



**Geo<sup>3</sup>-Hydrogéologie - Département ArGENCo**  
(Architecture, Géologie, Environnement & Constructions)

Université de Liège

## 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

---

#### *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

**Auteurs** : M. Leroy, J. Couturier, Ph. Orban, S. Brouyère, A. Dassargues

## Table des matières

1	Introduction .....	4
2	Spatialisation des flux entre sous-bassins et entre les eaux souterraines et les eaux de surface .....	6
2.1	Introduction .....	6
2.2	Bilans hydrogéologiques calculés à l'aide du code SUFT3D .....	7
2.2.1	Bilan hydrogéologique du bassin du Houyoux (RWM011).....	8
2.2.2	Bilan hydrogéologique du bassin de l'Orneau (RWM011) .....	14
2.2.3	Bilan hydrogéologique du bassin hydrologique du Hoyoux (RWM021) .....	18
2.3	Interactions eaux souterraines - eaux de surface (ESO-ESU).....	23
2.3.1	Masse d'eau souterraine RWM021 .....	24
2.3.2	Masse d'eau souterraine RWM011 .....	35
3	Simulations relatives à l'évolution des concentrations en nitrate .....	38
3.1	Introduction .....	38
3.2	Concentrations en nitrate calculées dans le débit de base de quelques rivières .....	38
3.3	Utilisation des résultats du modèle EPICgrid sur le bassin du Néblon .....	44
3.3.1	Intégration des données EPICgrid sur le bassin du Néblon .....	45
3.4	Prédiction des évolutions des concentrations en nitrate dans le bassin du Néblon pour deux scénarios simplifiés d'intrant en nitrate .....	61
4	Conclusions .....	66
	Annexe 1 : Modifications apportées au code de calcul SUFT3D .....	69
	Annexe 2 : Résultats des nouvelles calibrations apportées aux modèles représentant les masses d'eau souterraines RWM011 et RWM021 .....	71
	Modèle de la masse d'eau souterraine RWM011 .....	71
	Modèle de la masse d'eau souterraine RWM021 .....	78
	Annexe 3: Modifications apportées au maillage des masses d'eau RWM021 et RWM011. ...	83
	Annexe 4 : Bilan hydrogéologique du bassin du Bocq .....	85



# 1 Introduction

Le Work Package 6 (WP6) du projet Synclin'EAU porte sur le développement de modèles hydrogéologiques simulant les écoulements et le transport de solutés en Région Wallonne, ces aspects sont considérés dans le cadre de la mise en œuvre de la Directive Cadre Européenne 2000/60 (DCE) et la Directive Fille Eau Souterraine (DFES). A la fin du projet, en mai 2010, trois modèles régionaux opérationnels avaient été développés pour les masses d'eau souterraine RWM021, RWM011 et RWM012. Néanmoins, quelques questions restaient en suspend, notamment concernant le calcul des flux échangés entre sous-bassins.

Il a été convenu en accord avec la SPGE et la DGARNE de poursuivre, à budget global inchangé les travaux d'exploitation de ces modèles. En date du 10/08/2010, une réunion de travail a été tenue dans les locaux de la DGARNE en vue de définir les tâches à réaliser. Il a été convenu que les travaux porteraient sur :

- la spatialisation des flux échangés entre sous-bassins et entre les eaux souterraines et les eaux de surface et plus particulièrement sur :
  - une actualisation du calcul des bilans, spécialement focalisée sur le bassin du Hoyoux (RWM021) et la zone Est de la masse d'eau souterraine RWM011;
  - une généralisation du calcul des flux échangés entre sous bassins hydrologiques et entre eaux de surfaces et eaux souterraines (interactions ESO-ESU) ;
- l'amélioration des simulations relatives à l'évolution des concentrations en nitrate et notamment :
  - le calcul des concentrations en nitrates dans le débit de base alimentant quelques cours d'eau étudiés ;
  - une amélioration des prédictions du modèle actuel pour le bassin hydrologique du Néblon via une meilleure représentation de l'intrant nitrate. Le modèle EPICgrid développé par l'unité d'Hydrologie et d'Hydraulique Agricole de Gembloux Agro-Bio Tech permet d'avoir accès, à une profondeur fixée, à la teneur en nitrate de l'eau s'infiltrant sous la couche racinaire. Il a donc été demandé d'intégrer les résultats de ce modèle dans le modèle eau souterraine.
  - une identification des temps de transfert dans la zone non saturée des aquifères modélisés et du temps de réponse du système aquifère à une modification des pratiques agricoles.

Ces nouveaux développements ont nécessité l'adaptation du code de calcul, des maillages et de nouveaux travaux de calibration. Conformément aux attentes de la DGARNE et de la

SPGE, les efforts ont donc été focalisés sur la masse d'eau souterraine RWM021 et l'Est de la masse d'eau souterraine RWM011 pour la simulation des écoulements est sur le bassin du Néblon pour la simulation du transport de nitrate.

Ce rapport reprend séquentiellement les résultats obtenus pour les thématiques 'spatialisation des flux échangés' et 'simulations relatives à l'évolution des concentrations en nitrate' pour les zones définies lors de la réunion du 10 août 2010. Pour ne pas alourdir le texte, les développements apportés au code SUFT3D, les modifications apportées aux maillages et les nouveaux travaux de calibration sont présentés en annexe 1 à 3.

## 2 Spatialisation des flux entre sous-bassins et entre les eaux souterraines et les eaux de surface

### 2.1 Introduction

D'un point de vue quantitatif, la majeure partie des travaux réalisés durant cette dernière phase du projet se focalise sur le calcul des flux d'eau échangés entre bassins hydrographiques et entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Les calculs des bilans en eau se faisant, au sein du code SUFT3D par sous-domaines, il a été nécessaire d'adapter le découpage correspondant des masses d'eau souterraine à modéliser. Logiquement, le découpage en sous-domaines<sup>1</sup> tel que réalisé au début du projet Synclin'eau était, en effet, principalement basé sur les bassins hydrogéologiques et donc sur les différences de lithologies. Il ne prenait donc pas totalement en compte les limites des bassins hydrologiques. Pour pouvoir évaluer précisément les flux échangés entre sous-bassins hydrologiques, un découpage plus fin a été effectué de manière à faire coïncider des limites de sous-domaines avec toutes les frontières des bassins hydrologiques. Les conditions limites internes imposées entre sous-domaines faisant partie d'une même entité géologique (par exemple, un même synclinal calcaire) sont des conditions internes de type I (condition de Dirichlet)<sup>2</sup>.

Ce travail de découpage a été réalisé pour l'ensemble des masses d'eau souterraine RWM011 et RMW021. Le nombre de sous-domaines pour les masses d'eau RWM021 et RWM011 est ainsi passé respectivement de 38 à 75 et de 25 à 30, ceci dans le but de circonscrire le plus précisément possible les limites de certains bassins hydrologiques qui les composent et de calculer les échanges d'eau et de polluants à travers ces limites communes. Un exemple de découpage est proposé pour le bassin du Hoyoux à la Figure 1. En Annexe 2 sont présentés les détails relatifs au découpage des autres bassins pour lesquels le nombre de sous-domaines a été augmenté.

---

<sup>1</sup> Pour des détails complémentaires sur le découpage en sous-domaines et les choix conceptuels s'y rapportant, le lecteur est invité à se référer au deliverable 6.1.

<sup>2</sup> Pour des détails complémentaires sur les différents types de conditions frontières et les choix conceptuels s'y rapportant, le lecteur est invité à se référer au deliverable 6.1.

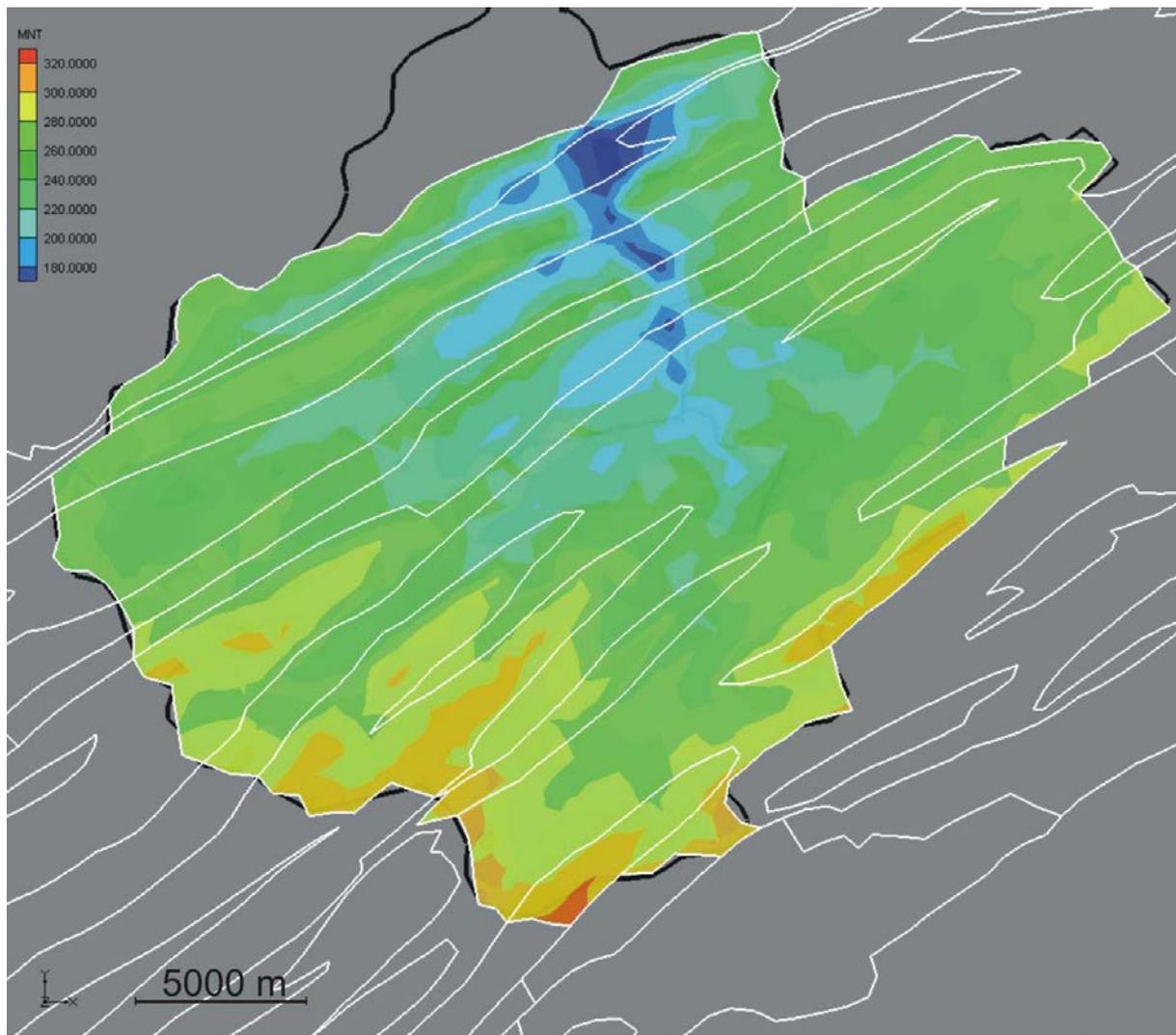


Figure 1 : Localisation des 15 sous-domaines (délimités par des traits blancs) composant la partie du modèle régional représentant le bassin hydrologique du Hoyoux -Masse d'eau RWM021

## 2.2 Bilans hydrogéologiques calculés à l'aide du code SUFT3D

Les travaux de modélisation ont en partie porté sur le calcul, à l'aide du code SUFT3D, de bilans hydrogéologiques pour quelques bassins et zones sélectionnés en concertation avec la DGARNE.

Pour la masse d'eau RWM011, les bassins hydrologiques sélectionnés font partie d'entités hydrologiques plus vastes telles que les bassins de la Sambre, de la Meuse et de la Mehaigne. Il est difficile de réaliser des bilans hydrologiques complets sur les bassins de cette masse d'eau. Nous présentons donc :

1. Une actualisation du calcul des flux d'eau souterraine échangés dans le bassin du Houyoux. Les anciennes mines de Vedrin sont utilisées par VIVAQUA pour capter des eaux à 130 mètre de profondeur. L'impact de ces captages sur la piézométrie régionale et sur la répartition des flux d'eau souterraine au sein de la nappe aquifère des calcaires carbonifères est modélisé.

2. Une étude du bassin de l'Orneau. Les flux échangés avec le sous-bassin de la Ligne et les transferts d'eau souterraine depuis les lentilles sableuses du Bruxellien sont également étudiés.

Pour la masse d'eau RWM021, les bilans des bassins du Hoyoux et du Bocq sont présentés et discutés en détail.

L'ensemble des résultats présentés a été calculé en régime permanent pour des sollicitations moyennes correspondant à celles de l'année 2006 à l'aide des modèles tels qu'obtenus après leur calibration.

### **2.2.1 Bilan hydrogéologique du bassin du Houyoux (RWM011)**

La compagnie d'eau VIVAQUA capte à Vedrin les eaux d'une ancienne mine de pyrite via des galeries drainantes situées à 130 mètres de profondeur pour collecter une moyenne de 30000 m<sup>3</sup> par jour. La situation hydrogéologique de ce bassin est donc d'intérêt majeur.

Un rabattement de nappe important (Figure 2) est observé à proximité des galeries profondes de Vedrin (située à 100 mètres de profondeur). La formation des calcaires carbonifères a été redécoupée en sous-domaines indépendants pour étudier les échanges d'eau qui existent entre le bassin du Houyoux et les bassins environnants. La Figure 3 et le Tableau 1 associé présentent respectivement une cartographie et une quantification de ces échanges. Sur la Figure 3, les traits rouge représentent les limites du sous-bassin du Houyoux ainsi que les limites des sous-domaines définis pour ce bassin, les flèches 4, 5, 6, 7 et 8 figurant les flux à travers les frontières de ce sous-bassin, les flèches 1, 2 et 3 représentant les flux échangés entre les sous-domaines.

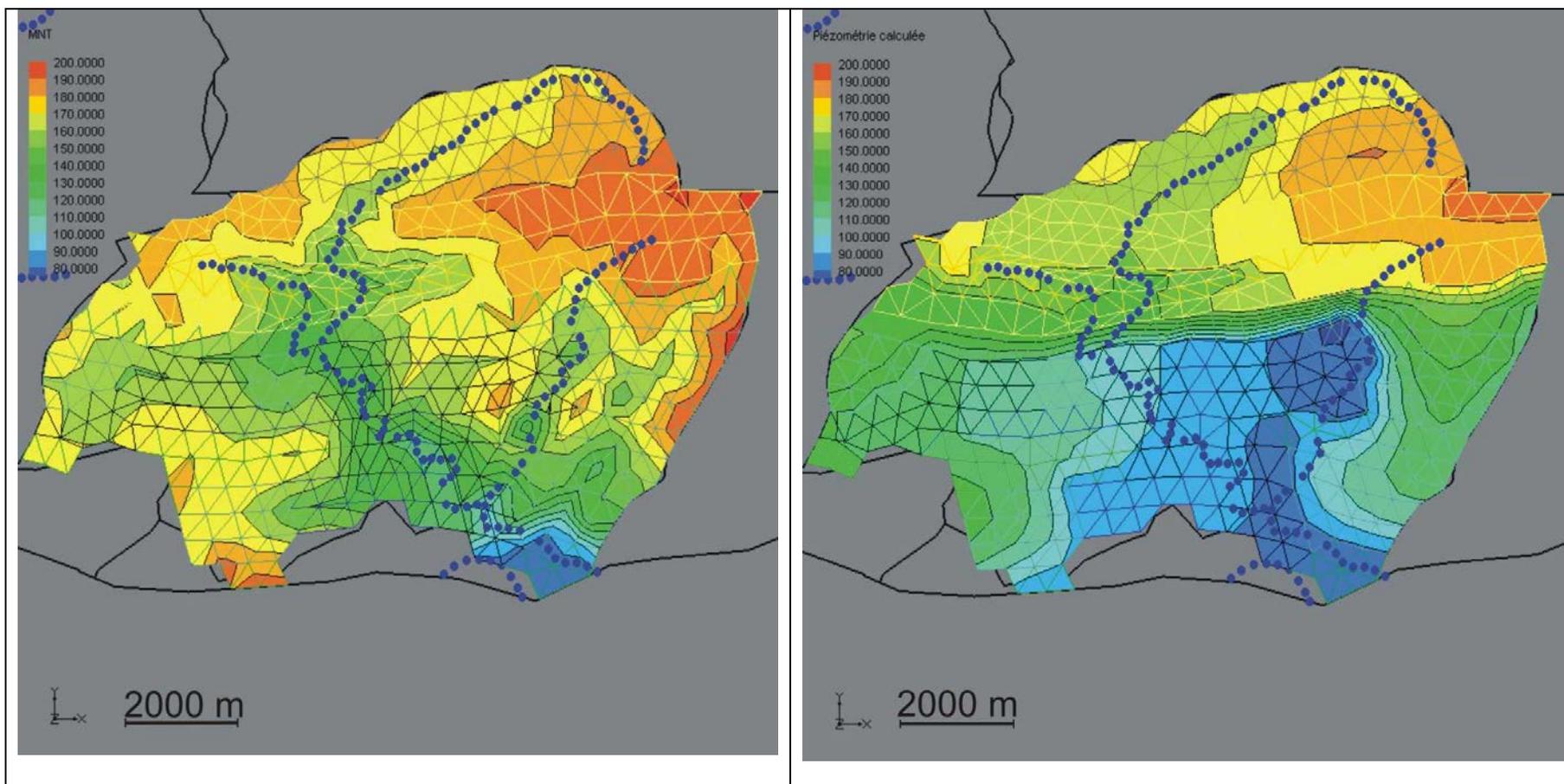


Figure 2 : MNT (gauche) et piézométrie calculée (droite) pour le modèle pour le bassin hydrologique du Houyoux (RWM011)

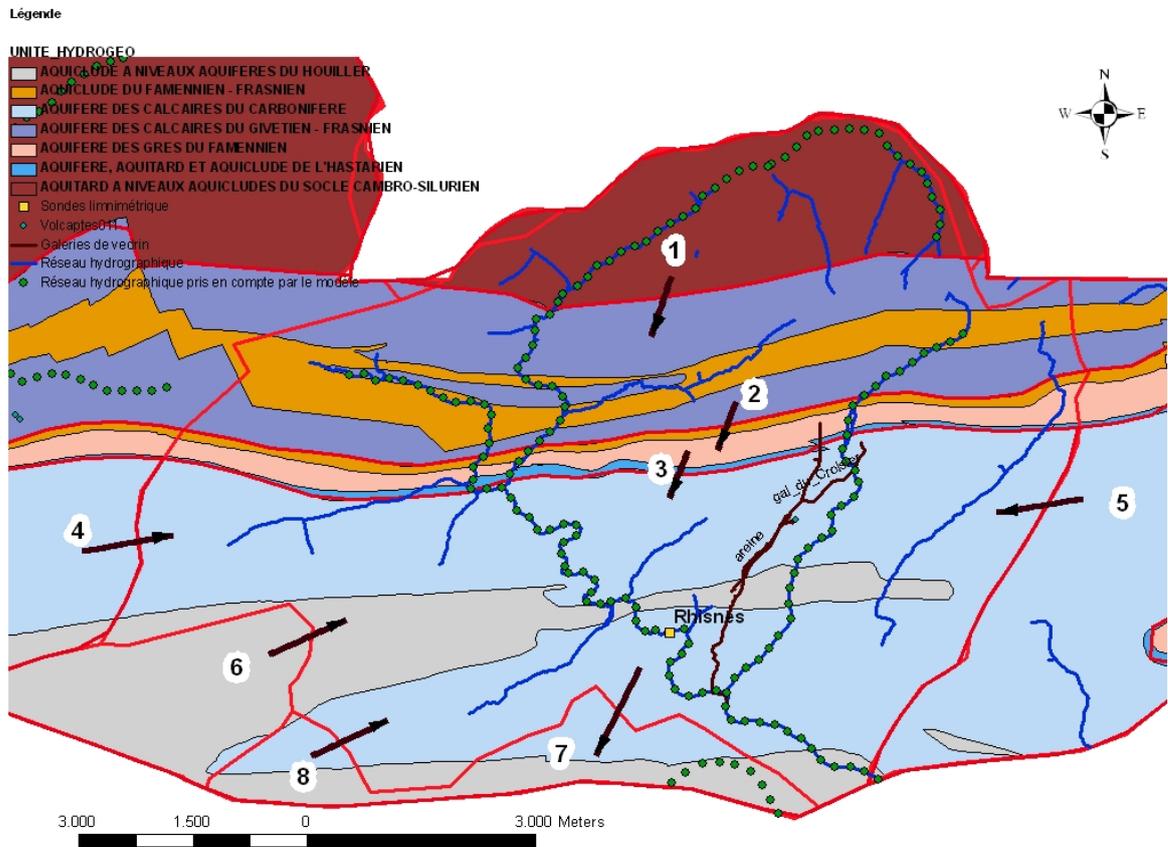


Figure 3: Carte des flux échangés - Bassin du Houyoux -RWM011

N° de la portion de frontière	Débit calculé par le modèle (m <sup>3</sup> /s)
1	0.007
2	0.043
3	0.043
4	0.044
5	0.036
6	0.032
7	0.072
8	0.006

**Tableau 1: Tableau des débits échangés entre les sous domaines du bassin du Houyoux et entre le bassin du Houyoux et les bassins voisins**

La première constatation est que le modèle montre un rabattement important de la nappe dans le bassin hydrologique du Houyoux. Ce rabattement, engendré par la dépression de vallée du Houyoux et l'important volume d'eau prélevé au captage de Vedrin (0.303 m<sup>3</sup>/s calculé), provoque un transfert d'eau des aquifères proches vers la zone de prélèvement. La simulation des écoulements met également en évidence un flux important orienté du Nord vers le Sud, depuis l'aquifère des calcaires du Givetien vers les calcaires du Carbonifère, à travers les grès du Famenien. Cet apport d'eau est de 0.043 m<sup>3</sup>/s. Les formations aquifères du Carbonifère situées aux alentours du bassin hydrologique apportent quant à elles environ 0.118 m<sup>3</sup>/s.

