien 4	$2.00 \times 10^{-6}$
Dévonien 2	$6.51 \times 10^{-7}$	Calcaire du Carbonifère 1	$1.50 \times 10^{-4}$
Givetien 1	$8.23 \times 10^{-5}$	Calcaire du Carbonifère 2	$1.00 \times 10^{-5}$
Givetien 2	$2.80 \times 10^{-5}$	Calcaire du Carbonifère 3	$1.60 \times 10^{-6}$
Famennien-Frasnien	$1.74 \times 10^{-7}$	Calcaire du Carbonifère 4	$5.68 \times 10^{-4}$
Grès du Famennien 1	$4.00 \times 10^{-6}$	Calcaire Jamagne	$1.10 \times 10^{-3}$
Grès du Famennien 2	$3.00 \times 10^{-7}$	Calcaire State	$5.00 \times 10^{-5}$
Grès du Famennien 3	$5.00 \times 10^{-7}$	Houiller	$2.00 \times 10^{-7}$

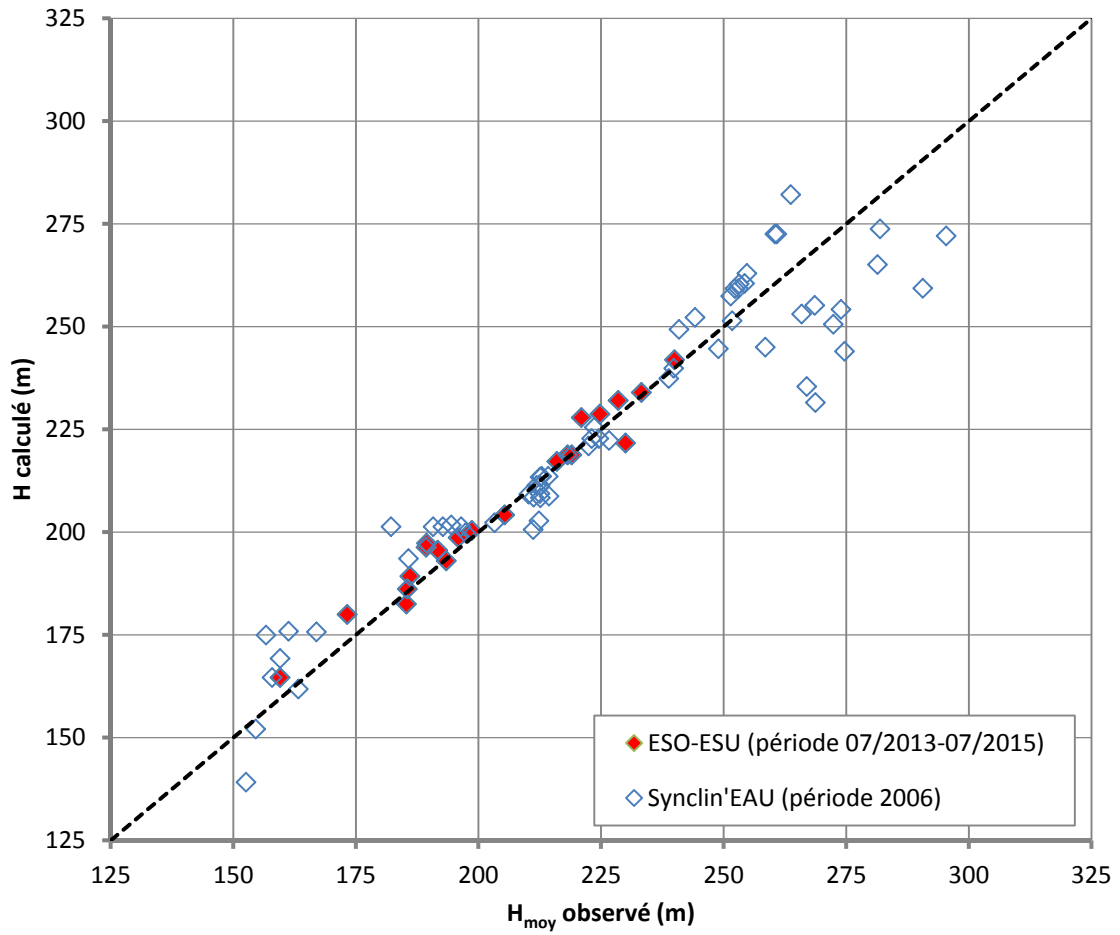


Figure 16 : Comparaison des hauteurs piézométriques calculées par le modèle en régime permanent pour des sollicitations correspondant à la période 07/2013-07/2015 avec les valeurs moyennes observées sur le terrain pour la période correspondante (ESO-ESU) et pour l'année 2006 (Synclin'EAU).

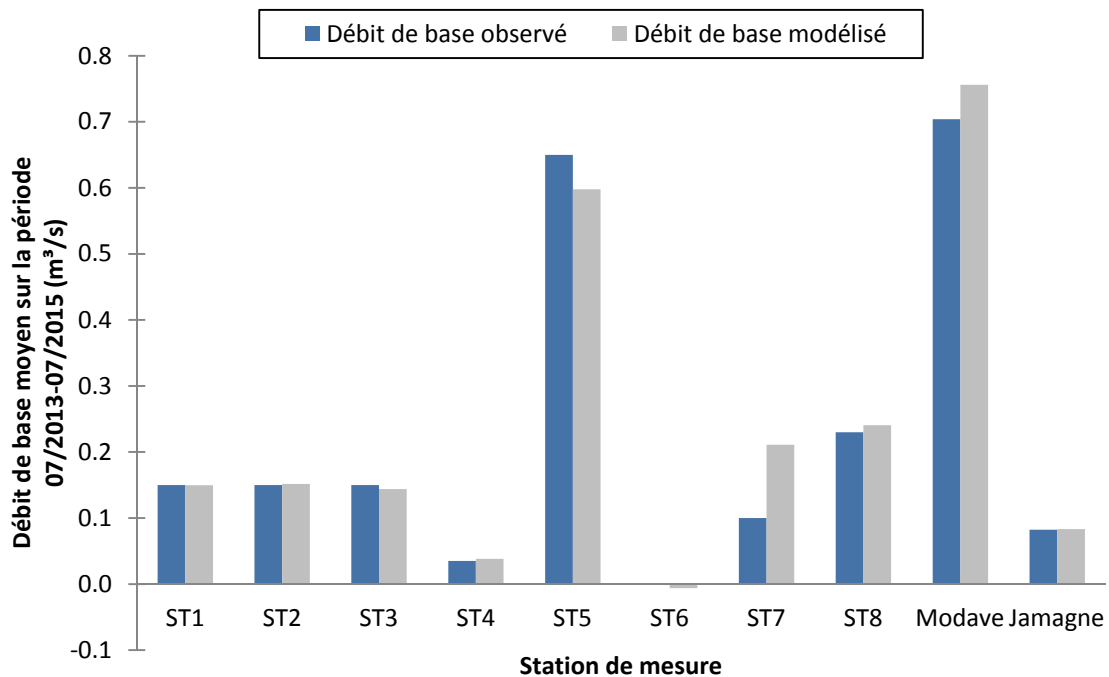


Figure 17 : Comparaison des débits de base mesurés aux stations limnimétriques et dans les galeries drainantes du bassin du Hoyoux avec les valeurs calculées par le modèle.

### 3.3 Analyse des résultats du modèle d'écoulement en régime permanent

#### 3.3.1 Distribution des hauteurs piézométriques calculées

Conformément aux observations de terrain et à ce qui était attendu, les hauteurs piézométriques les plus hautes sont observées en amont du bassin hydrologiques et les plus basses en aval à proximité de l'exutoire du Hoyoux qui fixe le niveau de base dans le bassin

Plus précisément, la distribution de hauteur piézométrique calculée par le modèle à l'issue de la calibration (Figure 18) confirme le comportement hydrogéologique régional observé dans le Condroz. Les niveaux piézométriques sont plus élevés dans les bandes gréseuses, où l'écoulement à tendance à s'orienter en direction des synclinaux calcaires adjacents. Dans ces derniers, l'écoulement est orienté selon l'axe des plis et se fait en direction du Hoyoux.