Une attention particulière a également été accordée au transfert d'eau entre la nappe et la rivière. Au vu des résultats synthétisés dans le Tableau 2, le Houyoux est perdant (-0.0928 m<sup>3</sup>/s) sur la formation des calcaires du Carbonifère en amont de la station limnimétrique de Rhisnes. Par contre, la contribution la plus significative au débit de base de cette rivière vient de l'aquifère du Givetien-Frasnien, situé plus en amont.

<b>Formations géologiques sous jacentes au tracé du Houyoux</b>	<b>Contribution au débit de base du Houyoux - Débits calculés par le modèle (m<sup>3</sup>/s)</b>
Aquitard à niveaux aquiclude du Cambro-Silurien	0.0227
Aquiclude du Famenien-Frasnien et aquifère des calcaires du Givetien Frasnien	0.1023
Aquifère des grès du Famenien	0.0013
Aquifère des calcaires carbonifères - Aquiclude des schistes du Houiller - AMONT DE RHISNES	-0.0928
Aquifère des calcaires carbonifères - Aquiclude des schistes du Houiller - AVAL DE RHISNES	0.0182

**Tableau 2: Tableau des débits nappe rivière échangés dans la vallée du Houyoux**

Dans l'optique d'approfondir la réflexion sur l'impact des captages de Vedrin, une simulation à été réalisée en supprimant (débit de pompage mis à zéro) la présence des galeries du captage. Le débit de base calculé au droit de la sonde de Rhisnes est dans ce cas de 0.046 m<sup>3</sup>/s au lieu de 0.034 m<sup>3</sup>/s, le Houyoux restant perdant sur la formation des calcaires carbonifères. Le débit d'eau entrant provenant de la frontière Est du bassin ((5) à la Figure 3) diminue légèrement pour ne plus valoir que 0.032 m<sup>3</sup>/s au lieu de 0.036 m<sup>3</sup>/s. Le débit d'eau Nord-Sud entrant via la frontière numéro 3 (Figure 3) ne vaut plus que 0.033 m<sup>3</sup>/s au lieu de 0.043 m<sup>3</sup>/s en présence des captages. Comme montré à la Figure 4, l'impact des captages de Vedrin sur la piézométrie semble localisé, se manifestant principalement dans l'aquifère des calcaires carbonifères. Ces résultats sont intéressants et montrent également que la piézométrie régionale dans ce type d'aquifère reste très dépendante de la topographie. Pour une étude d'impact plus détaillée et locale, il faut néanmoins affiner le coefficient d'échange nappe-rivière sur le Houyoux pour rendre les résultats plus fiables

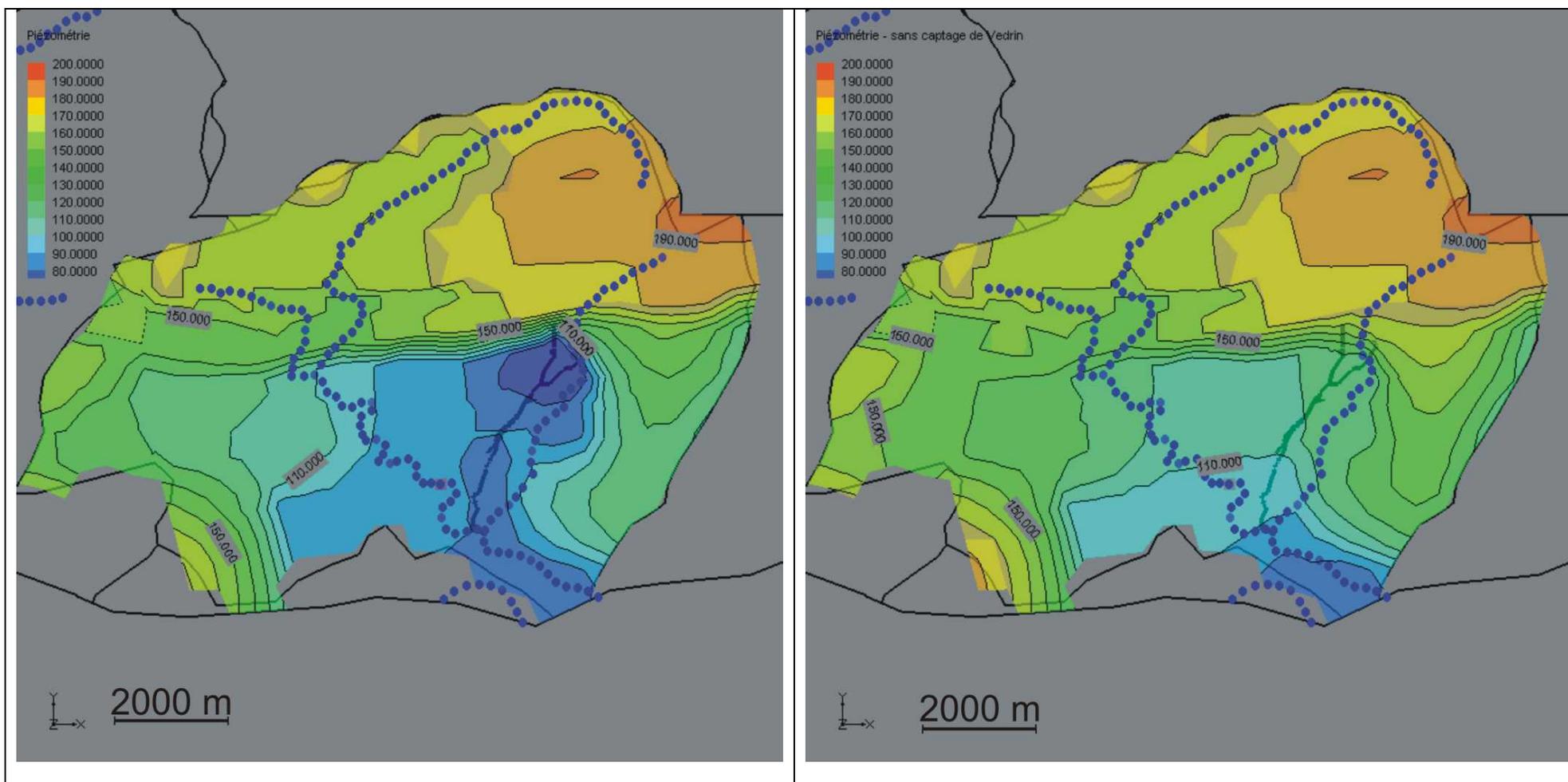


Figure 4: Piézométrie calculée avec ou sans prise en compte des galeries du captage de Vedrin. Visualisation de l'impact sur la piézométrie.

### 2.2.2 Bilan hydrogéologique du bassin de l'Orneau (RWM011)

Pour illustrer plus en avant les possibilités qu'offre l'approche régionale et le calcul de bilans par sous-domaines, le modèle développé pour la masse d'eau souterraine RWM011 a été utilisé pour calculer les flux d'eau souterraine échangés entre les formations géologiques du bassin de l'Orneau. Le bassin de l'Orneau est particulier puisqu'il présente en surface des sables du Bruxellien surmontant le socle paléozoïque.

La Figure 5 présente une cartographie schématique des flux échangés entre les différentes unités géologiques. Le Tableau 2 et le Tableau 3 présentent les débits d'eau souterraine échangés calculés en régime permanent.

Un important transfert vertical d'eau (Tableau 3) est prédit par le modèle entre la lentille sableuse située au Nord-Ouest de Saint Martin (Figure 5 – flèche n°9) et les formations du Givetien et du Famennien-Frasnien. Le modèle fait état d'un écoulement Nord-Sud depuis les sables situés plus au Nord vers l'aquitard du socle cambro-silurien (Figure 5 – flèche n°8).

Entre les formations du Paléozoïque, un débit d'eau important ( $1.388 \text{ m}^3/\text{s}$ ) est calculé à travers la frontière délimitant le bassin hydrologique de la Ligne et celui de l'Orneau dans les calcaires du Carbonifère (Figure 5 – flèche n° 4).

Légende

UNITE\_HYDROGEO

- AQUICLUDE A NIVEAUX AQUIFERES DU HOULLER
- AQUICLUDE DU FAMENNIEN - FRASNIEN
- AQUIFERE DES CALCAIRES DU CARBONIFERE
- AQUIFERE DES CALCAIRES DU GIVETIEN - FRASNIEN
- AQUIFERE DES GRES DU FAMENNIEN
- AQUIFERE, AQUITARD ET AQUICLUDE DE LHASTARIEN
- AQUITARD A NIVEAUX AQUICLUDES DU SOCLE CAMBRO-SILURIEN

- Sondes limnimétrique
- Réseau hydrographique
- Réseau hydrographique pris en compte par le modèle

3.000 1.500 0 3.000 Meters

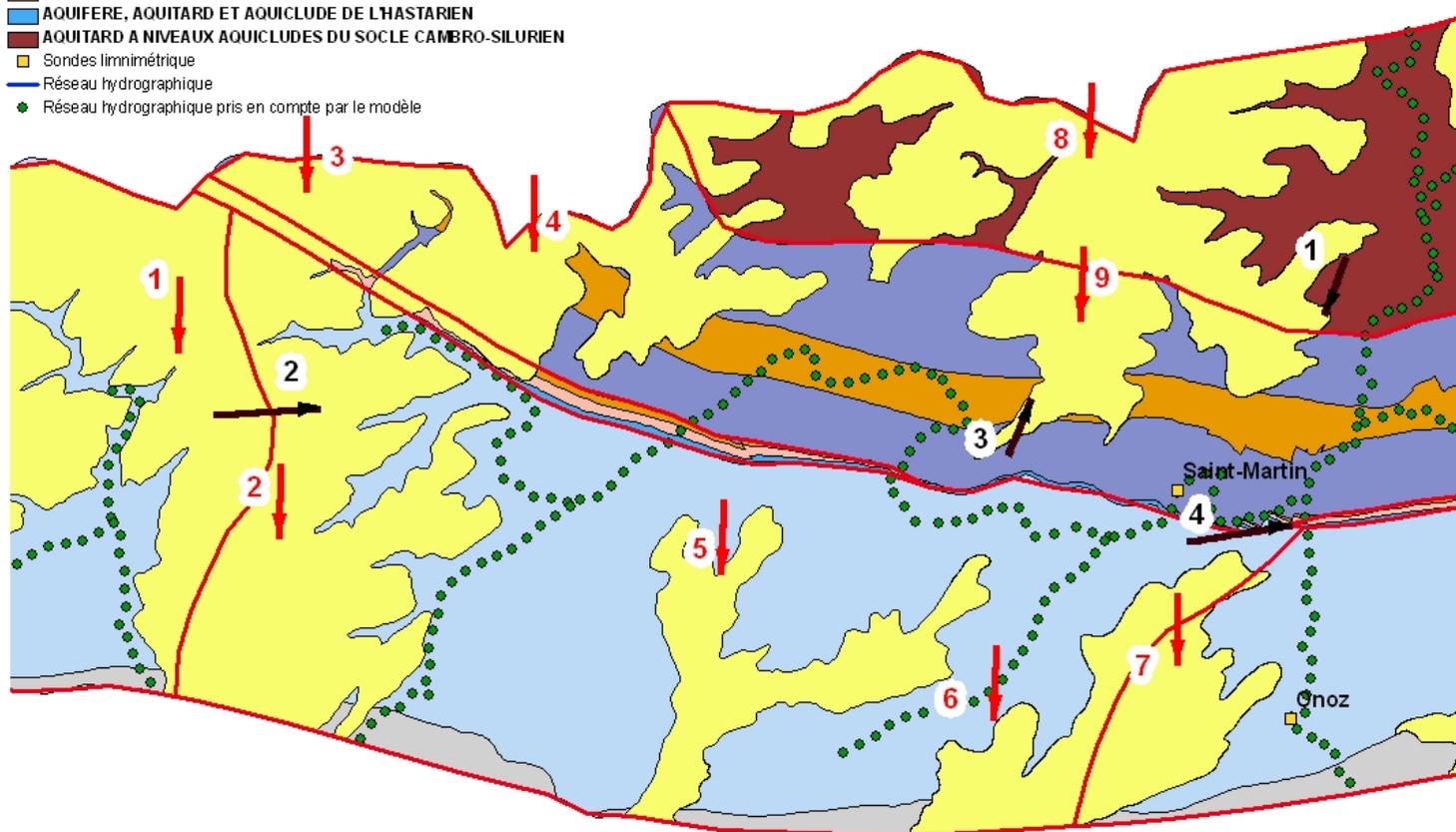


Figure 5: Flux échangés entre les différentes formations géologiques du bassin de l'Orneau (les flux verticaux transitant entre les formations sableuses et les formations du Paléozoïque sont schématisés en rouge, les flux transitant entre les sous-domaines définis au sein du Paléozoïque sont schématisés en noir.

<b>Portion de frontière à l'interface entre les formations sableuses du Bruxellien et les formations du Paléozoïque (n° de la flèche à la Figure 5)</b>	<b>Valeur du débit calculé par le modèle (m<sup>3</sup>/s)</b>
1	0.0866
2	0.0060
3	0.0031
4	0.0429
5	0.0288
6	0.0118
7	0.0331
8	0.0327
9	0.0583

**Tableau 3: Quantification des débits d'eau souterraine échangés entre les sables du Bruxellien et les formations du Paléozoïque dans le bassin de l'Orneau**

<b>Flux d'eau souterraine entre les formations du Paléozoïque (n° de la flèche à la Figure 5)</b>	<b>Valeur du débit calculé par le modèle (m<sup>3</sup>/s)</b>
1	0.0287
2	0.0583
3	0.0181
4	1.388

**Tableau 4: Quantification des flux d'eau souterraine échangés entre les différentes formations du Paléozoïques et les différents sous-bassins de l'Orneau**

La Figure 6 reprend une cartographie des rivières représentées par le modèle dans le bassin de l'Orneau. Les numéros de 1 à 5 pointent vers des portions de tracé de rivière (Ligne ou Orneau) sur une entité géologique. Les débits calculés échangés entre les eaux souterraines et les rivières (Tableau 5) montrent que l'Orneau est drainant sur l'entièreté du bassin situé sur la masse d'eau RWM011. Seule la Ligne, affluent de l'Orneau, est perdante sur la portion de son cours située au droit des calcaires du Carbonifère.

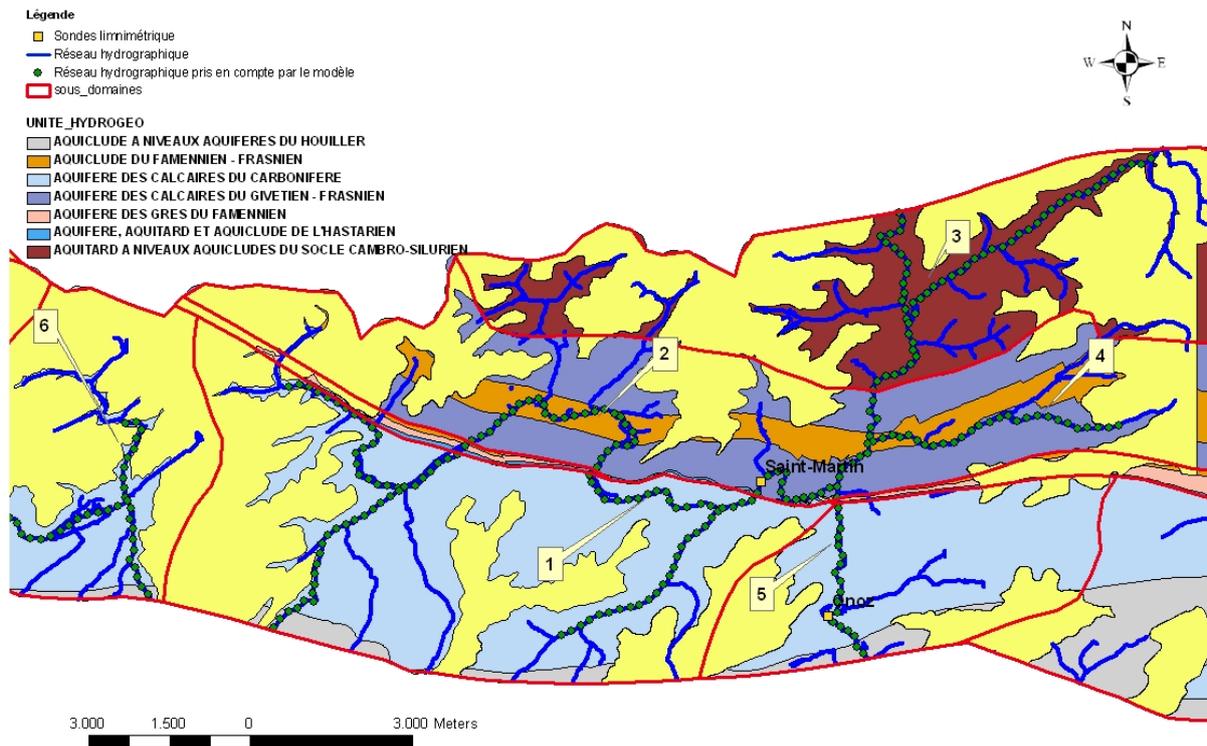


Figure 6: Tronçons de rivière pour lesquels les débits échangés entre les eaux souterraines et les eaux de surface sont repris au Tableau 5.

<b>Quantification des transferts ESO-ESU dans les bassins de la Ligne et de l'Orneau</b>	<b>Débit calculé par le modèle (m<sup>3</sup>/s)</b>
1 - Tracé de la Ligne en amont de la station limnimétrique Synclin'EAU de Saint Martin sur les formations calcaires du Carbonifère	-0.0371
2 - Tracé de la Ligne en amont de la station limnimétrique Synclin'EAU de Saint Martin sur les formations du Givetien et du Famennien-Frasnien	0.0720
3 - Tracé de l'Orneau sur le socle cambro-silurien	0.0891
4 - Tracé de l'Orneau sur les formations du Givetien et du Famenien Frasnien	0.1153
5 - Tracé de l'Orneau sur la formation des calcaires carbonifères	0.0880

Tableau 5: Quantification des flux d'eau souterraine échangés entre les nappes aquifères et la Ligne et l'Orneau

### 2.2.3 Bilan hydrogéologique du bassin hydrologique du Hoyoux (RWM021)

Le modèle développé pour la masse d'eau souterraine RWM021 permet de quantifier l'ensemble des flux d'eau souterraine transitant à travers les limites correspondant au bassin hydrologique du Hoyoux.

La piézométrie calculée ainsi que les directions d'écoulement sont représentées à la Figure 7. La conductivité hydraulique plus élevée attribuée aux calcaires favorise les gradients hydrauliques peu élevés (isopièzes espacées) contrairement aux gradients hydrauliques calculés dans les grès du Famennien (isopièzes rapprochées).

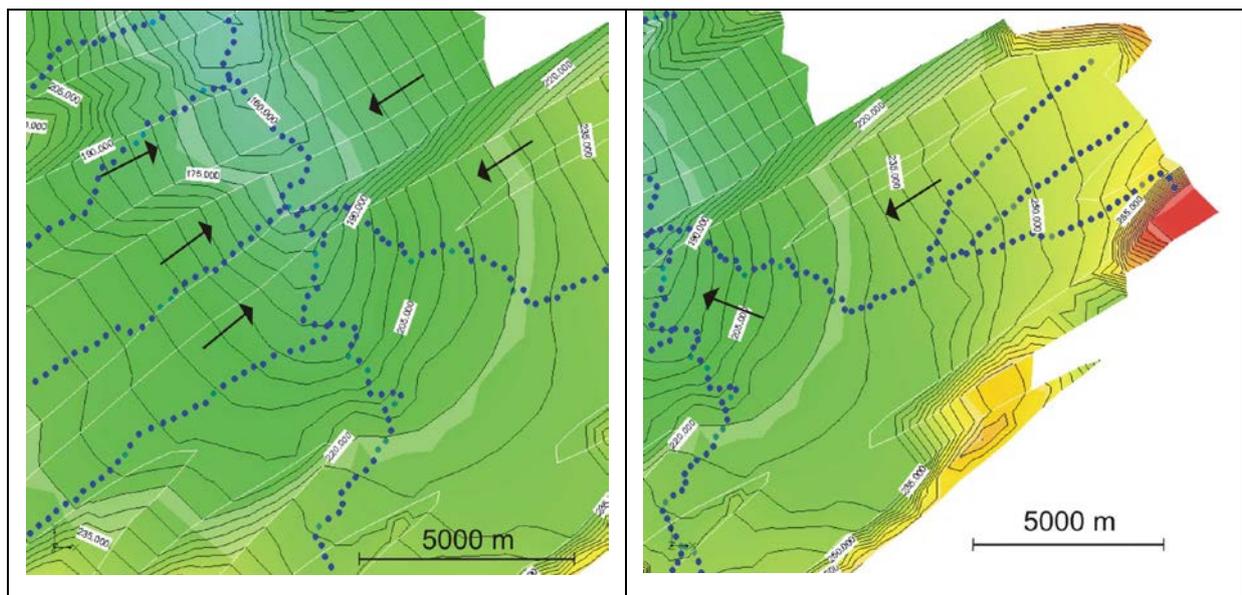
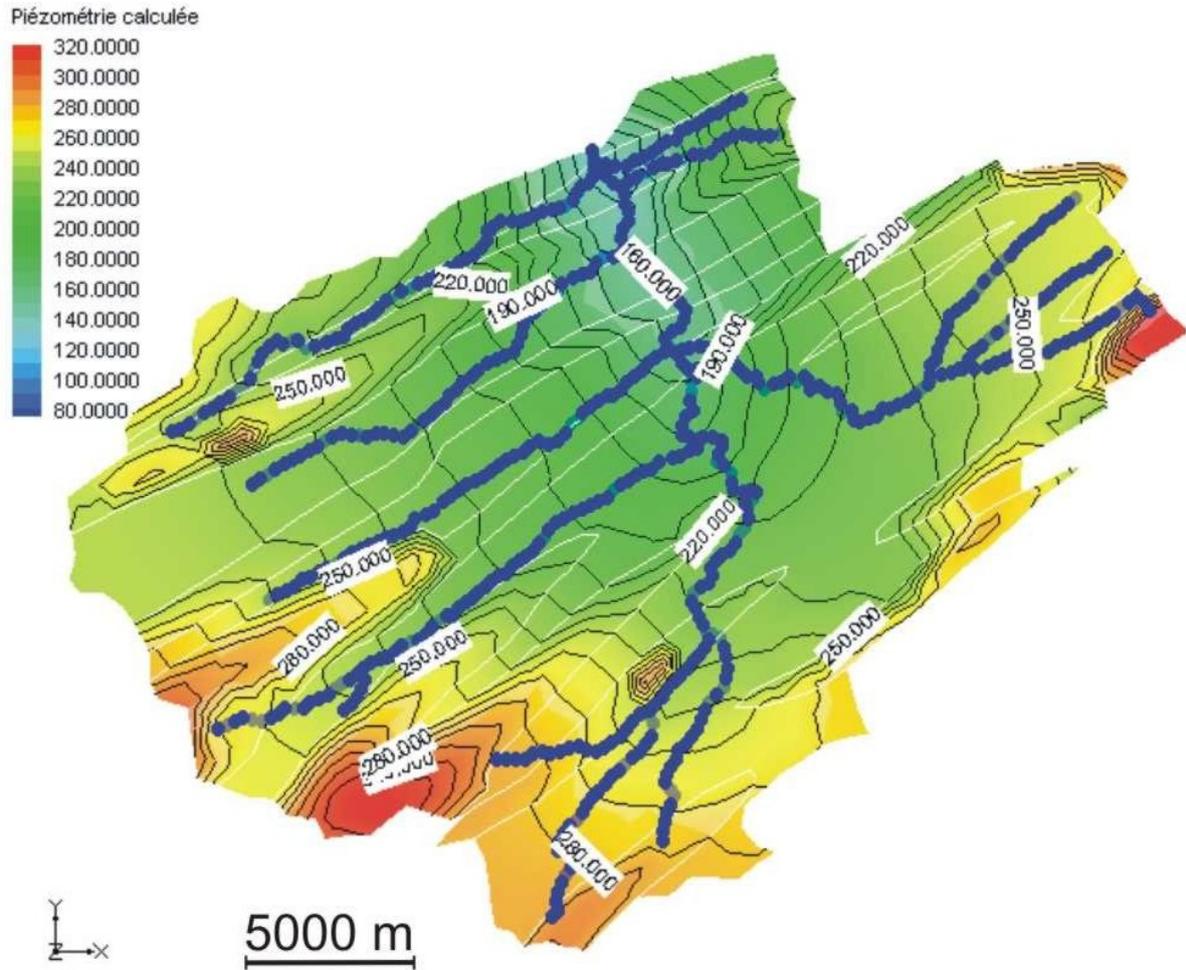


Figure 7 : Piézométrie détaillée du bassin du Hoyoux et sens d'écoulement des eaux souterraines.

La Figure 8 montre le bassin hydrologique du Hoyoux. Chaque flèche correspond à une portion de frontière du bassin au travers de laquelle un flux échangé a été calculé par le modèle. Le bassin admet à travers l'ensemble de ses frontières un flux net positif de 0.1123 m<sup>3</sup>/s (somme des débits entrants et sortants) ce qui est non négligeable au vue des débits mis en jeux à l'intérieur même du bassin (par exemple, 0.668 m<sup>3</sup>/s sont captés via les captages de VIVAQUA à Modave).

Les plus importants transferts d'eau souterraine se font via les synclinaux calcaires. Les deux transferts les plus importants entrant dans le bassin du Hoyoux se font au niveau des synclinaux de Vyle et de Triffoy au Nord Est du bassin en rive droite du Hoyoux (Figure 8, contribution respective de 0.0314 m<sup>3</sup>/s et 0.0544 m<sup>3</sup>/s).

Le bassin du Hoyoux est perdant dans le synclinal de Triffoy en rive gauche du Hoyoux (0.0035 m<sup>3</sup>/s) en direction de la vallée du Samson et dans sa partie la plus en amont vers le Sud de la vallée du Bocq (0.0300 m<sup>3</sup>/s). Il est par contre largement bénéficiaire vis à vis du Bocq dans sa partie aval et vis à vis du Néblon.

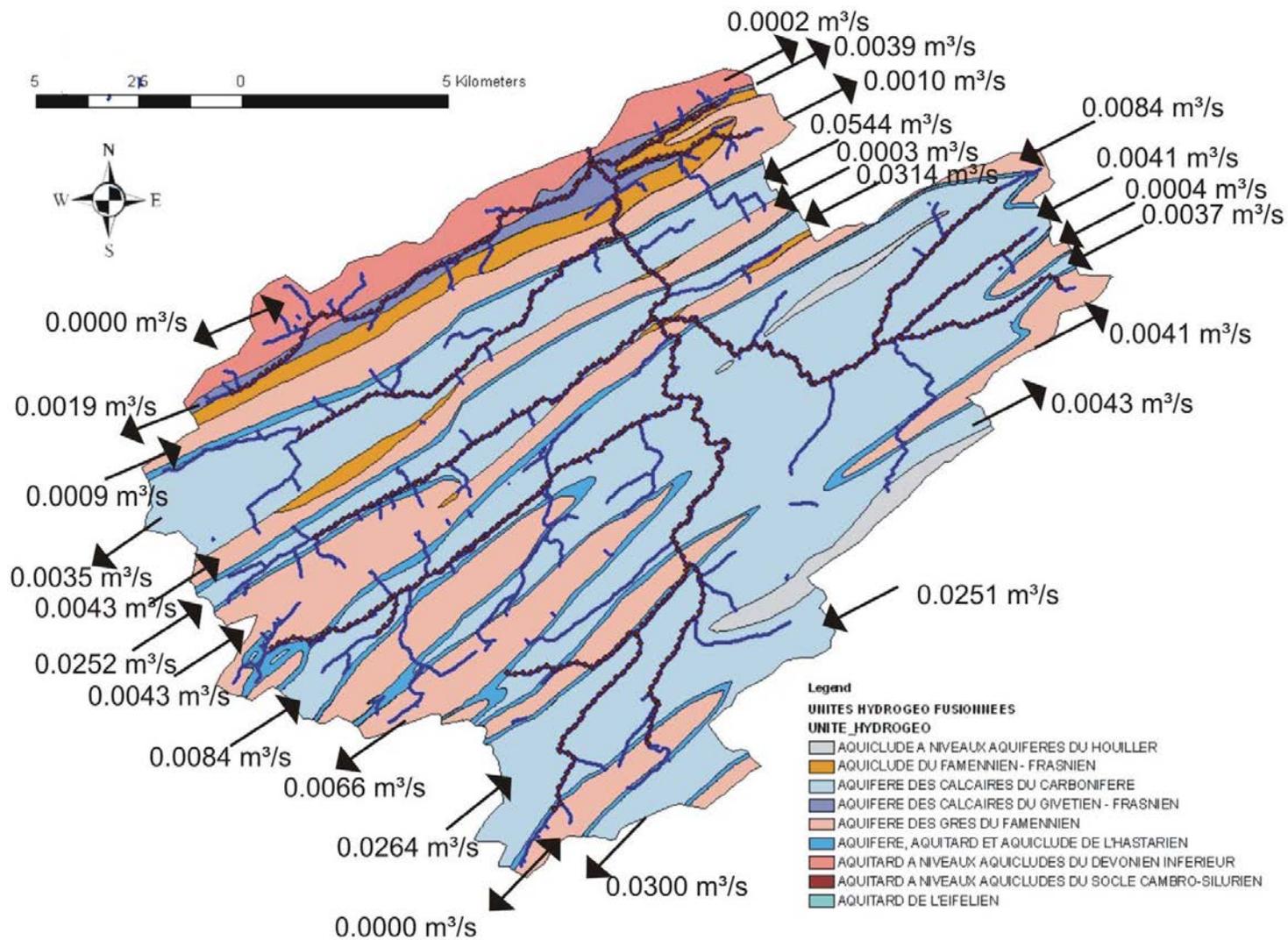


Figure 8 : Flux d'eaux souterraines échangés entre le bassin hydrologique du Hoyoux et ceux qui l'entourent

Un bilan a été également réalisé pour le bassin du Bocq. Les résultats sont fournis à l'Annexe 4.

### 2.3 Interactions eaux souterraines - eaux de surface (ESO-ESU)

Cette section est consacrée à une étude plus détaillée des résultats du modèle concernant les interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surfaces. Pour rappel, les interactions entre les eaux souterraines et le réseau de rivières sont prises en compte via des conditions de Fourier surfaciques appliquées aux faces supérieures des éléments finis (Délivrable D6.0).



Figure 9 : Prise en compte du réseau hydrographique sur le maillage du modèle (les nœuds jaunes représentent les nœuds définissant le réseau rivière ; les nœuds rouges les intersections entre le maillage et le réseau rivière). Pour chaque tronçon de rivière défini entre deux nœuds rouges, une condition aux frontières de type Fourier est appliquée à la face du maillage traversée par ce tronçon

Un des atouts de la méthode HFEMC développée par le service d'Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement de l'Université de Liège est qu'elle permet d'avoir un accès direct au débit d'eau souterraine net à travers n'importe quelle surface où est définie une condition limite externe de type Fourier.

La quantification et la localisation des interactions entre les nappes d'eau souterraine et le réseau hydrographique de surface sont primordiales dans un souci de gestion globale de la ressource. Dans les modèles, ces interactions sont calculées au niveau de la maille. Si un flux net positif (vers la rivière) traverse la face supérieure des éléments du modèle, une couleur verte est attribuée à la maille. Cette couleur désigne donc une section où, selon les résultats du modèle, la rivière est drainante. Le constat est inverse pour les mailles représentées par une face rouge.

Il faut ici, cependant rappeler le caractère régional des modèles et l'utilisation de mailles de grandes tailles (côté de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de mètres). L'utilisation de telles mailles ne permet donc pas de représenter les détails locaux du tracé de la rivière et de la topographie. Les résultats présentés sont également fortement liés à la qualité de la calibration, une mauvaise représentation de la piézométrie locale pouvant conduire à inverser localement le sens des débits échangés. Il ne faut donc pas chercher à tirer des conclusions sur les échanges nappes-rivières maille par maille mais plutôt observer les

résultats par tronçons de rivière. La succession de débits positifs et négatifs sur le tracé ne permet pas toujours de tirer des conclusions quant à l'aspect drainant ou perdant d'une portion plus longue de rivière (un affluent par exemple). Néanmoins, en inspectant maille par maille la valeur des débits échangés et en les sommant on peut avoir une information quantitative.

Ces résultats peuvent directement être comparés et ainsi appuyer ou encore apporter un complément d'information par rapport aux conclusions tirées durant la phase de caractérisation du projet (cartes d'interaction ESO-ESU réalisées sur base des résultats du livrable D3.12).

L'analyse à l'aide du modèle a porté sur l'étude des interactions ESO-ESU pour les masses d'eau souterraine RWM011 et RWM021. Les résultats présentés ci-dessous sont des illustrations pour les bassins du Hoyoux, du Néblon, du Samson, du Bocq, de la Molignée, de l'Orneau et de la Ligne.

Ces résultats sont calculés en régime permanent pour des sollicitations correspondant à celles de l'année 2006 à l'aide des modèles tels qu'obtenus après la calibration décrite à l'Annexe 2.

### **2.3.1 Masse d'eau souterraine RWM021**

#### **2.3.1.1 Bassin du Néblon**

La Figure 10 reprend les résultats de l'étude de caractérisation des interactions du Néblon avec les eaux souterraines (Livrable D3.12). Pour rappel, cette carte a été réalisée sur base de multiples études de terrains (traçage, repérage de chantoirs et de zones d'infiltration préférentielle, jaugeages comparatifs). Les zones investiguées ont été classées en quatre catégories (cf Deliverable 3.2): perte-résurgence, rivière potentiellement drainante, rivière potentiellement perdante, rivière à l'équilibre. Sur la Figure 10, seules les portions de rivière pour lesquels les zones ou la perte ou le drainage de la nappe par la rivière ont été vérifiés par des observations de terrains sont représentées. Ces données peuvent donc servir comme base de comparaison des résultats obtenus par modélisation (Figure 11).

Il faut également rappeler que les modèles hydrogéologiques ne prennent pas en compte l'entière du réseau rivière. Il a, en effet, été décidé au début des travaux de modélisation du projet Synclin'Eau d'intégrer dans les modèles un réseau rivière "simplifié" tel qu'initialement utilisé lors du projet PIRENE (traits pointillés Figure 10).

En de nombreux endroits les Figure 10 et Figure 11 présentent des similitudes, par exemple :

- Zone I : La zone de perte suivie d'une zone où la rivière est drainante est bien représentée par le modèle.
- Zone II : Le ruisseau d'Ouffet est caractérisé par une succession de pertes et de résurgences. Les résultats du modèle montrent le caractère drainant de celui-ci en amont et le caractère perdant de celui-ci en aval

Une différence apparaît à proximité du lieu de confluence du ruisseau d'Ouffet et du Néblon où les résultats du modèle donne un tracé drainant du Néblon à proximité du captage de la CILE.

### Légende

● Réseau hydrographique pris en compte par le modèle

### Caractérisation ESO ESU

- perte résurgence \_ vérifié
- potentiellement drainant \_ vérifié
- potentiellement perdant \_ vérifié
- pseudo équilibre \_ vérifié
- Réseau hydrographique

### UNITE\_HYDROGEO

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

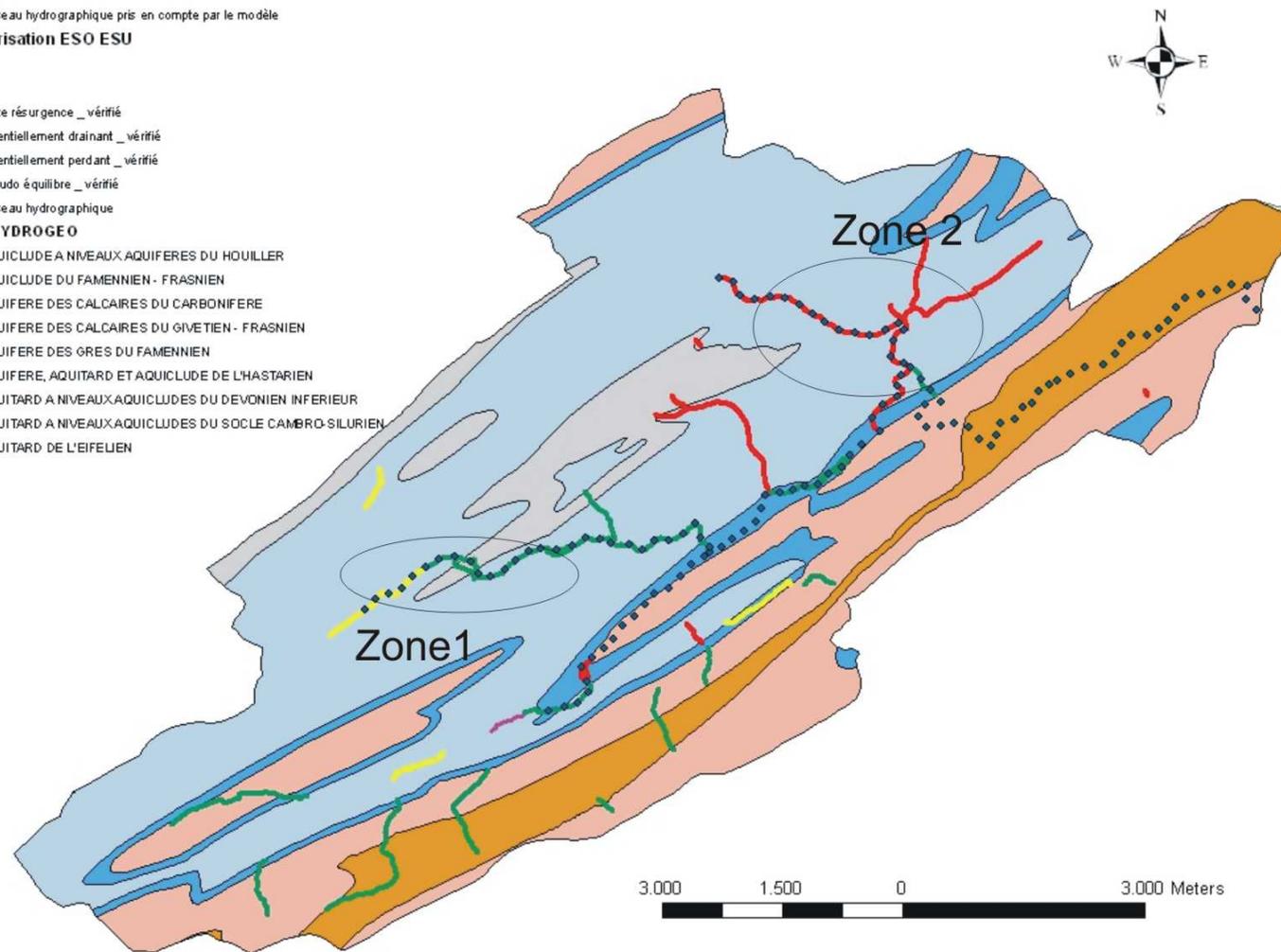


Figure 10: Interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface (ESO-ESU) pour le bassin hydrologique du Néblon amont (carte réalisée sur base des résultats du livrable D3.12).