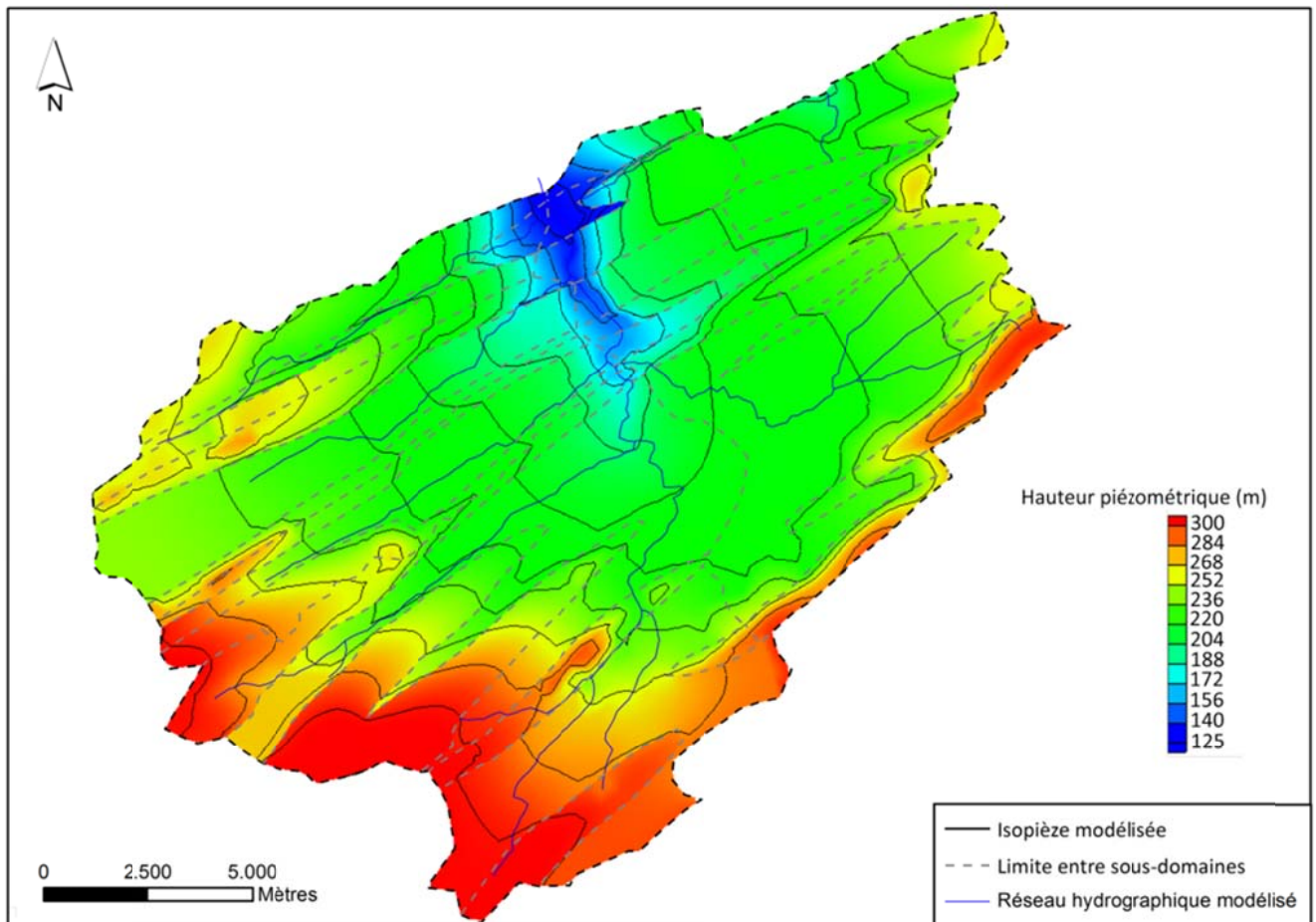


Figure 18 : Distribution de hauteurs piézométriques calculées par le modèle avec les paramètres déterminés à la fin de la calibration

### 3.3.2 Débits souterrains échangés au travers des frontières externes du modèle

Les flux échangés par le modèle au travers de ses frontières externes sont illustrés à la Figure 19. Un apport net d'eau d'environ  $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$  est calculé sur l'ensemble du bassin, qui est donc plus important que la valeur calculée par le modèle Synclin'EAU ( $0,112 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Les entrées d'eau les plus importantes sont observées le long de la partie sud du bassin hydrologique, en provenance des bassins voisins du Bocq, de l'Ourthe et du Néblon, au travers des calcaires du Carbonifère.