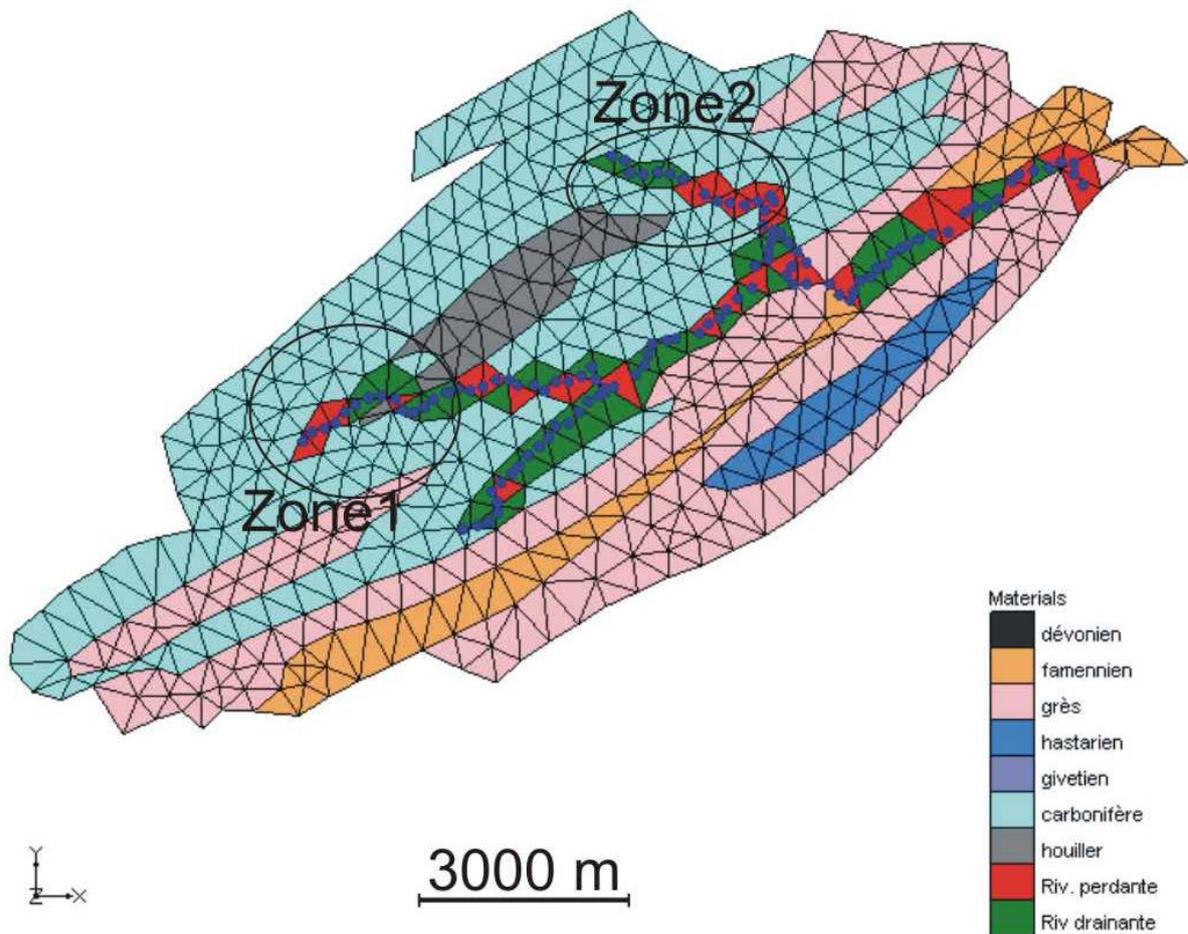


Figure 11 : Visualisation maille par maille des interactions ESO-ESU calculées par le modèle (Nébion)

### 2.3.1.2 Bassin du Hoyoux

Lors de la phase de caractérisation du projet (Deliverable 3.12), une cartographie des tronçons perdants et drainants du Hoyoux et de ses affluents a été proposée (Figure 12). La cartographie des échanges entre les nappes aquifères et le réseau d'eau de surface tel que calculés maille par maille par le modèle est présentée à la Figure 13. Une comparaison des ces deux cartes est proposée pour cinq zones d'intérêt hydrogéologique.

Le débit net entre les eaux de surface et les eaux souterraines sur l'ensemble du parcours du Torrent de Bonne est de  $-0.226 \text{ m}^3/\text{s}$ . Plus précisément, le modèle montre que (Figure 13) :

- dans sa partie amont (Zone I), le Torrent de Bonne présente un caractère mixte, il est par moment drainant et par moment perdant ;
- le Torrent de Bonne est perdant au milieu de son parcours (Zone II) ;
- le Torrent de Bonne est clairement drainant dans sa partie aval - Zone III).

Dans le Sud du bassin (Hoyoux amont), on repère sur le tracé du Hoyoux, au vu des résultats du modèle, une zone relativement drainante. Ces résultats ne corroborent pas l'étude de caractérisation. Au Nord du bassin, les résultats du modèle représentent relativement bien les zones de pertes importantes des affluents du Hoyoux dans les synclinaux calcaires de Pailhe et de Triffois ainsi que sur les formations du Givetien-Frasnien.

Les contributions au débit de base du Hoyoux, calculées par le modèle, venant de ces aquifères sont respectivement de 0.2296 m<sup>3</sup>/s dans le synclinal de Pailhe, de 0.2112 m<sup>3</sup>/s dans le synclinal de Triffois et de 0.1695 m<sup>3</sup>/s sur les calcaires du Givetien. A noter, toujours selon le modèle, que les affluents du Hoyoux s'écoulant dans le synclinal de Triffois sont globalement perdants tandis que ceux s'écoulant dans celui de Pailhe sont globalement drainants.

Le débit drainé par les galeries du captage de Modave (représentées par un trait noir sur la Figure 12), calculé par le modèle est de 0.652 m<sup>3</sup>/s.

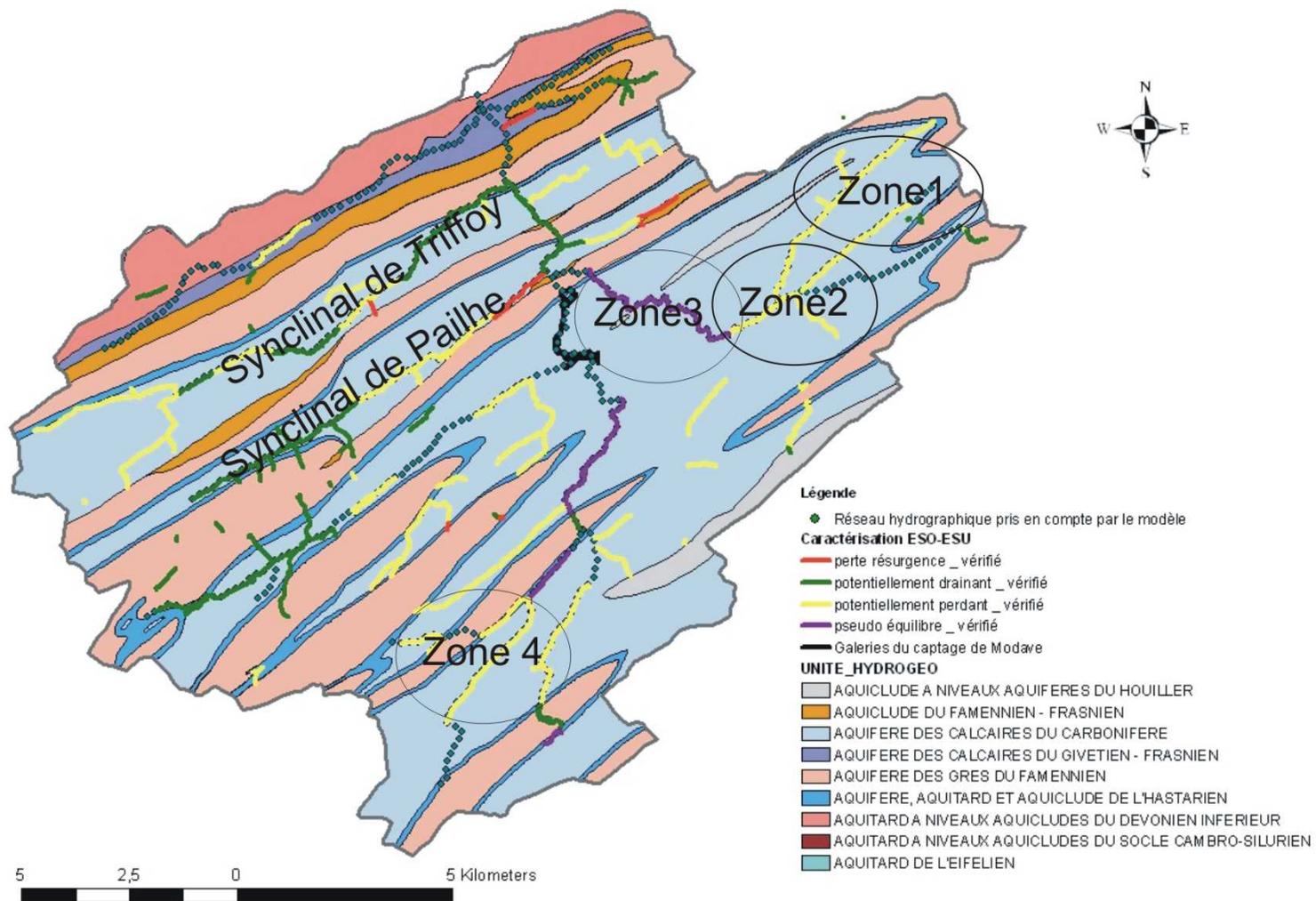


Figure 12 : Interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface (ESO-ESU) pour le bassin hydrologique du Hoyoux (carte réalisée sur base des résultats du délivrable D3.12).

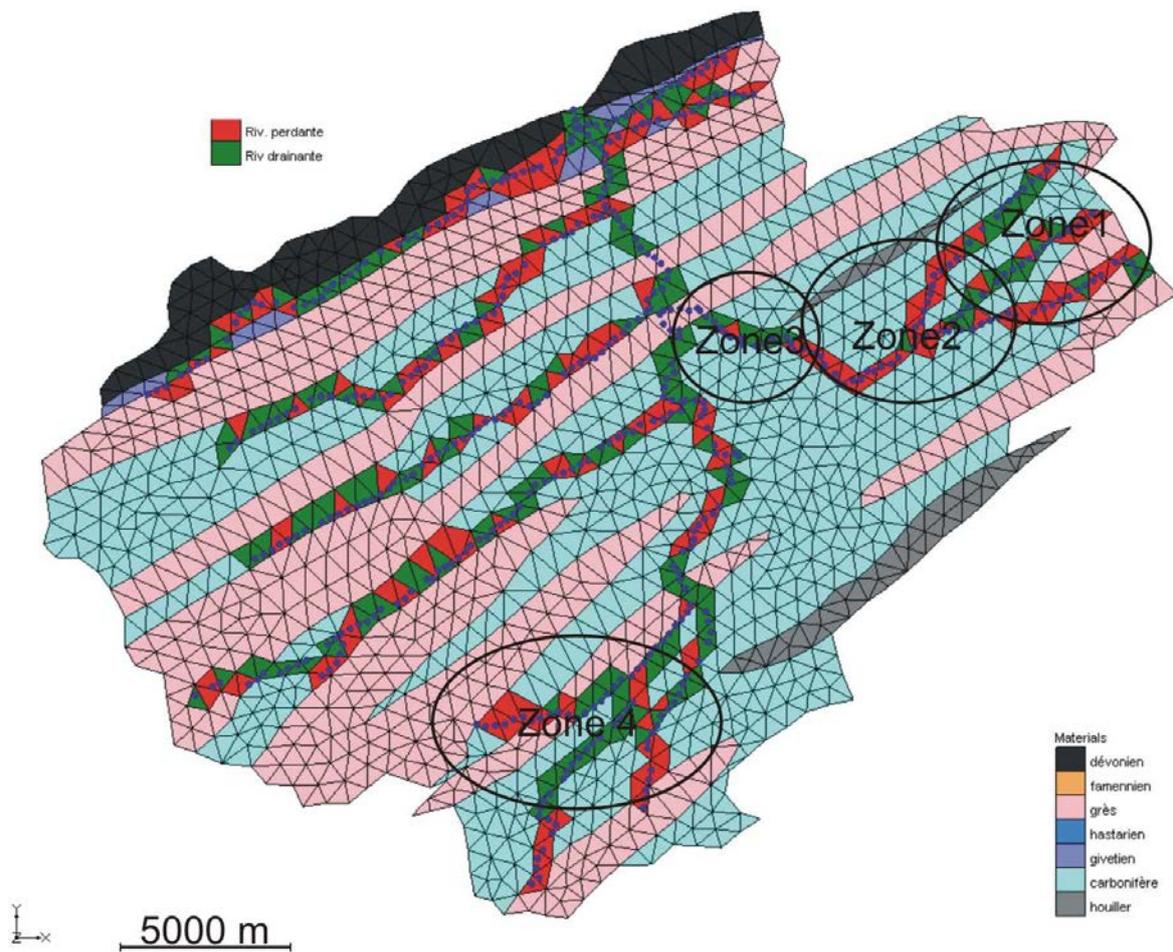


Figure 13 : Visualisation maille par maille des interactions ESO-ESU calculées par le modèle (Hoyoux)

### 2.3.1.3 Bassin du Bocq, du Samson et de la Mollignée

Moins d'informations ont pu être collectées lors de la phase de caractérisation du projet en ce qui concerne les interactions eaux souterraines – eaux de surface pour les bassins du Bocq, de la Mollignée et du Samson. Pour ces trois bassins, seuls les petits affluents ont pu être classés en tronçons perdants et drainants. Dans le modèle tel qu'actuellement développé, ces petits affluents ne sont pas représentés. Les résultats présentés dans les figures qui suivent ne peuvent donc pas actuellement être comparés avec les résultats de la phase de caractérisation.

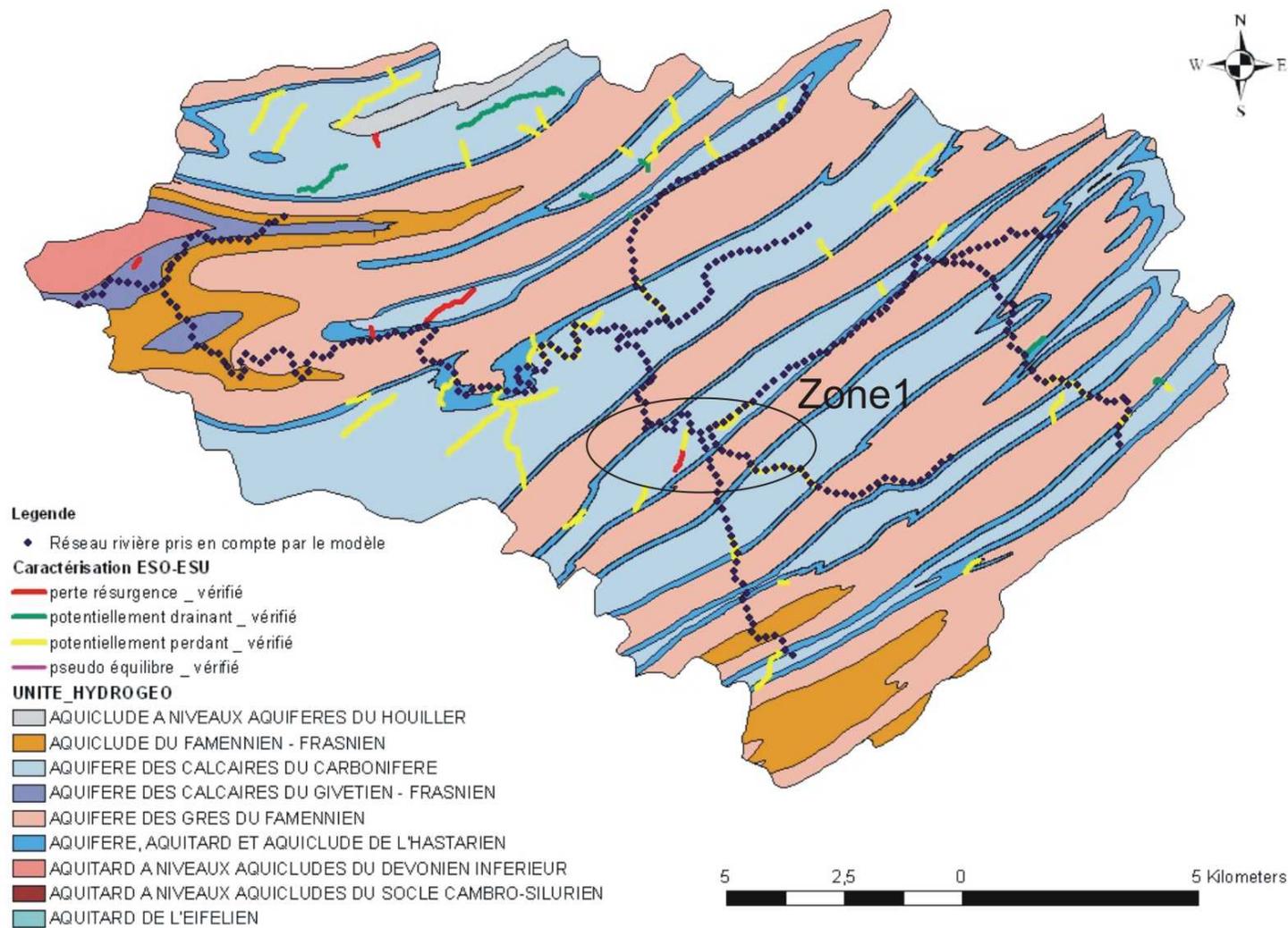


Figure 14: Interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface (ESO-ESU) pour le bassin hydrologique du Bocq (carte réalisée sur base des résultats du délivrable D3.12)

Sur le tracé du Bocq, les quelques résultats obtenus lors de l'étude de caractérisation ont pointé la présence d'affluents potentiellement perdants (Figure 14). Ces tronçons de ruisseau ne sont cependant pas pris en considération par le modèle. Dans une zone de confluence entre le Bocq et deux de ses affluents (Figure 15 - zone 1), le Bocq est supposé potentiellement perdant ce que le modèle représente bien. Deux autres zones drainantes, dont le caractère perdant ou drainant n'a pu être confirmé lors de l'étude de caractérisation, ont été pointées sur les résultats du modèle (Figure 15 – Zone 2 et 3).

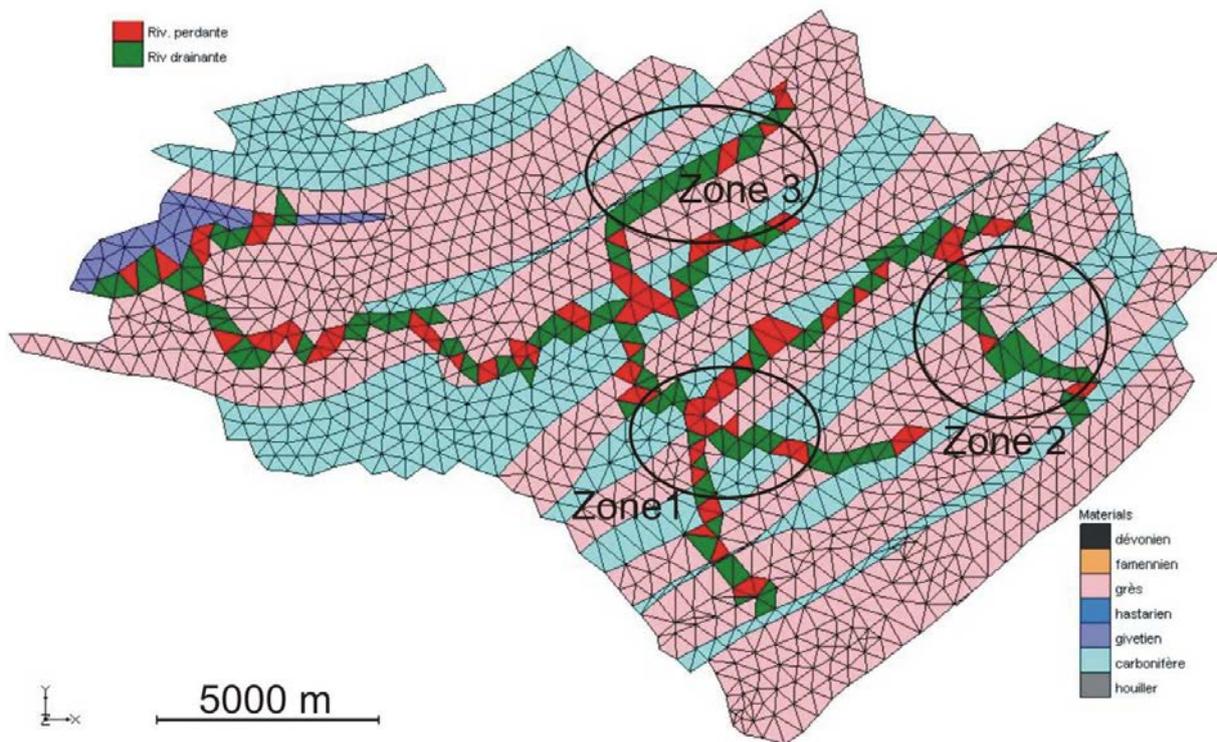


Figure 15 : Visualisation maille par maille des interactions ESO-ESU calculées par le modèle (Bocq)

Sur le tracé de la Molinee, de nombreux affluents perdants ne sont pas incorporés au modèle. Quatre zones ont été pointées aux Figure 16 et Figure 17 pour montrer, comme exemple, la bonne cohérence des résultats obtenus par le modèle. Deux de ces zones montrent un cours d'eau drainant (Zone 1 et 3) et les deux autres illustrent des conditions perdantes (Zone 2 et 4).

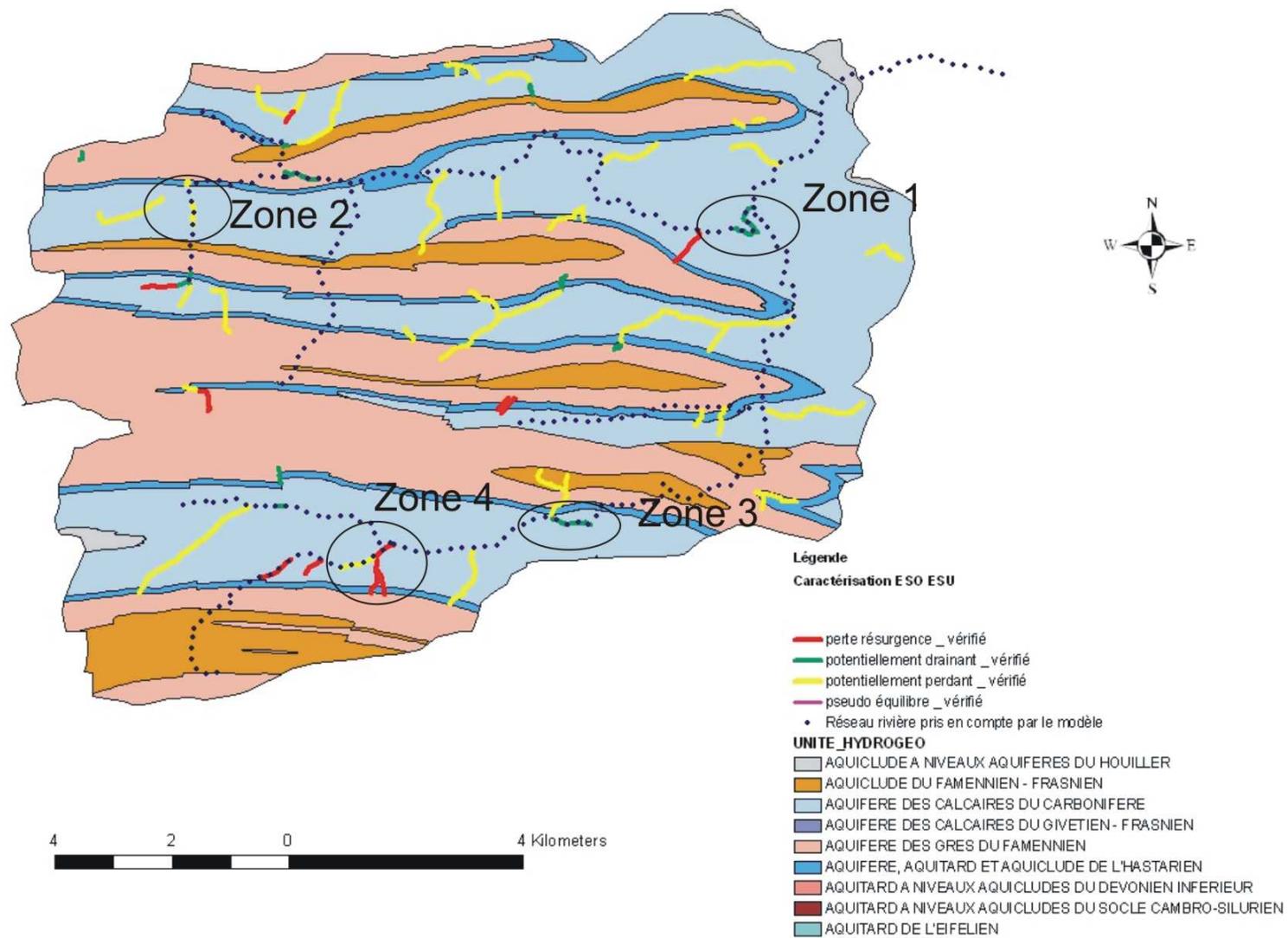


Figure 16: Interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface (ESO-ESU) pour le bassin hydrologique de la Molignée (carte réalisée sur base des résultats du délivrable D3.12)

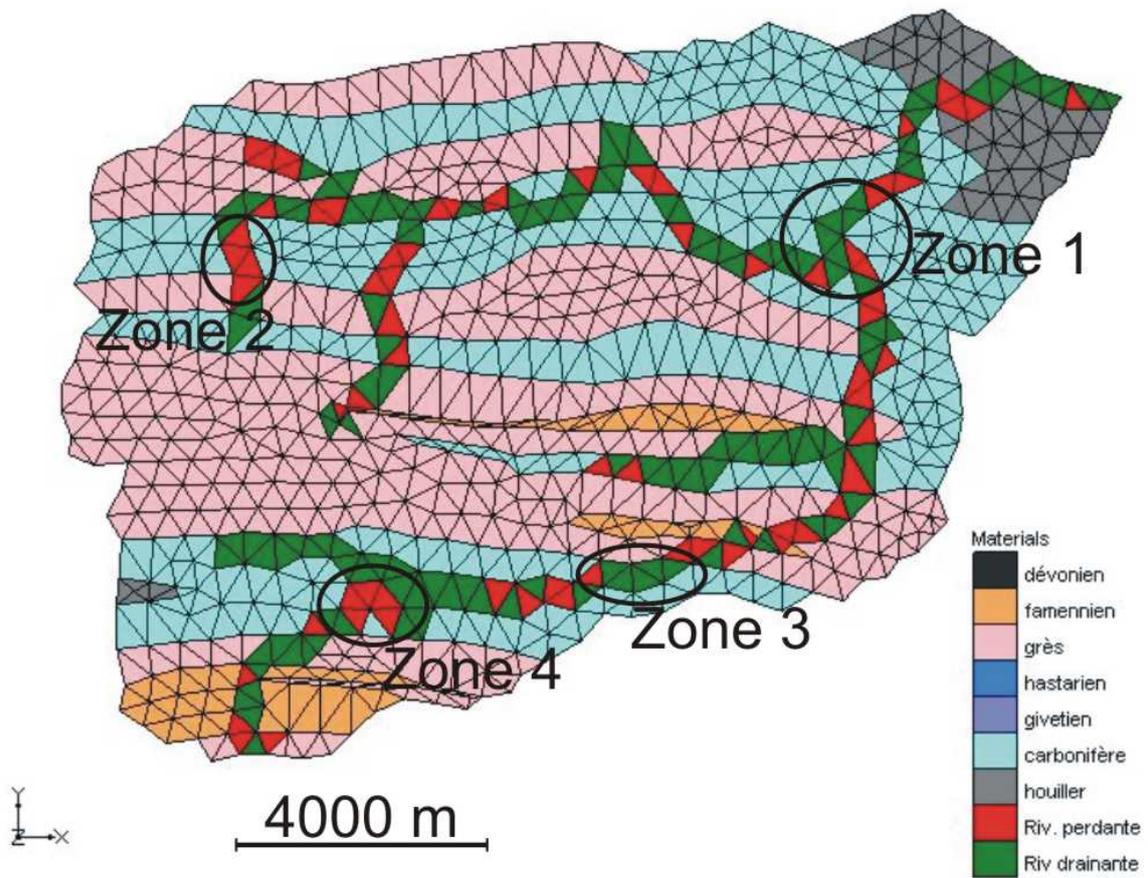


Figure 17: Visualisation maille par maille des interactions ESO-ESU calculées par le modèle (Molignée)

La discussion des résultats est plus délicate pour le bassin du Samson vu la taille relativement importante des mailles sur son tracé, ce qui ne permet pas de prendre en compte avec finesse les découpes géologiques.

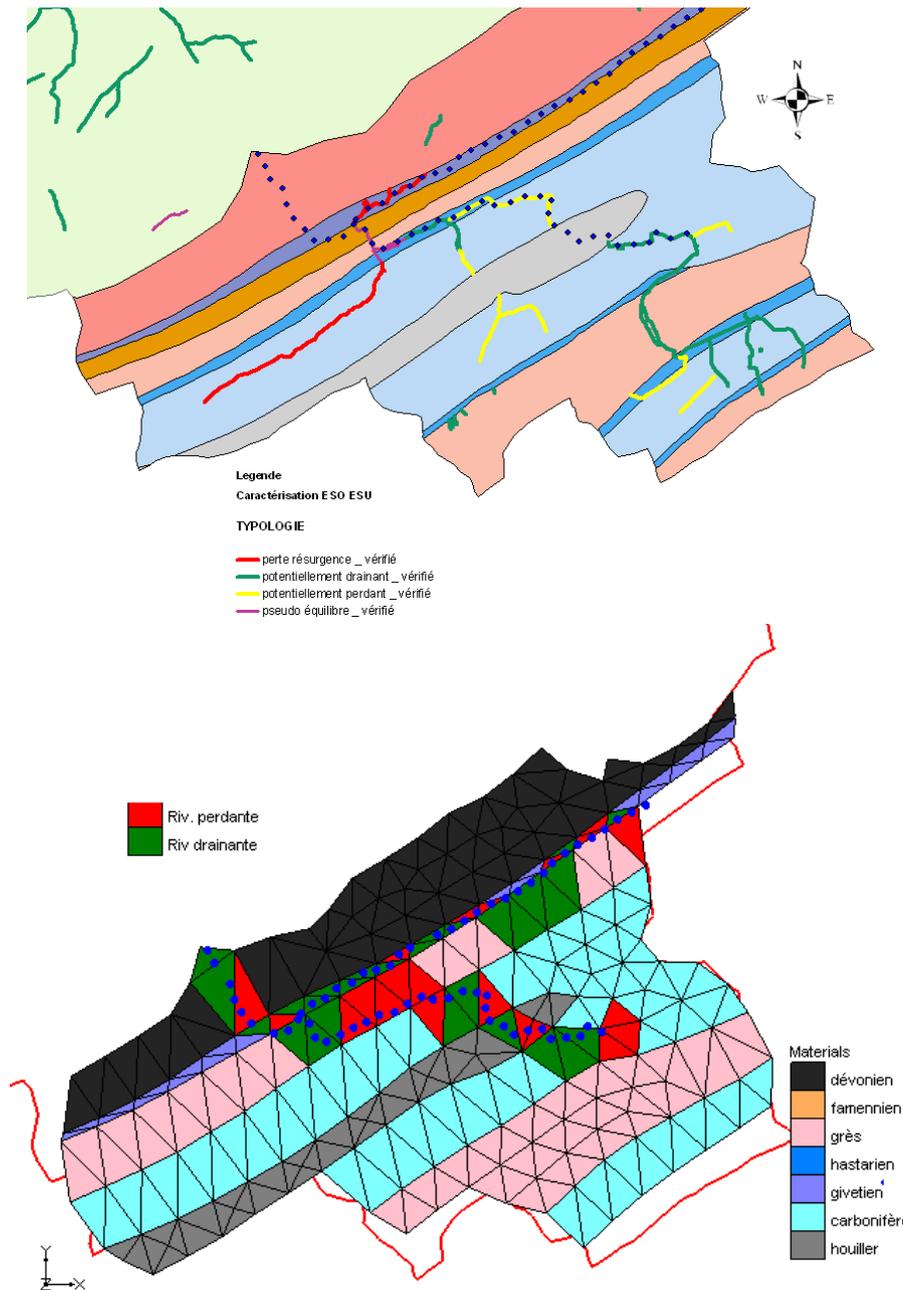


Figure 18: Interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface (ESO-ESU) pour le bassin du Samson (carte réalisée sur base des résultats du livrable D3.12) et résultats du modèle (VERSION PROVISoire)

### 2.3.2 Masse d'eau souterraine RWM011

De façon similaire dans la masse souterraine d'eau RWM011, les bassins de l'Orneau et du Houyoux ont passés en revue. Après avoir étudié ces deux bassins sur base de données relatives aux débits échangés (entre sous-bassin et avec le réseau hydrographique), il est intéressant de faire des recoupements avec les résultats des interactions ESO-ESU.

### 2.3.2.1 Bassin de l'Orneau

La Ligne (affluent s'écoulant à l'Ouest de l'Orneau) comporte de nombreuses pertes et résurgences le long de son tracé sur la formation des calcaires carbonifères. Le modèle, bien que ne pouvant pas reproduire physiquement ce système karstique, reproduit une alternance de zones de drainance et de perte. Sur la formation du Givetien-Frasnien (couleur mauve) et du Famenien (couleur orange), la Ligne est drainante dans sa partie amont. Les résultats du modèle sont en accord avec cette observation.

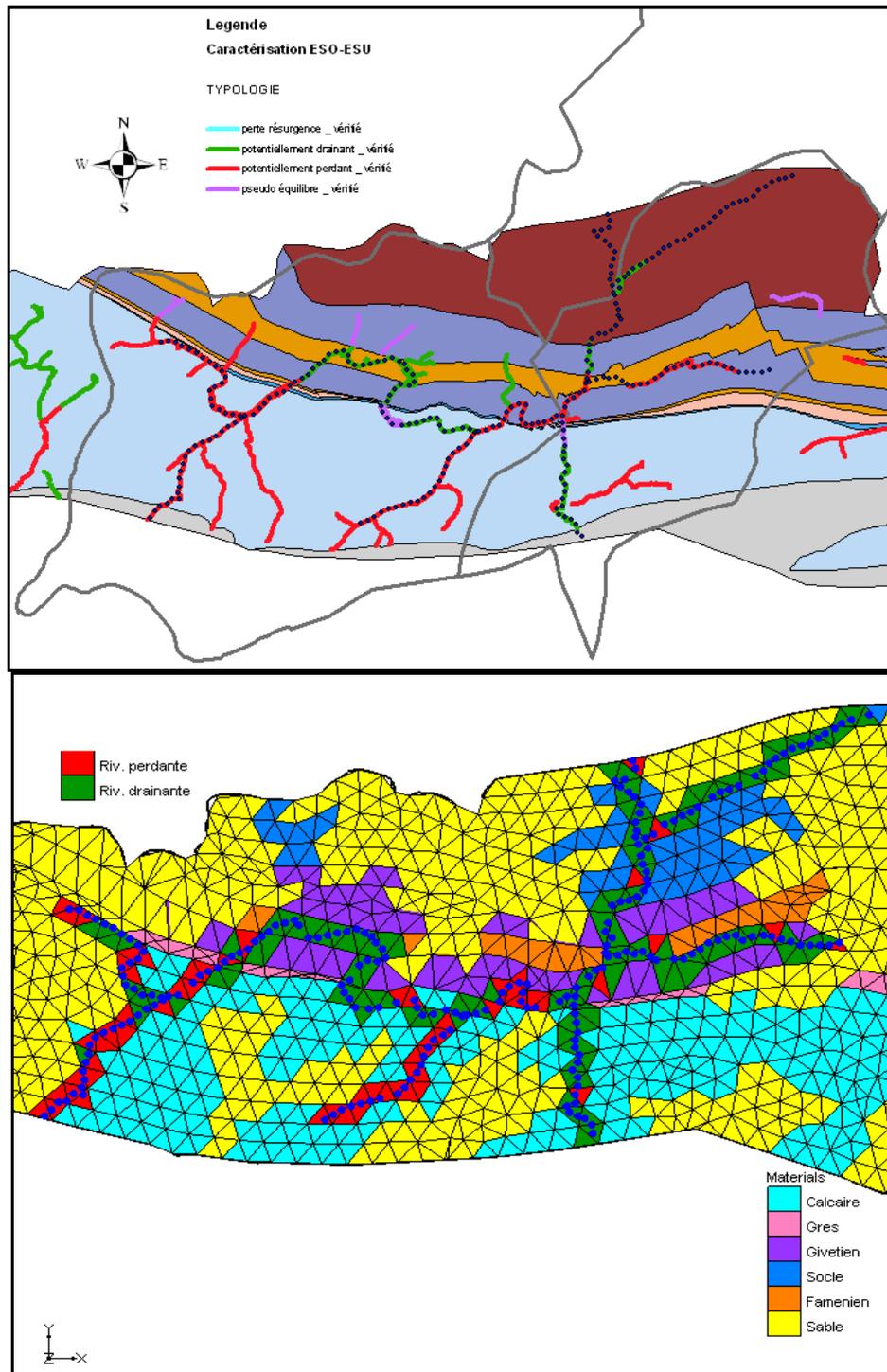
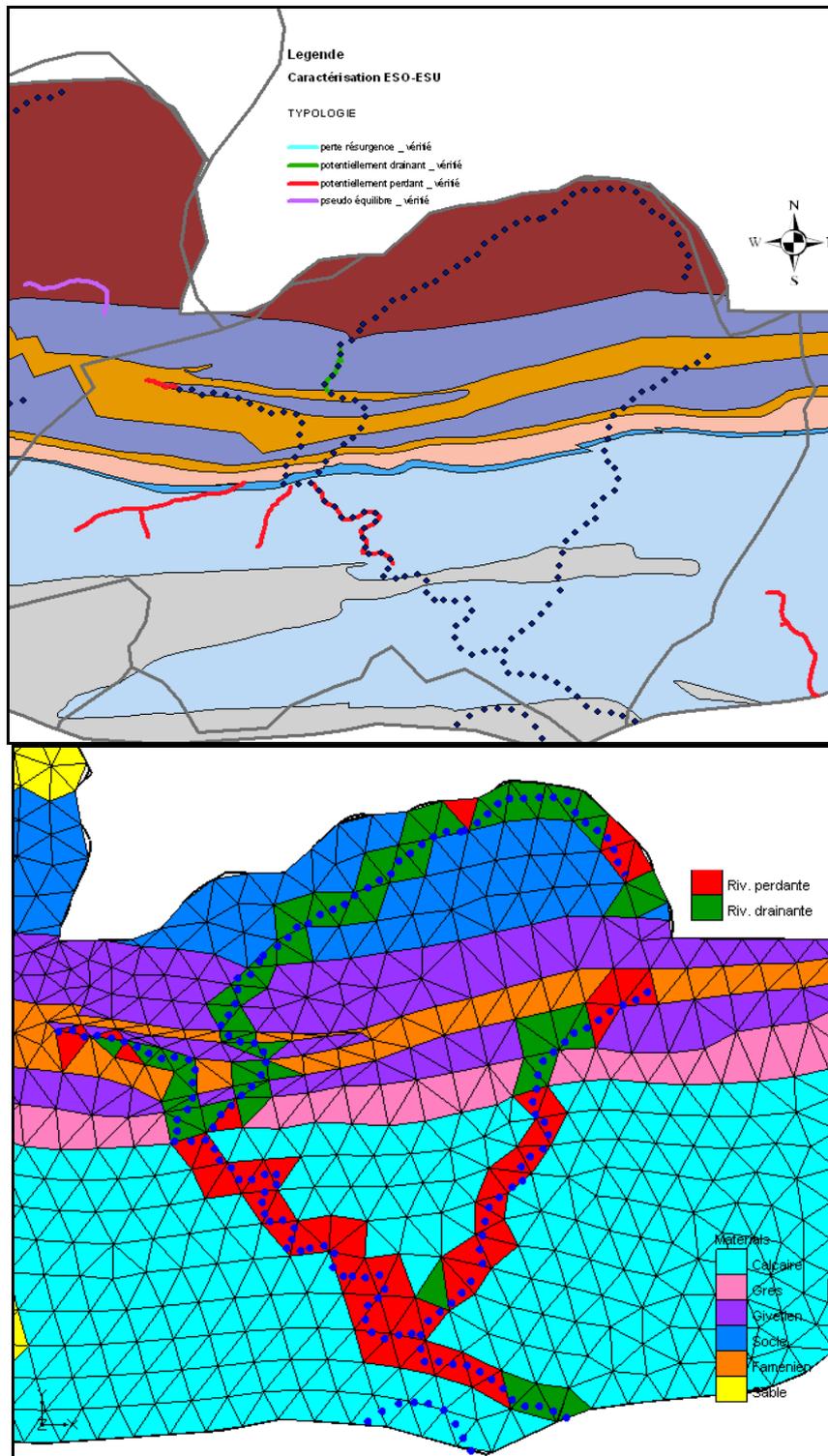


Figure 19 : Interactions ESO-ESU pour le bassin de l'Orneau : comparaison entre les résultats obtenus lors de l'étude de caractérisation et les résultats de modélisation. (VERSION PROVISoire)

### 2.3.2.2 Le sous-bassin du Houyoux

Dans le bassin du Houyoux, les résultats de la modélisation indiquent des caractéristiques drainantes de ce cours d'eau dans toute sa partie amont. Dès son passage au droit de la formation des calcaires carbonifères, le Houyoux devient perdant. Le rabattement de la nappe engendré par le captage de Vedrin exacerbe encore le caractère perdant des cours d'eau.