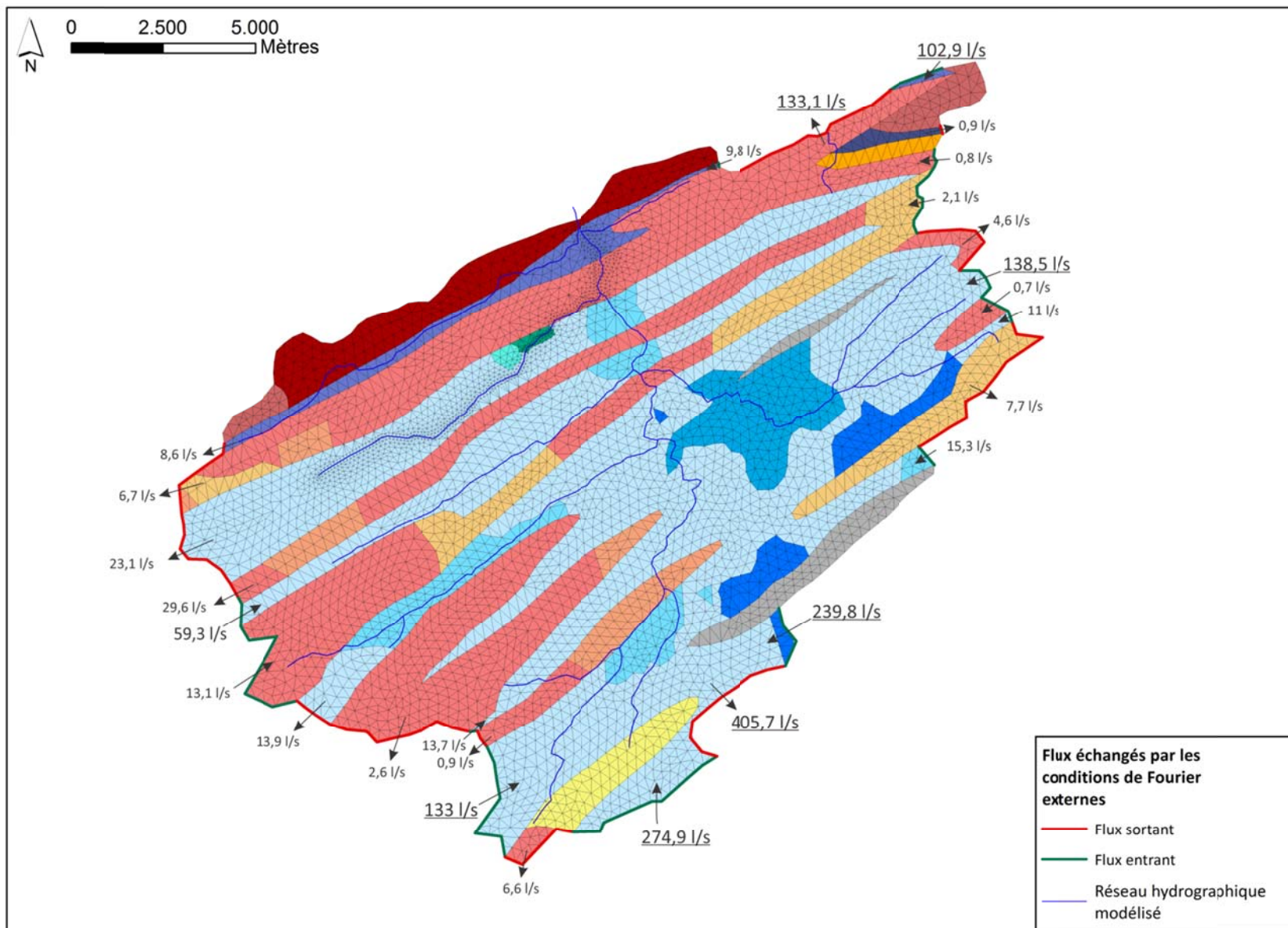


Figure 19 : Carte montrant le sens et la magnitude des flux calculés par le modèle échangés au travers des frontières externes du modèle.



### 3.3.3 Débits d'eau souterraine échangés entre sous-domaines du modèle

Les plus importants échanges d'eau souterraine modélisés sont observés entre les sous-domaines représentant les bassins du Torrent de Bonne et du Hoyoux amont, au travers des calcaires carbonifères (Figure 20). Le débit échangé est orienté depuis le bassin versant du Torrent de Bonne vers le bassin versant du Hoyoux le long de la partie nord de la crête topographique. Toutefois, un écoulement en sens inverse est observé le long la partie sud de la frontière entre les deux bassins. Le débit net échangé depuis le bassin du Torrent de Bonne vers le bassin du Hoyoux amont s'établit ainsi à  $0,37 \text{ m}^3/\text{s}$ . En tenant compte de la totalité des flux souterrains échangés entre le bassin versant du Torrent de Bonne et ses bassins voisins (par les conditions aux frontières internes et externes), les résultats du modèle montre un flux net sortant du bassin de  $0,22 \text{ m}^3/\text{s}$ , ce qui approche l'erreur de fermeture du bilan hydrogéologique ( $0,31 \text{ m}^3/\text{s}$ ) calculé, pour ce sous-bassin du Torrent de Bonne, dans le livrable D3.3 pour la période septembre 2013 à août 2014.

Les flux échangés entre les autres sous-bassins versants sont pour la plupart de faibles importances, exceptés pour le débit qui s'écoule au travers des calcaires frasniens depuis le bassin du Lilot vers le Hoyoux et, dans une moindre mesure, pour les flux échangés au niveau des synclinaux calcaires au nord de la zone modélisée, qui s'orientent en direction du Hoyoux depuis les bassins versants du Ruisseau d'Oxhe (NE) et du Ruisseau de Vyle (O).

Les flux souterrains calculés par le modèle confirment également l'apport d'eau depuis les formations gréseuses du Famennien vers les synclinaux calcaires du Carbonifère, avec des débits pouvant être significatifs selon l'extension et la géométrie des formations géologiques et de leur frontière.

### 3.3.4 Echanges nappes-rivières

Le sens des échanges et les quantités d'eau échangées entre les nappes et les rivières calculés par le modèle sont fortement dépendant du niveau de référence ( $H_{riv}$ ) des conditions de Fourier qui représentent les tronçons de rivières, de la discrétisation de la zone entourant le réseau hydrographique et de la qualité de la calibration. C'est pourquoi les résultats de la Figure 21, qui illustrent le sens des flux échangés entre la nappe et les rivières, doivent être considérés avec précaution. Quelques constatations peuvent quand même être posées quant à la reproduction du sens des échanges nappes-rivières modélisés (Figure 21) :

1. Le modèle reproduit le caractère drainant ou perdant du Hoyoux sur la plus grande partie de son tracé. Ainsi, le caractère perdant des parties les plus en amont du Hoyoux est reproduit par le modèle. Par contre, le modèle ne reproduit pas le caractère perdant du Hoyoux en amont de la station de jaugeage ST8. En aval de la station ST8, la partie du Hoyoux caractérisée comme étant en pseudo-équilibre lors du projet Synclin'Eau est modélisée comme étant perdante. Le modèle reproduit par contre correctement le caractère drainant de la partie aval du Hoyoux.
2. Le modèle reproduit le caractère drainant du Torrent de Bonne sur une majorité de son tracé amont, en accord avec les observations de terrain. D'après le modèle, le cours d'eau serait par contre drainant dans sa partie avale, après le changement d'orientation de sa direction

générale d'écoulement (du SO vers le NO) ce qui est globalement en accord avec la typologie des rivières définies dans le cadre du projet Synclin'Eau.

3. D'après les échanges modélisés, le ruisseau de Pailhe est majoritairement drainant. Seul un tronçon de rivière, situé à environ la moitié du tracé du cours d'eau, est perdant. D'après la typologie des rivières tirée de Synclin'EAU, l'extension de la partie perdante du ruisseau de Pailhe devrait être supérieure au résultat modélisé.
4. Le modèle reproduit correctement le caractère drainant de l'amont du ruisseau de Vyle. Par contre, le caractère perdant de l'aval de ce ruisseau n'est pas représenté par le modèle.
5. Le modèle reproduit globalement les alternances des zones drainantes et perdantes du ruisseau du Lilot.