### **3 Simulations relatives à l'évolution des concentrations en nitrate**

#### **3.1 Introduction**

Conformément aux attentes de la DGARNE et de la SPGE, différents travaux complémentaires de modélisation relatifs à l'évolution des concentrations en nitrate ont été réalisés. D'une part, le modèle numérique a été adapté pour produire un fichier de sortie reprenant les flux massiques de nitrate associés au débit de base qui transite depuis les eaux souterraines vers les eaux de surface. Les résultats produits ont été analysés pour quelques rivières. D'autre part, des travaux plus détaillés ont été entrepris pour le bassin du Néblon : ce bassin, de faible superficie, permet d'étudier à une échelle plus locale l'effet de différents modes de représentation des intrants en nitrates. Comme demandé, les flux massiques calculés par le modèle EPICgrid développé par l'Unité d'Hydrologie et d'Hydraulique Agricole de la Faculté d'Agronomie de Gembloux ont été intégrés dans le modèle représentant le bassin du Néblon.

#### **3.2 Concentrations en nitrate calculées dans le débit de base de quelques rivières**

Les simulations réalisées précédemment intégraient déjà les échanges d'eau et de nitrate entre les eaux souterraines et les eaux de surface. Néanmoins, les flux massiques calculés par le modèle n'étaient pas directement accessibles pour analyse. Le code SUFT3D a donc été adapté de manière à produire différents fichiers de sortie fournissant les valeurs des flux massiques (M/T) de nitrate alimentant les eaux de surface à partir des eaux souterraines. En multipliant ce flux massique par le débit de base calculé, il est donc désormais possible de calculer la concentration en nitrate dans le débit de base transitant entre les eaux souterraines et les eaux de surface. Les modèles n'intègrent par contre pas, à ce jour, d'éventuels phénomènes de réduction des concentrations en nitrate existant potentiellement dans les zones ripariennes.

Les résultats présentés ci-dessous, pour exemple, ont été calculés à l'aide du modèle régional développé pour la masse d'eau souterraine RWM021. Les hypothèses de travail utilisées sont celles décrites dans le livrable 6.2. Pour rappel, les simulations du transport de nitrates ont été réalisées en considérant un intrant en nitrate simplifié mais spatialement distribué en fonction de l'occupation du sol.

Les Figures 21 à 24 présentent l'évolution, entre 1950 et 2009, des concentrations calculées dans le débit de base alimentant les principaux cours d'eau de la masse d'eau souterraine RWM021. Pour le Samson (Figure 21), les résultats des simulations montrent une diminution des concentrations dans le débit de base qui transite de la nappe vers la rivière d'amont en aval du cours d'eau (en passant de la sonde S1 Vaux à la sonde S2 Gramptinne) ce qui témoigne de l'arrivée d'eau souterraines moins chargées en nitrates le long de son parcours. Par contre, ce constat ne peut pas être fait pour le Hoyoux par exemple. Selon le modèle, la concentration en nitrates dans le débit de base du Hoyoux n'évolue pas significativement le long de son

parcours. Les résultats des simulations montrent, en effet, que les concentrations en nitrate dans le débit de base avoisinent les 30 mg/L en 2009 et ce quelque soit le point d'observation (Figure 22). Les concentrations en nitrate calculées par le modèle pour les eaux souterraines captées au captage VIVAQUA de Modave sont également proches de 30 mg/l en 2009.

Les ruisseaux pour lesquels les résultats de simulation montrent que le débit de base est le moins chargé en nitrates sont le Burnot et la Molinee (concentrations en nitrate en 2009 d'environ 25 mg/l - Figure 23). A l'opposé, les concentrations en nitrates dans le débit de base les plus élevées, avoisinant 35 mg/l en 2009, sont calculées au niveau du Bocq et du ruisseau d'Yves (Figure 24).

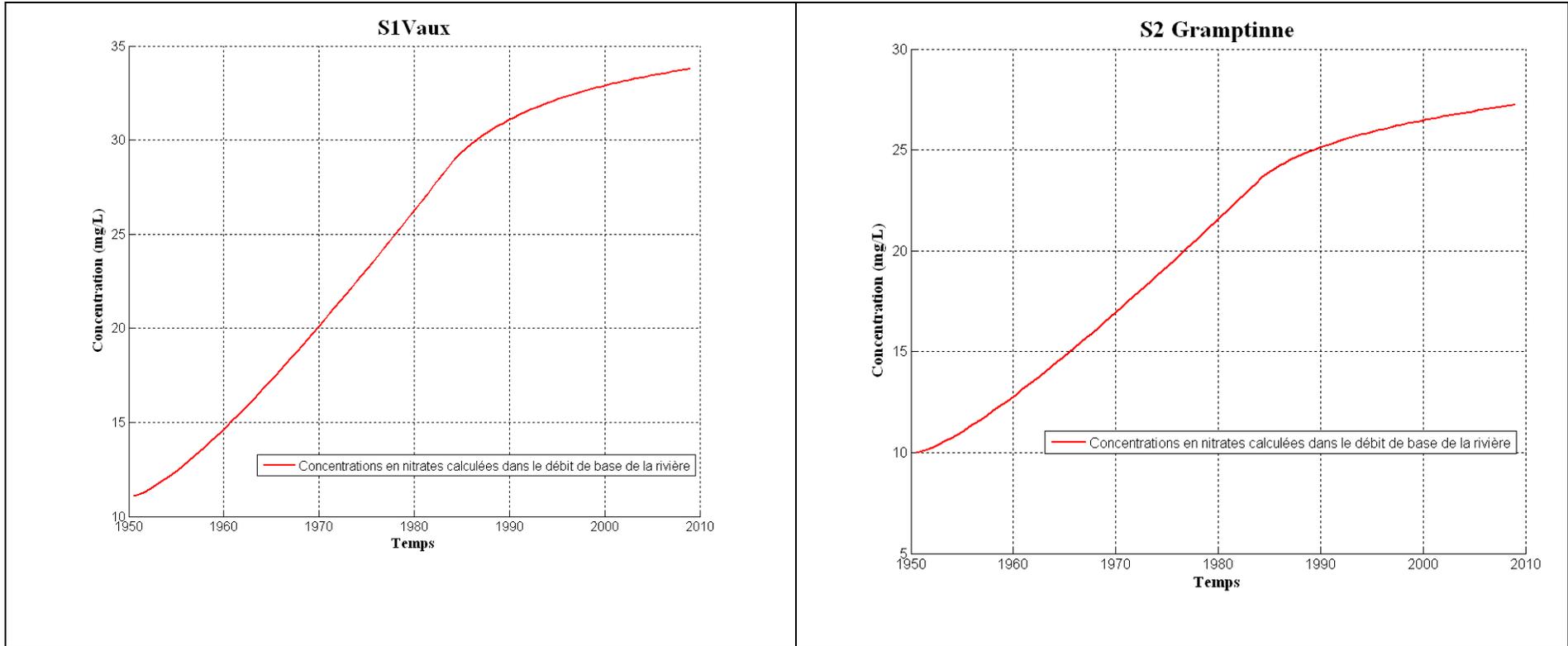


Figure 21 : Evolution temporelle des concentrations en nitrate calculées par le modèle dans le débit de base du Samson (VERSION PROVISoire)

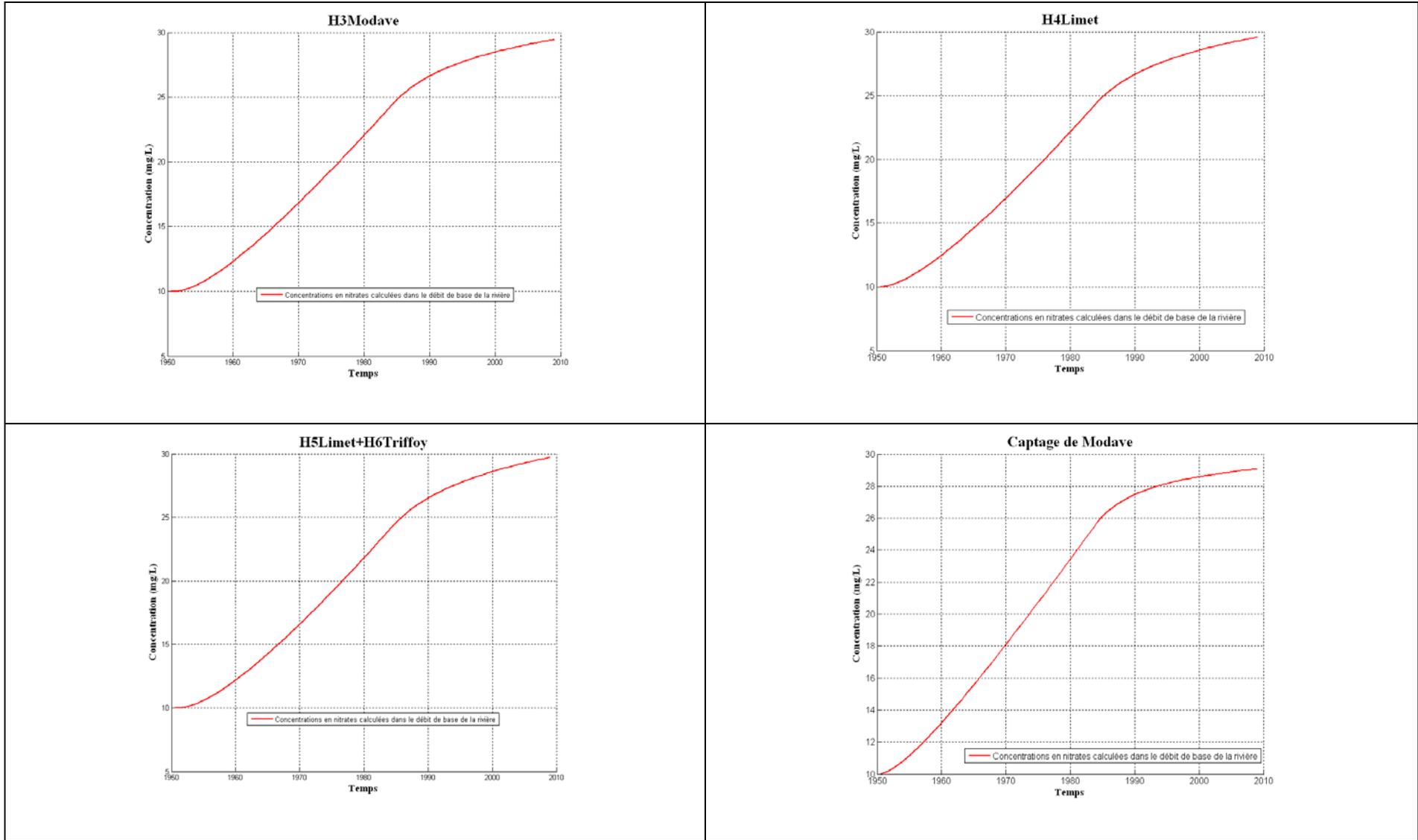


Figure 22 : Evolution temporelle des concentrations en nitrate calculées par le modèle dans le débit de base du Hoyoux. (VERSION PROVISoire)

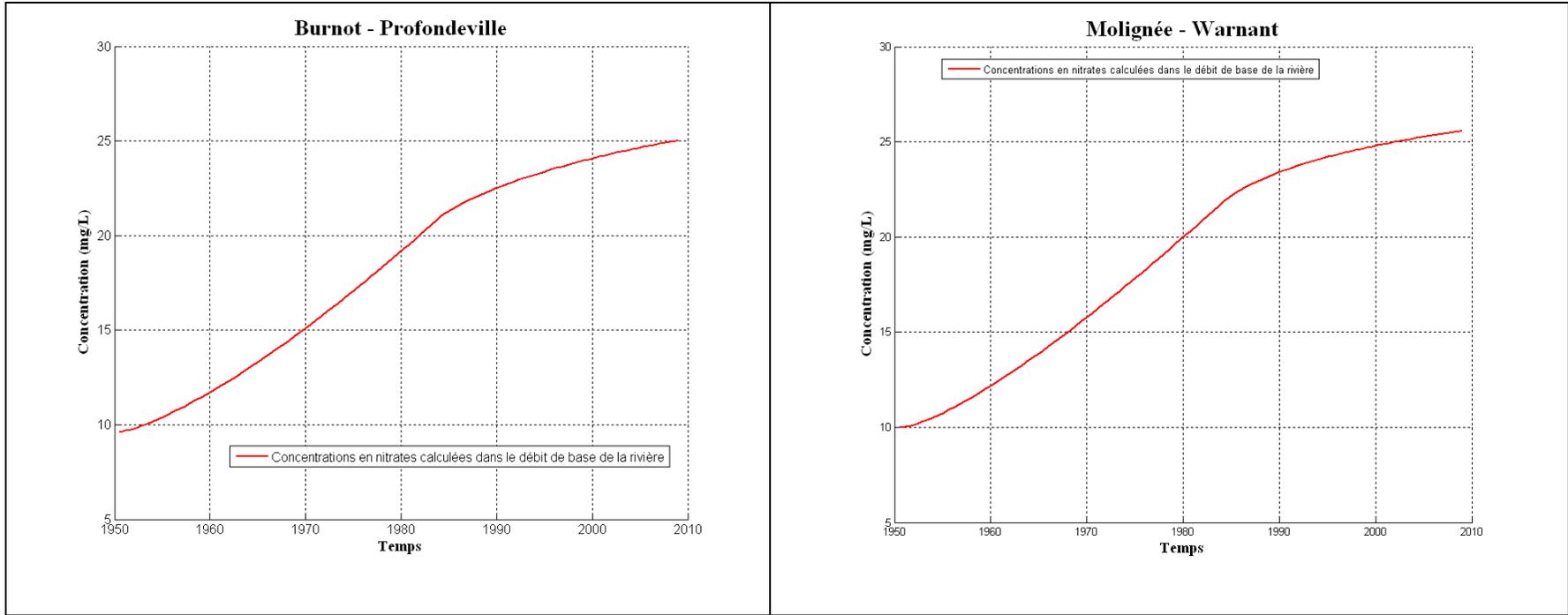


Figure 23 : Evolution temporelle des concentrations en nitrate calculées par le modèle dans les débits de base du Burnot et de la Mognée (VERSION PROVISoire)

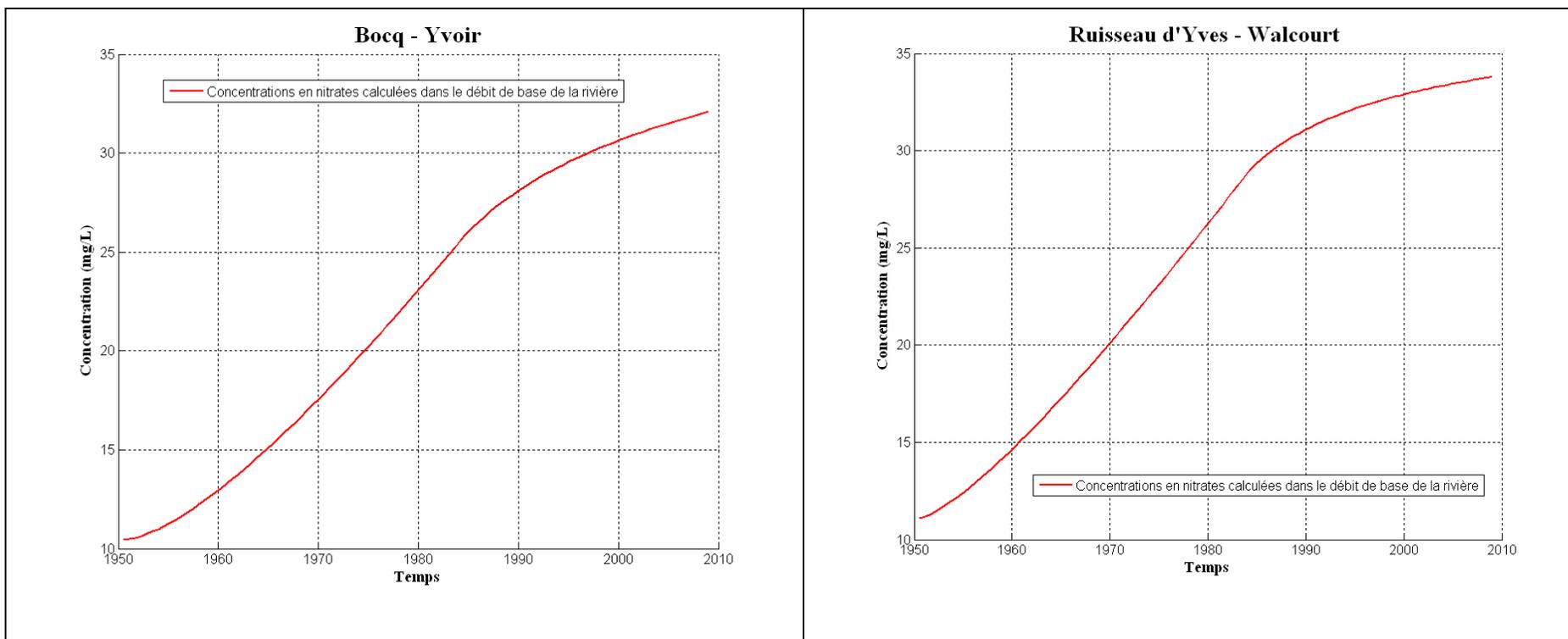


Figure 24 : Evolution temporelle des concentrations en nitrate calculées par le modèle dans les débits de base du Bocq et du ruisseau d'Yves. (VERSION PROVISOIRE)

### 3.3 Utilisation des résultats du modèle EPICgrid sur le bassin du Néblon

Pour rappel (Délivrable D6.2), les simulations du transport de nitrate avec les modèles développés pour les masses d'eau souterraine RWM011, RWM012 et RWM021, ont été réalisées en considérant un intrant en nitrate simplifié, spatialement distribué en fonction de l'occupation du sol.

En première approximation, quatre grandes catégories d'occupation du sol avaient été prises en considération : bois et forêt, prairies, cultures, autres. La concentration considérée dans l'intrant sous prairies et cultures augmente graduellement de 10 mg/l à 60 mg/l sur la période allant de 1950 à 1985. Cette période correspond à une évolution des pratiques agricoles progressivement plus intensives. Ensuite l'intrant est supposé se stabiliser à la valeur de 60 mg/l jusqu'en 2010 (Figure 25). Les concentrations considérées dans les intrants sous bois et forêt sont de 10 mg/L. Pour les autres types d'occupations de sol, il est considéré qu'il n'y a pas de nitrates dans l'eau d'infiltration (0 mg/L). L'ensemble des résultats des simulations ont été présentés et discutés dans le livrable D6.2.

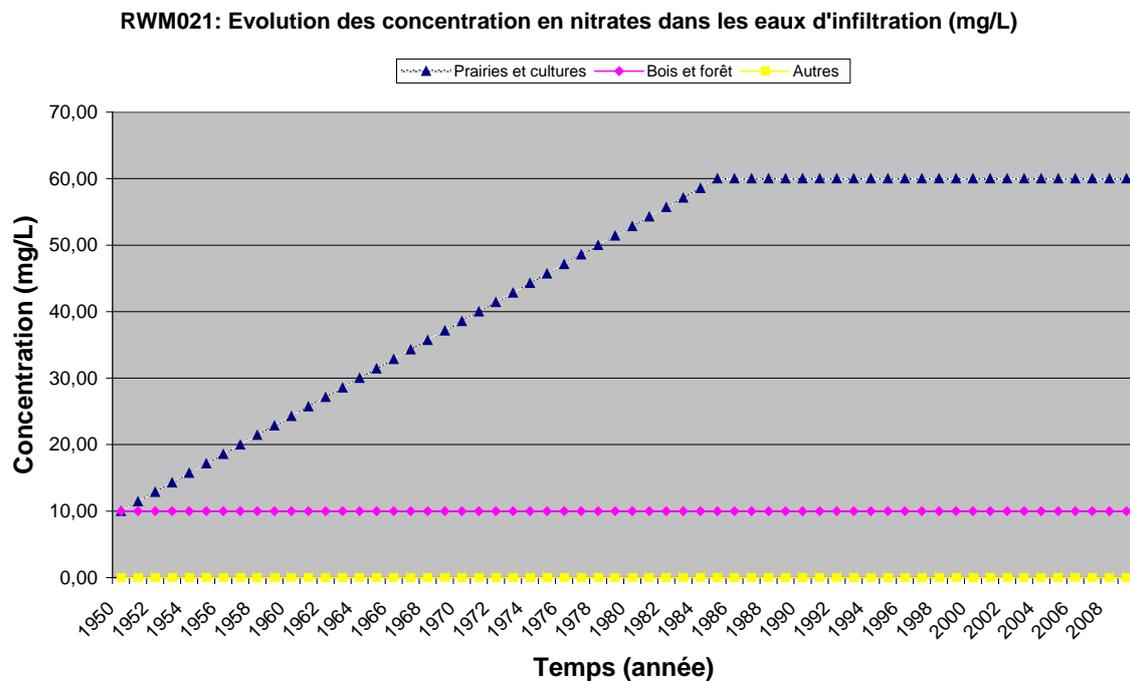
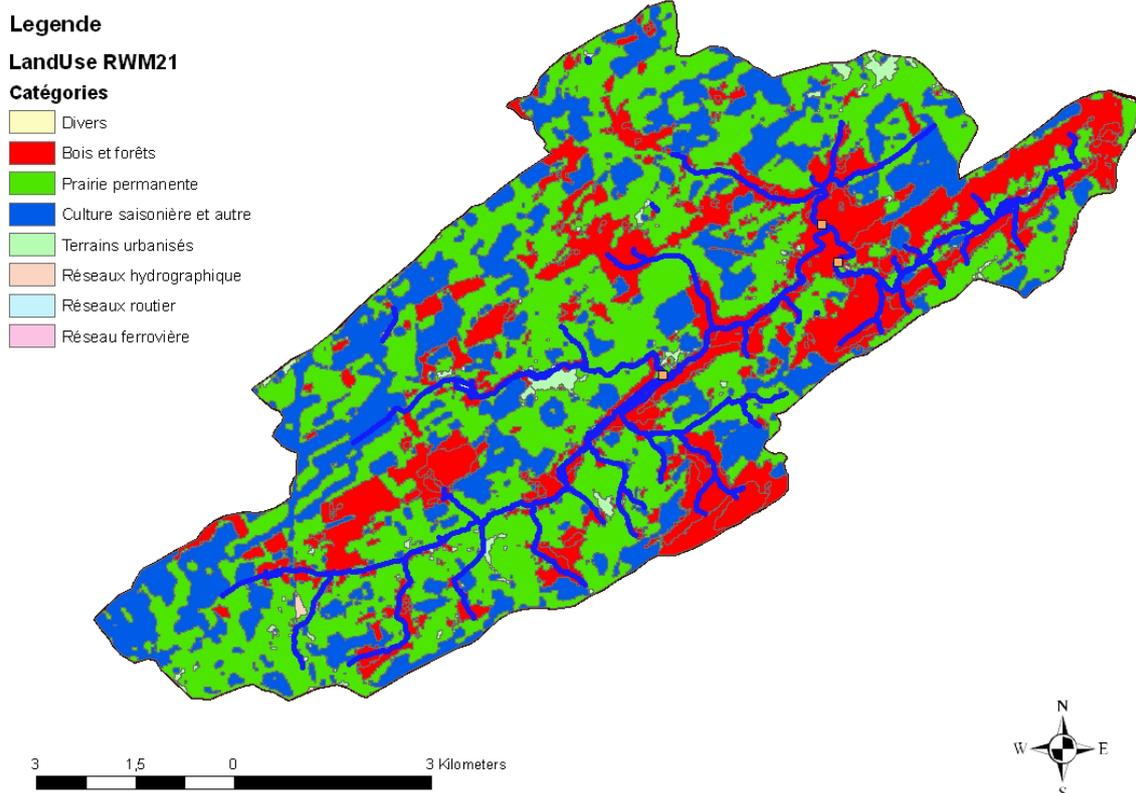


Figure 25: Intrant distribué. Evolution des concentrations en nitrates appliquées au niveau de la recharge des modèles dans les eaux d'infiltration pour la période 1950-2009 en fonction de l'occupation du sol.

Dominé par une majorité de zones agricoles, le bassin du Néblon est également recouvert par de larges espaces forestiers (Figure 26). Ceci donne lieu à une distribution spatiale fortement hétérogène des concentrations en nitrate dans les eaux d'infiltration.



**Figure 26 : Occupation du sol du bassin du Néblon**

Le modèle sol et zone vadose EPICgrid, développé par l'Unité d'Hydrologie et d'Hydraulique Agricole de la Faculté d'Agronomie de Gembloux, permet de calculer, à différentes profondeurs, la quantité d'eau s'infiltrant et la teneur en nitrate associée. De nombreux paramètres physiques sont implémentés dans ce modèle tels que les pratiques agricoles, la topographie, la nature du sol et la géologie. Il est dès lors intéressant de tester l'apport potentiel de l'utilisation de ces données spatialement distribuées comme données d'entrée des modèles eau souterraine développés avec le code SUFT3D. A la demande de la SPGE et de la DGARNE les recharges et flux massiques de nitrates calculés par le modèle EPICgrid ont donc été intégrées pour le bassin du Néblon.

### **3.3.1 Intégration des données EPICgrid sur le bassin du Néblon**

Pratiquement, la maille de calcul EPICgrid est d'un kilomètre de côté. Toutes les données et paramètres nécessaires au calcul des flux d'infiltration sont moyennés statistiquement à l'échelle de cette maille carrée. Dans le cadre du projet Synclin'Eau, des moyennes mensuelles des quantités d'eau percolée et des flux massiques de nitrate percolant à 4 m sous la zone racinaire ont été transmises par l'équipe de Gembloux Agro-Bio Tech pour la période allant de janvier 1971 à décembre 2005. Cette profondeur de 4 mètres a été fixée de commun accord entre les deux équipes (HGULg et Gembloux Agro-Bio Tech). On peut raisonnablement considérer qu'à cette profondeur, les processus de transformation des

différentes formes de l'azote dans le sol deviennent négligeables et que les concentrations calculées sont une bonne approximation de la concentration associée aux eaux d'infiltration vers la nappe d'eau souterraine, à travers la zone non saturée.

Une interface permettant d'établir la correspondance entre les données EPICgrid et les modèles SUFT3D a été développée de manière à intégrer les résultats d'EPICgrid comme conditions aux frontières des modèles eau souterraine. Cette interface permet d'automatiser l'introduction des données EPICgrid dans le SUFT3D et permettra de simplifier les travaux à venir.

Pour les simulations intégrant les résultats du modèle EPICgrid, un maillage local circonscrit aux limites hydrologiques du bassin du Néblon a été extrait du modèle régional de la masse d'eau souterraine RWM021. Aux frontières externes de ce modèle local, des conditions de type Fourier sont appliquées. Les hauteurs piézométriques externes de référence de ces conditions limites sont calculées par une simulation du modèle régional en régime permanent d'écoulement (sollicitations moyennes de l'année 2006).

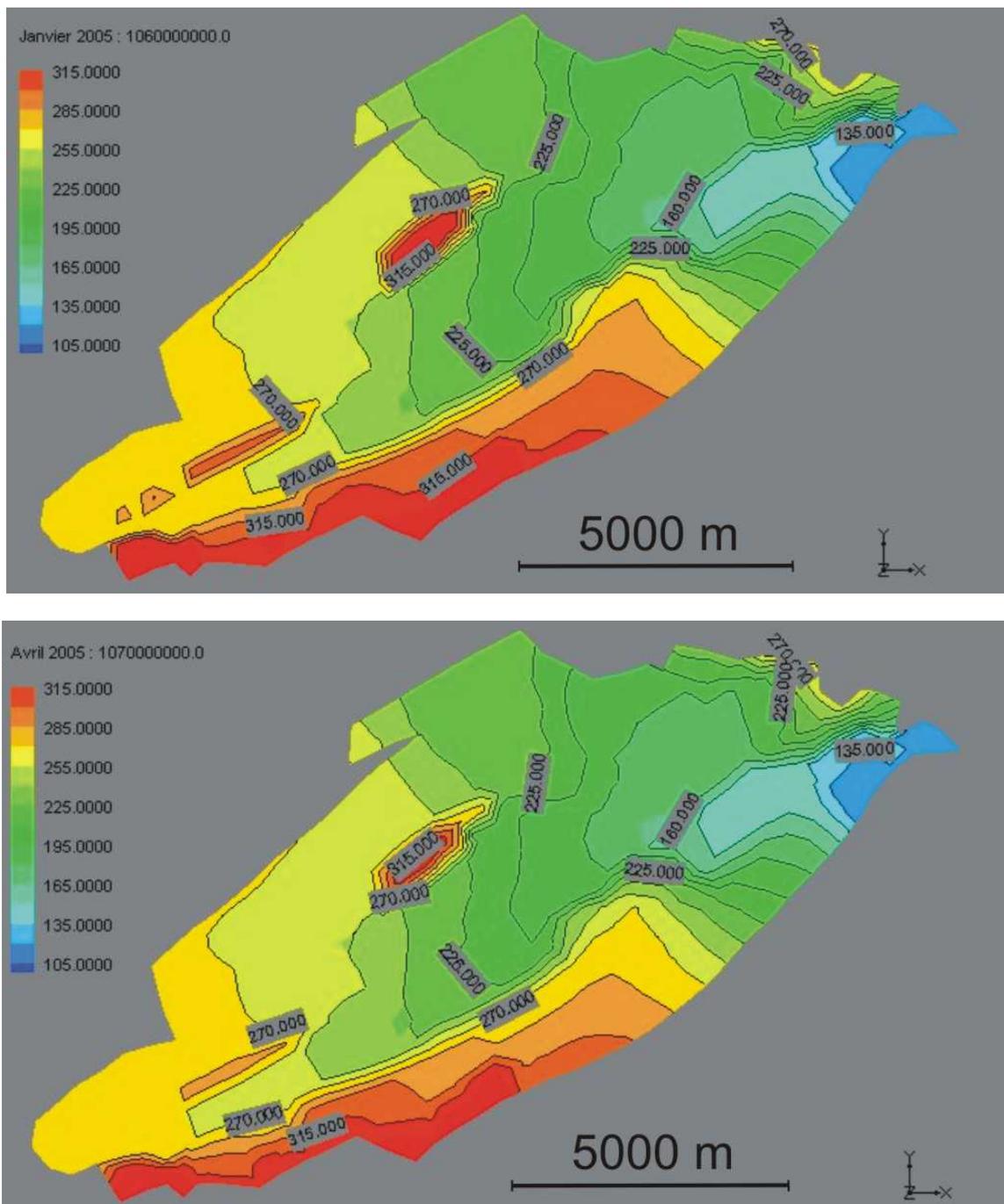
Au niveau du maillage local, aucun changement n'a été apporté par rapport à la calibration réalisée avec le modèle régional. La distribution spatiale des matériaux géologiques et des valeurs de conductivités hydrauliques associées sont donc inchangées. La Figure 27 présente une comparaison des piézométries calculées, en régime permanent, pour les deux maillages avec les mêmes sollicitations. On n'observe que de petites différences locales, liées aux conditions limites.



### 3.3.1.1 Modélisation des écoulements en conditions transitoires à partir des recharges calculées à l'aide du modèle EPICgrid

Après traitement des données, 102 profils de recharge mensuelle provenant des données EPICgrid ont été utilisés comme recharge distribuée sur le maillage local du bassin du Néblon, sur la période 1971-2005, les écoulements souterrains étant calculés sur la période correspondante avec le code SUFT3D.

Quelques exemples de cartes piézométriques calculées sont présentés à la Figure 28.



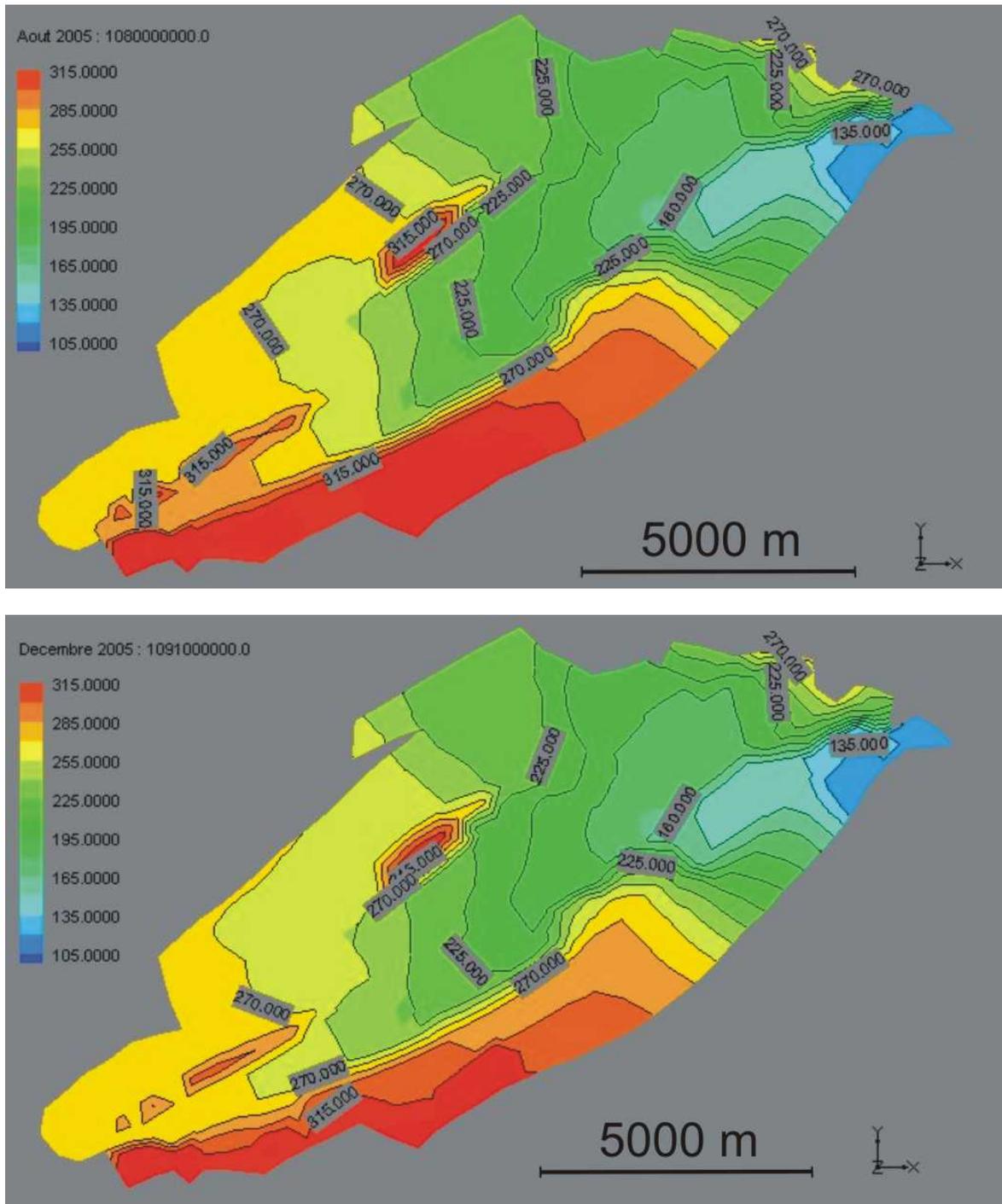


Figure 28 : Piézométrie calculée en régime transitoire avec le modèle intégrant la recharge provenant du modèle EPICgrid (piézométrie en Janvier-Avril-Août et Décembre 2005)

La Figure 29 présente les variations saisonnières du débit capté par le captage de Néblon-le-Moulin obtenues (1) avec le modèle décrit dans le livrable 6.2 considérant une recharge uniquement distribuée sur base de la géologie (graphique de gauche) et (2) avec le nouveau modèle intégrant les résultats d'EPICgrid (graphique de droite). Dans le graphique de gauche, les résultats obtenus avec le modèle sont comparés aux débits effectivement captés par la CILE. Le graphique de gauche montre que le modèle reproduit bien les variations saisonnières de débit. Les deux graphiques montrent une variabilité comparable des débits et les variations saisonnières y sont reproduites.

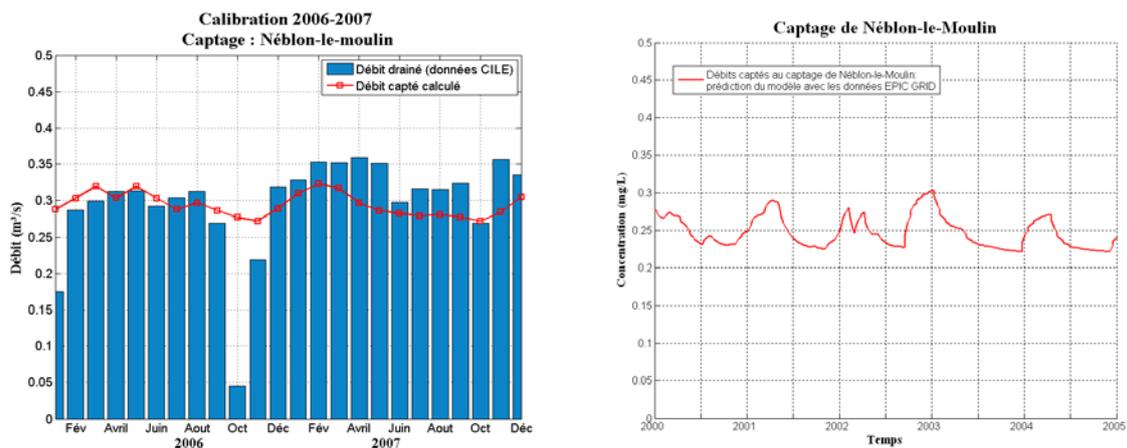


Figure 29 : Comparaison des évolutions temporelles du débit capté par le captage de Néblon-le-Moulin reproduite par le modèle considérant une recharge uniquement distribuée sur base de la géologie (à gauche) et le modèle intégrant les résultats du modèle EPICgrid (à droite). (VERSION PROVISoire)

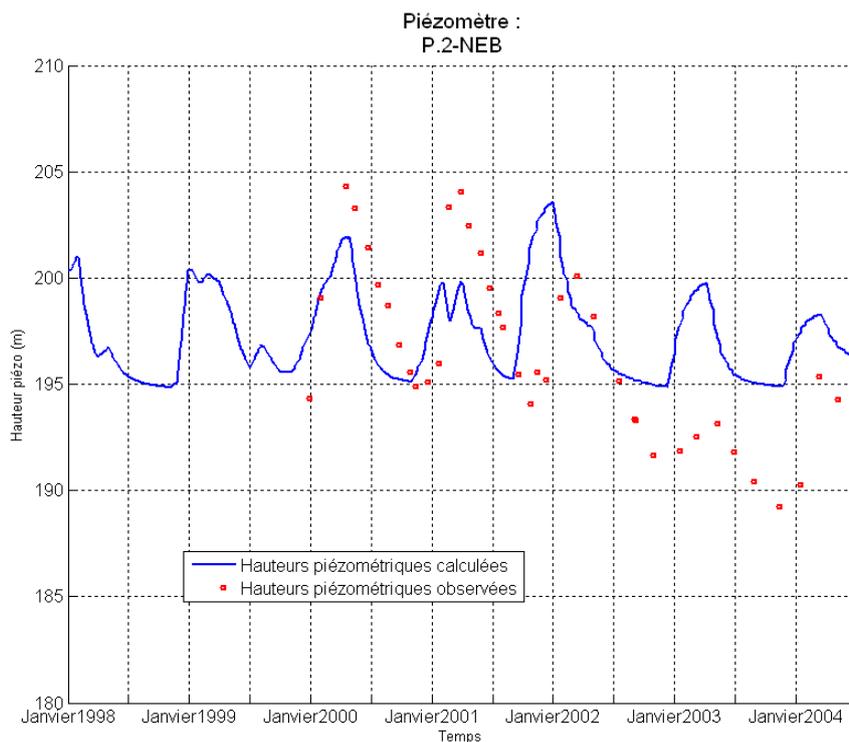


Figure 30 : Comparaison de la dynamique piézométrique calculée par le modèle et observée pour le piézomètre PZ2 situé dans le bassin du Néblon.

La Figure 30 présente, à titre d'exemple, la piézométrie observée et calculée, par le modèle intégrant les données EPICgrid, pour le piézomètre PZ2 situé dans le bassin du Néblon. Le modèle local reproduit assez bien la dynamique de la piézométrie. Il faut noter, qu'au voisinage des frontières, la qualité de la calibration se détériore. L'utilisation du modèle

'local' ne permet pas de tenir compte des variations de la piézométrie régionale comme dans le modèle régional.

### 3.3.1.2 Calcul du transport des nitrates dans les eaux souterraines à partir des flux calculés avec le modèle EPICgrid

Le modèle hydrogéologique du bassin du Néblon a également été utilisé pour calculer le transport des nitrates dans les eaux souterraines, en utilisant les flux massiques de nitrates à 4m de profondeur calculés avec EPICgrid.

Les Figure 31 et Figure 32 présentent des instantanés des teneurs en nitrates calculées fin 2005 pour, respectivement, des simulations utilisant les recharges et intrants simplifiés selon l'occupation du sol ou les recharges et intrants calculés avec EPICgrid.