Les interactions nappes-rivières qui concernent le ruisseau du Triffois peuvent être modélisées de manière plus précise vu que cette zone a été discrétisée plus finement et la calibration plus poussée. Selon les résultats du modèle, la partie la plus en amont du Triffois est drainante (Figure 21), avec des arrivées d'eau d'un peu plus 30 l/s sur l'ensemble de la portion de rivière. La section suivante dans le sens de l'écoulement, comprise entre l'amont de Goesne et la station de jaugeage de Jamagne (ST4), est perdante d'après le modèle. Le flux infiltré depuis la rivière vers la nappe est toutefois assez faible, de l'ordre de 5 l/s. En aval de la station de Jamagne, le modèle prédit des arrivées d'eau significatives depuis la nappe vers la rivière, d'environ 110 l/s, entre la station ST4 et la station ST3. Entre les stations ST3 et ST2 ainsi qu'entre les stations ST2 et ST1, les échanges nappes-rivières modélisés sont de moindre importance, inférieurs à 10 l/s par tronçon. Ils sont de sens opposés entre les stations ST3 et ST2 (rivière drainante, apport depuis la nappe de 9 l/s) et entre les stations ST2 et ST1 (rivière perdante, débit infiltré de 2 l/s), si bien que le débit de base modélisé à l'exutoire du bassin du Triffois est fort proche du débit de base modélisé à la station ST3.

Dans le livrable 3.5, l'analyse des changements du débit médian mensuel observé entre les différentes stations de jaugeage du Triffois a permis d'estimer le sens et la valeur des échanges d'eau entre la rivière et la nappe pour chaque tronçon de rivière. Ces travaux avaient mis en évidence l'importance des arrivées d'eau souterraine en aval de la station ST4. Comme le montre la Figure 22, les valeurs de débits de base calculées par le modèle sont comprises dans l'intervalle de variation naturelle des échanges observés. Elles confirment donc la présence d'arrivées d'eau significatives depuis la nappe vers la rivière entre les stations de jaugeage ST4 et ST3. Pour rappel, les différences de débits observées au printemps et à l'été 2015 entre les stations ST3 et ST2 sont biaisées du fait de la mise en décharge complète du captage de Jamagne en aval de la station ST3. Ceci explique l'écart important, qui correspond au volume capté rejeté dans le cours d'eau (soit environ 0,07 l/s/m), entre les valeurs observées à cette période et les apports calculés par le modèle ou ceux observés à l'automne et à l'hiver 2014 (Figure 22).

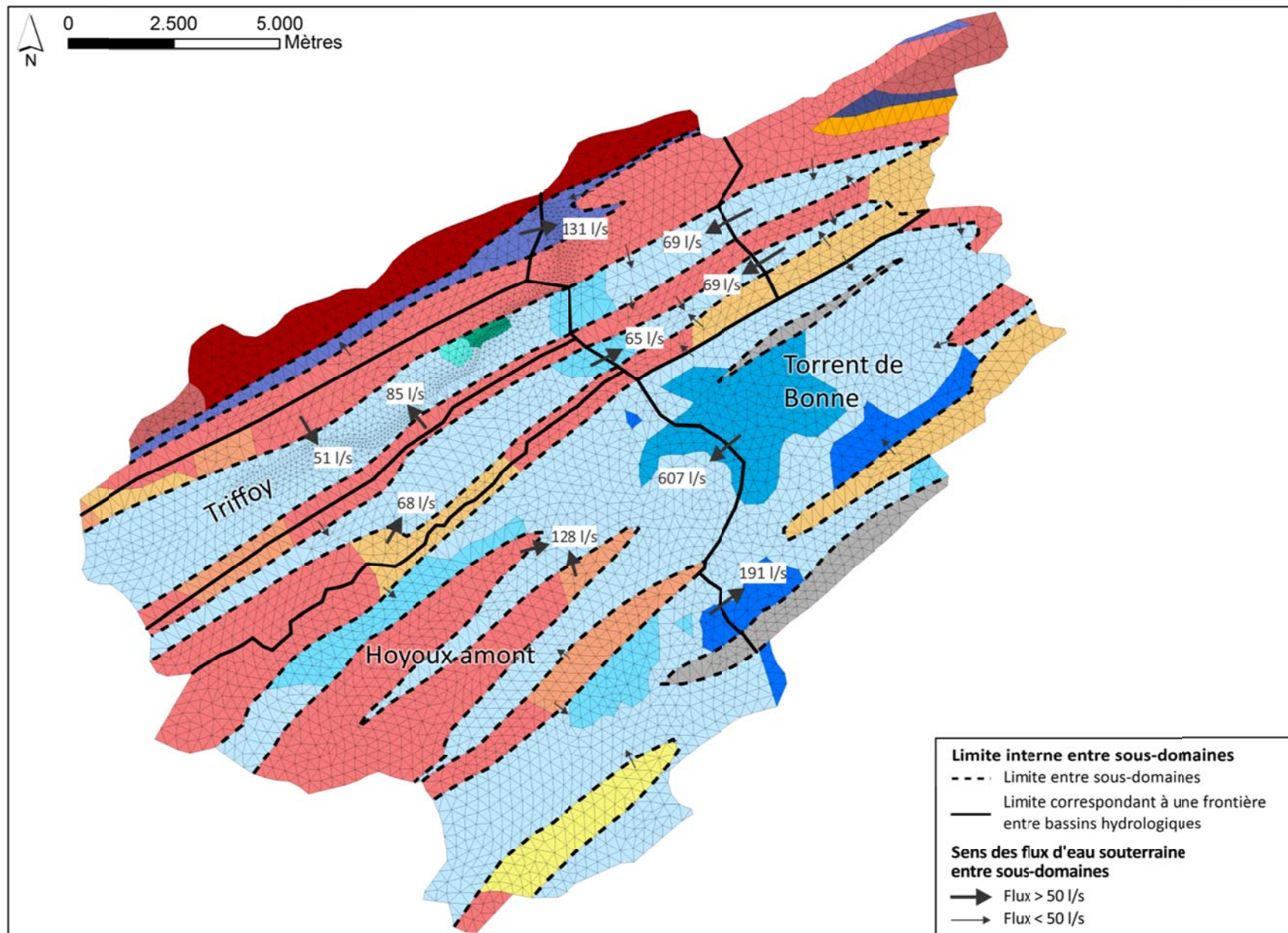


Figure 20 : Carte montrant le sens des échanges et les débits d'eau souterraine calculés par le modèle échangés entre sous-domaines. Les flux inférieurs à 10 l/s ne sont pas représentés.



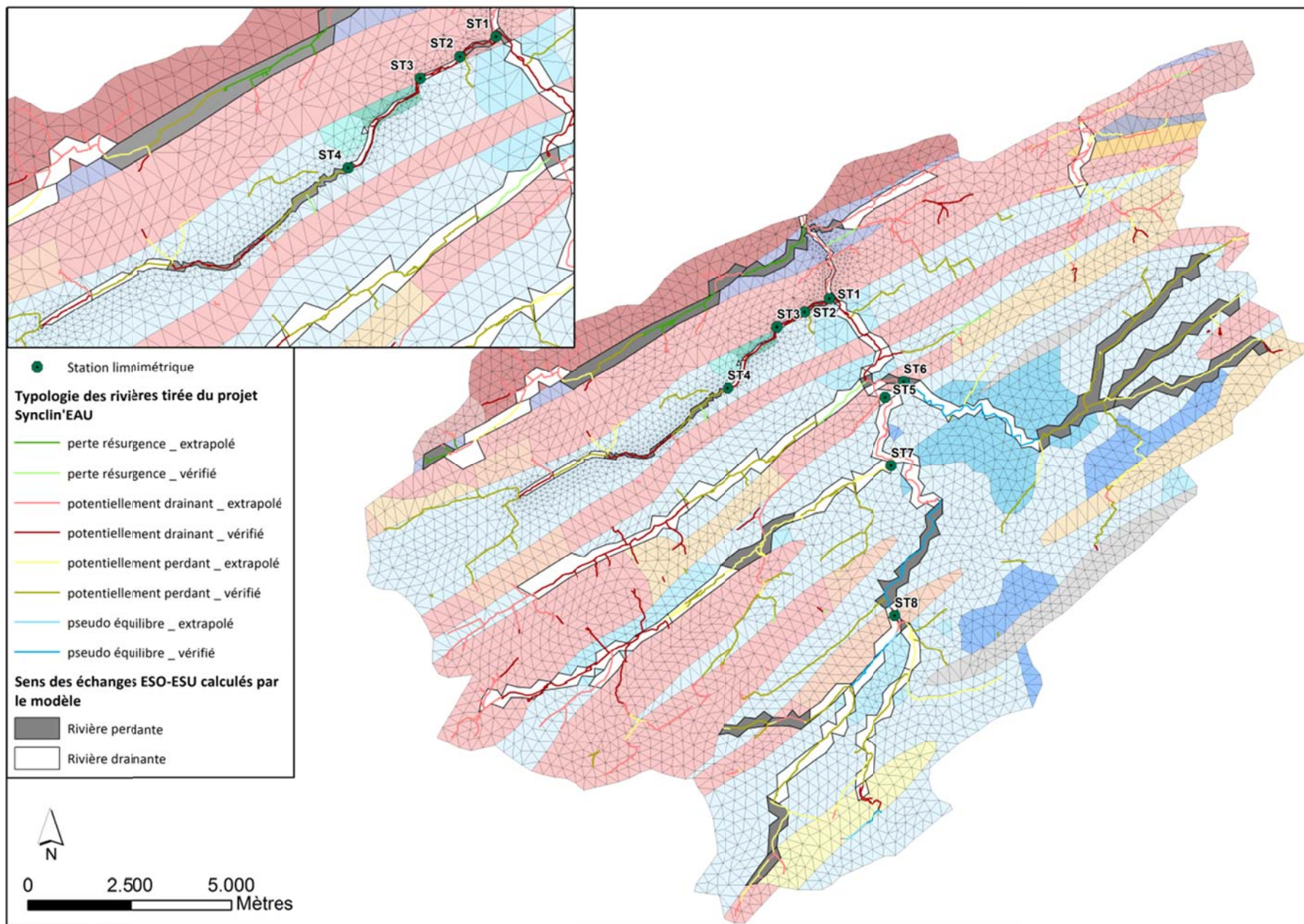


Figure 21 : Carte montrant le sens des échanges ESO-ESU calculés par le modèle et comparaison avec la typologie tirée du projet Synclin'EAU

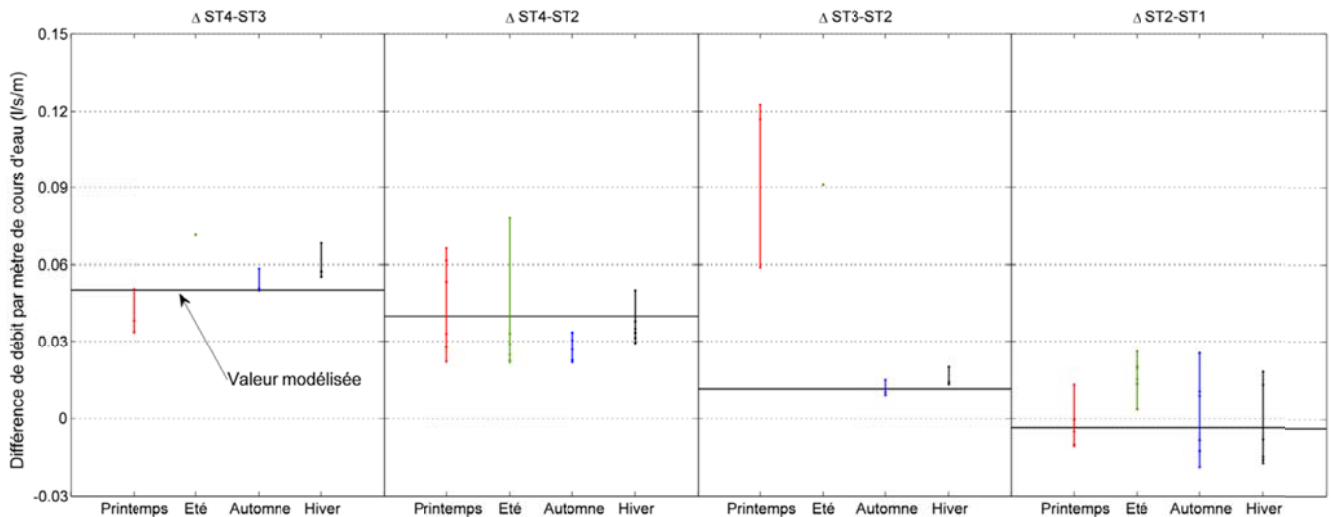


Figure 22 : Différences de débits médians mensuels par mètre de cours d'eau observés entre 2013 et 2015 entre les stations de jaugeage du Triffois et comparaison avec la valeur calculée par le modèle.

## 4 Conclusion

L'objectif du modèle développé dans l'activité "modélisation hydrogéologique" du projet ESO-ESU est de développer un outil de prédiction robuste de l'état quantitatif et qualitatif des eaux souterraines, en tenant particulièrement compte des interactions entre les eaux souterraines (ESO) et les eaux de surface (ESU) pour les bassins étudiés dans le cadre du projet. A cette fin, un modèle physiquement basé et spatialement distribué simulant les écoulements et le transport de solutés a été développé pour le bassin du Hoyoux (limité à la masse d'eau souterraine RWM021). Basé sur le modèle développé pour la masse d'eau souterraine RWM021 dans le cadre du projet Synclin'EAU, des améliorations ont été apportées à ce nouveau modèle dans l'objectif d'améliorer la représentation des interactions nappes-rivières et des écoulements dans la partie superficielle et altérée du sous-sol. Ces améliorations consistent notamment en une réduction de la zone modélisée, qui se concentre sur le bassin du Hoyoux, pour lequel des connaissances nouvelles ont été acquises dans les tâches connexes de la convention, ainsi que l'utilisation d'un maillage plus fin divisé en cinq couches horizontales.

Les résultats des premiers travaux de calibration, effectués en régime permanent, montrent que le modèle reproduit de manière satisfaisante la piézométrie observée, les échanges souterrains entre les sous-bassins versants de la zone étudiée et les interactions nappes-rivières. Concernant les échanges nappes-rivières, le ruisseau du Triffois a fait l'objet d'une attention particulière lors de la calibration du modèle. Les résultats obtenus par la modélisation ont, de cette manière, reproduit les apports d'eau souterraine observés entre les différentes stations de jaugeage installées le long du cours d'eau et explicités dans le livrable D3.5.

La prochaine étape de travail consistera à calibrer le modèle d'écoulement en régime transitoire de manière à reproduire les fluctuations piézométriques et des débits de base telle qu'observées sur le terrain. Ensuite, le modèle sera utilisé pour reproduire les tendances sur le long terme des concentrations en nitrate dans les eaux souterraines observées mais également les fluctuations

saisonnères des concentrations en nitrate observées dans la nappe et le débit de base. Différents scénarii notamment d'intrants de polluant, comme le nitrate, pourront ensuite être simulés afin d'évaluer l'évolution qualitative des eaux souterraines et leur influence sur la qualité des eaux de surface.

## 5 Bibliographie

**Brouyère S.** (2001) : Etude et modélisation du transport et du piégeage des solutés en milieu souterrain variablement saturé. Evaluation des paramètres hydrodispersifs par la réalisation et l'interprétation d'essais de traçage in situ. *Thèse de doctorat*, Université de Liège.

**Brouyère S., Orban P., Corbeau H., Dachy M., Gradin N. et Dassargues A.** (2004) : PIRENE (Programme Intégré de Recherche Environnement Eau) - Partim eaux souterraines - Rapport final. *Aquapôle*, 103p.

**Brouyère S., Orban P., Wildemeersch S., Couturier J., Gardin N. et Dassargues A.** (2009) :! The Hybrid Finite Element Mixing Cell Method: A New Flexible Method for Modelling Mine Ground Water Problems. *Mine Water and the Environment*, 28:102-114.

**Henriksen H.J., Troldborg L., Nyegaard P., Sonnenborg T.O., Refsgaard J.C., Madsen B.** (2003) : Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark. *Journal of Hydrology*, 280:52-71.

**Leroy M., Couturier J., Orban P., Brouyère S. et Dassargues A.** (2010a) : Délivrable D6.2 - Travaux de calibration et validation des modèles d'écoulement et transport de solutés développés pour les trois masses d'eau souterraine RWM011, RWM012 et RWM021. *Convention RW et SPGE – AQUAPOLE : Caractérisation hydrogéologique et support à la mise en œuvre de la Directive Européenne 2000/60 sur les masses d'eau souterraine en Région Wallonne*. 124p.

**Leroy M., Couturier J., Orban P., Brouyère S. et Dassargues A.** (2010b) : Délivrable D6.3 - Travaux de valorisation complémentaire des modèles d'écoulement et transport de solutés développés pour les trois masses d'eau souterraine RWM021, RWM012 et RWM011. *Convention RW et SPGE – AQUAPOLE : Caractérisation hydrogéologique et support à la mise en œuvre de la Directive Européenne 2000/60 sur les masses d'eau souterraine en Région Wallonne*. 86p.

**Lorenzini G., Brouyère S., Orban P. et Dassargues A. Délivrable** (2008a) : Délivrable D6.0 - Note méthodologique relative à la modélisation hydrogéologique des masses d'eau souterraine RWM 011, RWM 012 et RWM 021 (aspects quantitatifs et qualitatifs). *Convention RW et SPGE – AQUAPOLE : Caractérisation hydrogéologique et support à la mise en œuvre de la Directive Européenne 2000/60 sur les masses d'eau souterraine en Région Wallonne*. 26p.

**Lorenzini G., Brouyère S., Orban P. et Dassargues A. Délivrable** (2008b) : Délivrable D6.1 - Description du modèle conceptuel des trois masses d'eau souterraine RWM011, RWM012 et RWM021 concernées par les activités du WP6 . *Convention RW et SPGE – AQUAPOLE : Caractérisation hydrogéologique et support à la mise en œuvre de la Directive Européenne 2000/60 sur les masses d'eau souterraine en Région Wallonne*. 32p.

**Orban P., Brouyère S., Batlle-Aguilar J., Couturier J., Goderniaux P., Leroy M., Maloszewski P. et Dassargues A.** (2010) : Regional transport modelling for nitrate trend assessment and forecasting in a chalk aquifer. *Journal of Contaminant Hydrology*, 118(1–2):79-93



**Pobanz K., Renouf E., Sauquet E. et Lang M. (2008) :** Extrapolation des courbes de tarage en crue par modélisation hydraulique. *Congrès SHF - 30èmes journées de l'hydraulique : "Mesures hydrologiques et incertitudes"*. 10p.

## 6 Annexe

Tableau 4 : Paramètres des conditions aux frontières externes de Fourier. Les profils associés sont localisés sur la Figure 7.

ID frontière	$\alpha$ (s <sup>-1</sup> )	H <sub>ref</sub> (m)	ID frontière	$\alpha$ (s <sup>-1</sup> )	H <sub>ref</sub> (m)
1	1×10 <sup>-5</sup>	253	22	1×10 <sup>-5</sup>	280
2	1×10 <sup>-7</sup>	251.5	23	1×10 <sup>-5</sup>	260
3	1×10 <sup>-7</sup>	250	24	1×10 <sup>-7</sup>	265
4	1×10 <sup>-5</sup>	243	25	1×10 <sup>-7</sup>	270
5	1×10 <sup>-6</sup>	265	26	1×10 <sup>-7</sup>	270
6	1×10 <sup>-6</sup>	265	27	1×10 <sup>-7</sup>	275
7	1×10 <sup>-5</sup>	284.5	28	1×10 <sup>-5</sup>	250
8	1×10 <sup>-6</sup>	290	29	1×10 <sup>-6</sup>	255
9	1×10 <sup>-6</sup>	290	30	1×10 <sup>-5</sup>	250
10	1×10 <sup>-6</sup>	285	31	1×10 <sup>-6</sup>	250
11	1×10 <sup>-6</sup>	280	32	1×10 <sup>-6</sup>	250
12	1×10 <sup>-5</sup>	260	33	1×10 <sup>-7</sup>	250
13	1×10 <sup>-6</sup>	290	34	1×10 <sup>-7</sup>	250
14	1×10 <sup>-6</sup>	300	35	1×10 <sup>-6</sup>	245
15	1×10 <sup>-6</sup>	290	36	1×10 <sup>-5</sup>	230
16	1×10 <sup>-5</sup>	290	37	1×10 <sup>-5</sup>	240
17	1×10 <sup>-6</sup>	288	38	1×10 <sup>-6</sup>	230
18	1×10 <sup>-5</sup>	288	39	1×10 <sup>-6</sup>	205
19	1×10 <sup>-5</sup>	290	40	1×10 <sup>-6</sup>	186
20	1×10 <sup>-5</sup>	275	41	1×10 <sup>-6</sup>	200
21	1×10 <sup>-5</sup>	270	42	1×10 <sup>-5</sup>	207.5