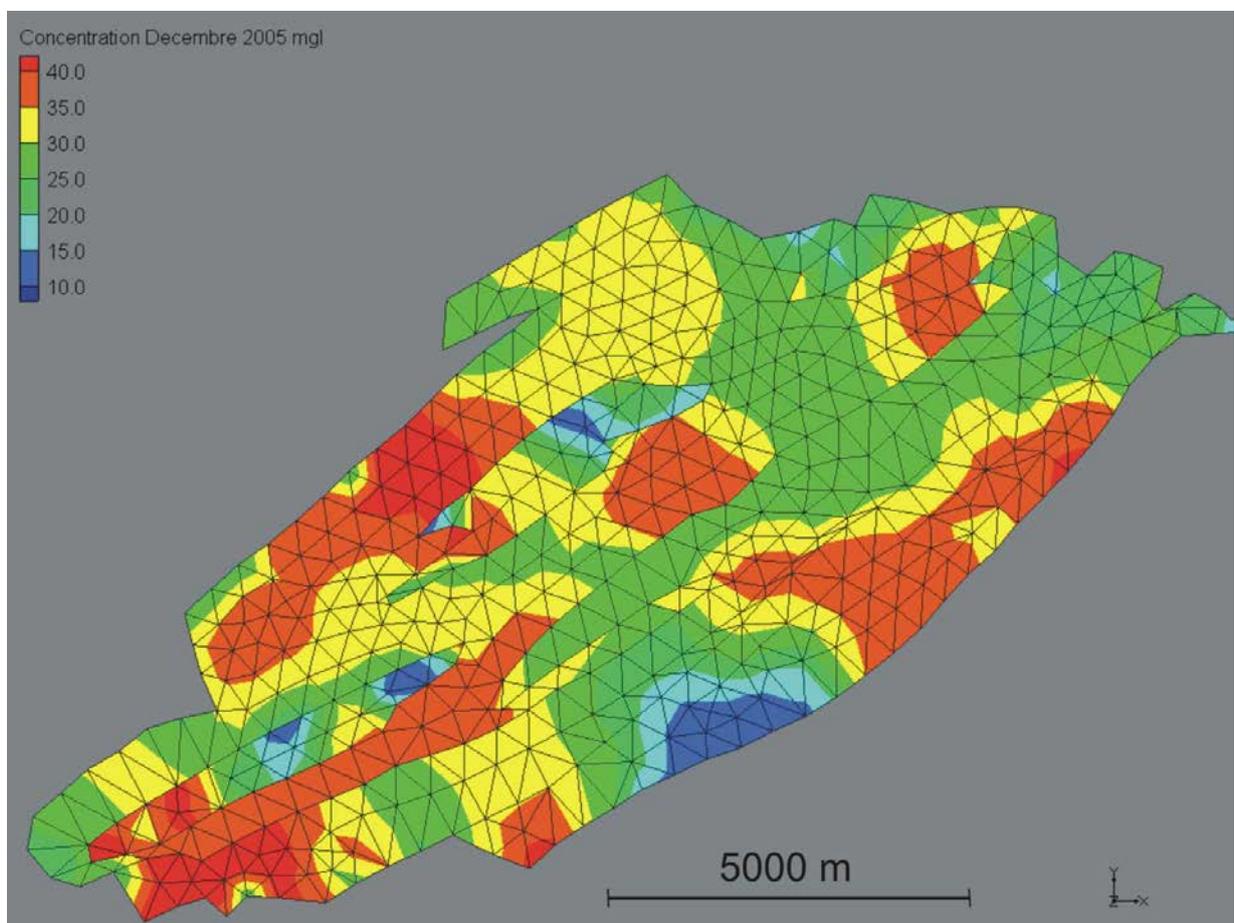
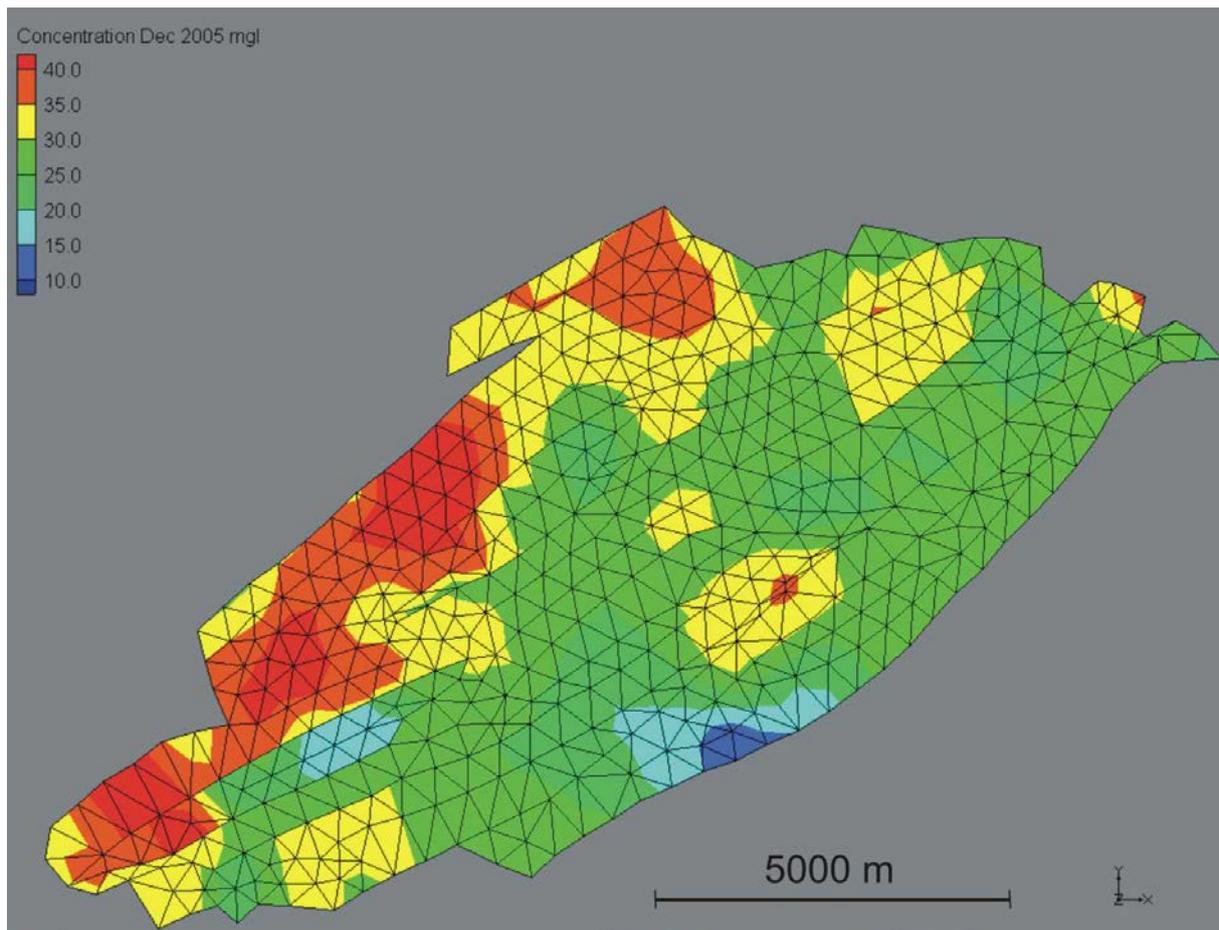


Figure 31 : Concentrations en nitrates (mg/l) dans les eaux souterraines fin 2005 calculées en utilisant l'input simplifié et spatialisé Synclin'Eau



**Figure 32 : Concentrations en nitrates (mg/l) dans les eaux souterraines fin 2005 calculées en intégrant les résultats du modèle EPICgrid**

Les Figure 31 et Figure 32 présentent dans leur globalité de nombreuses similitudes tant dans les valeurs des concentrations en nitrate calculées que dans la répartition spatiale de ces concentrations. Les résultats obtenus avec l'input simplifié et spatialisé Synclin'EAU semblent a priori mieux reproduire l'hétérogénéité spatiale et les contrastes observés sur la carte d'occupation du sol. Il faut cependant rappeler que les calculs EPIC-GRID reposent sur une maille d'un km<sup>2</sup> ce qui peut introduire un certain lissage dans les flux massiques calculés.

Les évolutions temporelle des concentrations en nitrate observées dans le bassin du Néblon et calculées en utilisant respectivement les intrants simplifié et spatialisé Synclin'EAU et les intrants EPICgrid sont comparées de la Figure 34 à la Figure 42 pour différents points d'échantillonnage (localisés à la Figure 33).

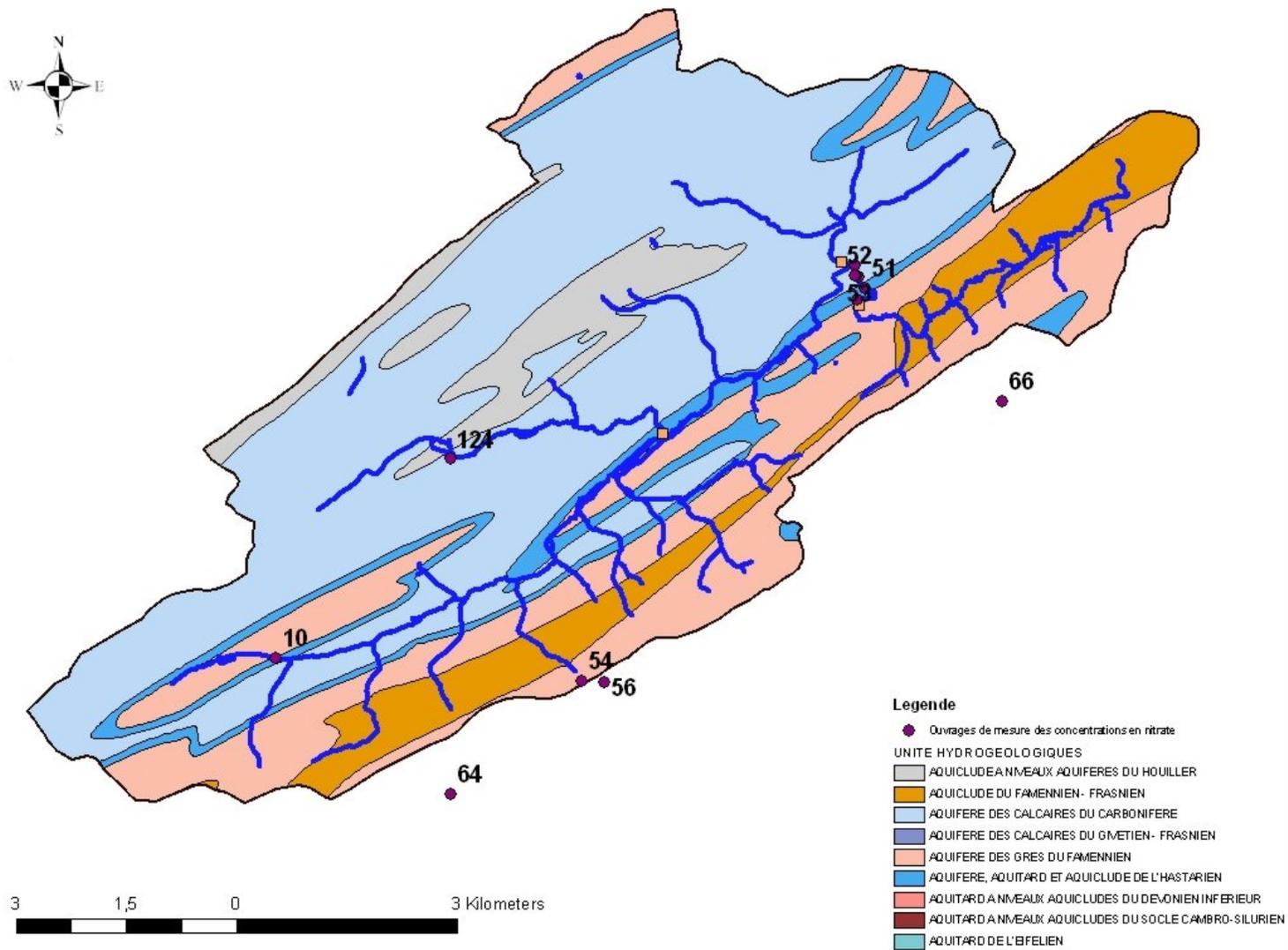


Figure 33 : Localisation des points de mesure des teneurs en nitrates dans les eaux souterraines du bassin du Néblon

De manière générale, les évolutions des concentrations prédites grâce aux intrants calculés avec le modèle EPICgrid sont en bonne adéquation avec les données observées, tout comme celles obtenues à l'aide de l'input simplifié et spatialisé Synclin'EAU. La seule exception consiste l'ouvrage 51 (Figure 35) où les simulations surestiment les concentrations. Toutefois, ce point d'observation est physiquement situé au droit des schistes du Pont d'Arcole. Cette formation géologique n'est qu'implicitement représentée dans le modèle régional, par une condition limite interne. Ceci peut expliquer la difficulté à représenter l'évolution des teneurs en nitrates à cet endroit.

De manière générale, on peut tirer les constats suivants :

- Les deux modes de représentation de l'intrant nitrate donnent des résultats relativement comparables, tant en niveaux de concentrations calculées qu'en matière de tendances temporelles. Ceci indique que l'approche Synclin'EAU, basée (1) sur une représentation linéaire puis stable de l'évolution au cours du temps des concentrations en nitrates dans l'eau d'infiltration dans la nappe et (2) sur la carte d'occupation du sol, constitue une bonne première approximation.
- Comme on pouvait s'y attendre, l'approche EPICgrid permet de représenter une variabilité temporelle des concentrations en nitrate plus importante, reflétant mieux la variabilité temporelle réelle des intrants (saisonnalité des épandages et du lessivage, rotations des cultures ...).
- Par contre, même si la modélisation EPICgrid montre une variabilité temporelle, aucune des deux approches n'est réellement capable de reproduire fidèlement les variations de concentration avec les amplitudes telles qu'observées dans la nappe. Il est probable que la cyclicité observée dans ces variations est pour bonne part à mettre en liaison avec les fluctuations piézométriques, les remontées de nappe ayant tendance à accélérer l'entrée des nitrates contenus dans la zone non saturée dans la zone saturée. Les baisses de niveau piézométrique de la nappe ont, quant à elle tendance à « décrocher » ce front d'infiltration. Le couplage des deux modèles se faisant par un transfert de flux eau – soluté à une profondeur fixe, ces processus sont relativement mal représentés.
- Quelque soit les deux modes de représentation de l'intrant nitrate testés, les simulations montrent, pour les dernières années de modélisation (2000 à 2005), une évolution légèrement à la hausse voire une stabilisation mais pas de décroissance des concentrations en nitrates calculées.

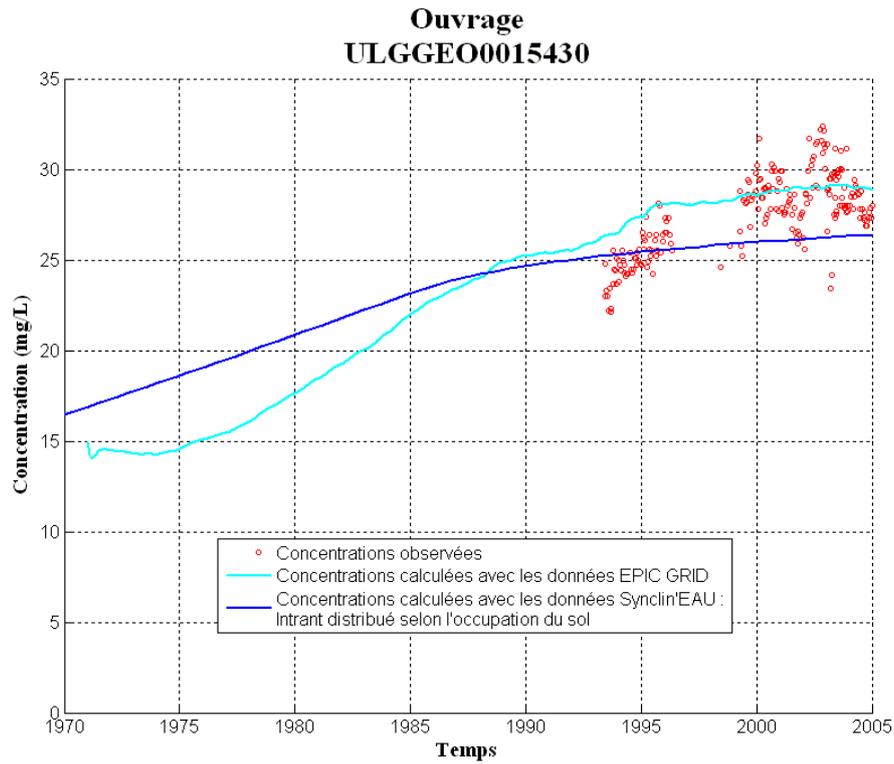


Figure 34 : Evolution temporelle des concentrations en nitrate observées et calculées en utilisant respectivement les intrants simplifié et spatialisé Synclin'EAU et les intrants EPICgrid, au point d'observations 59. (VERSION PROVISoire)

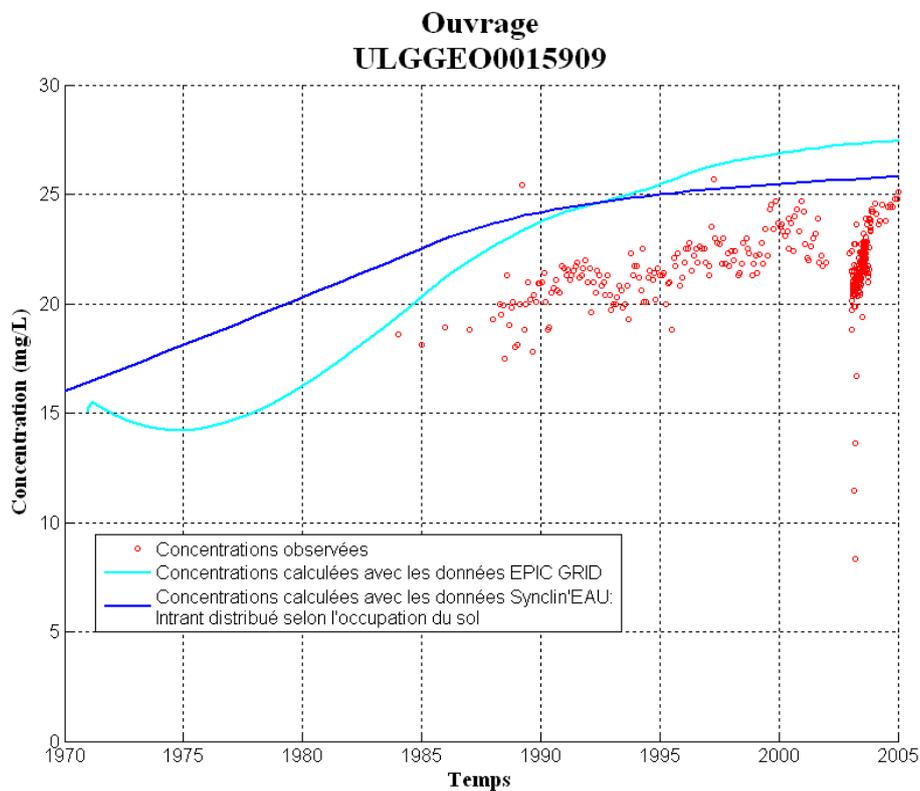
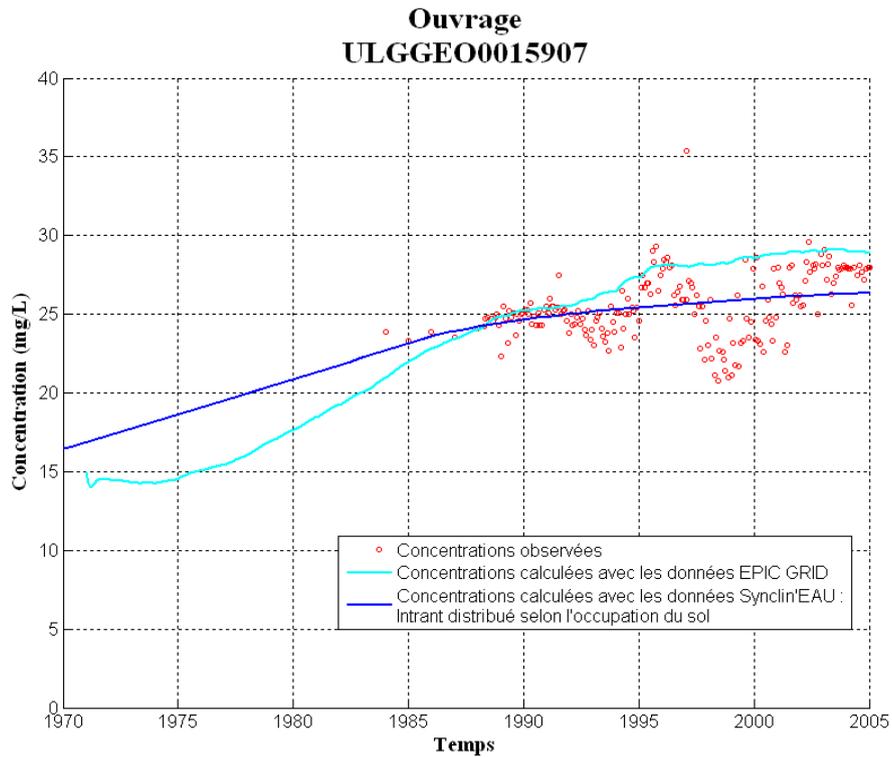
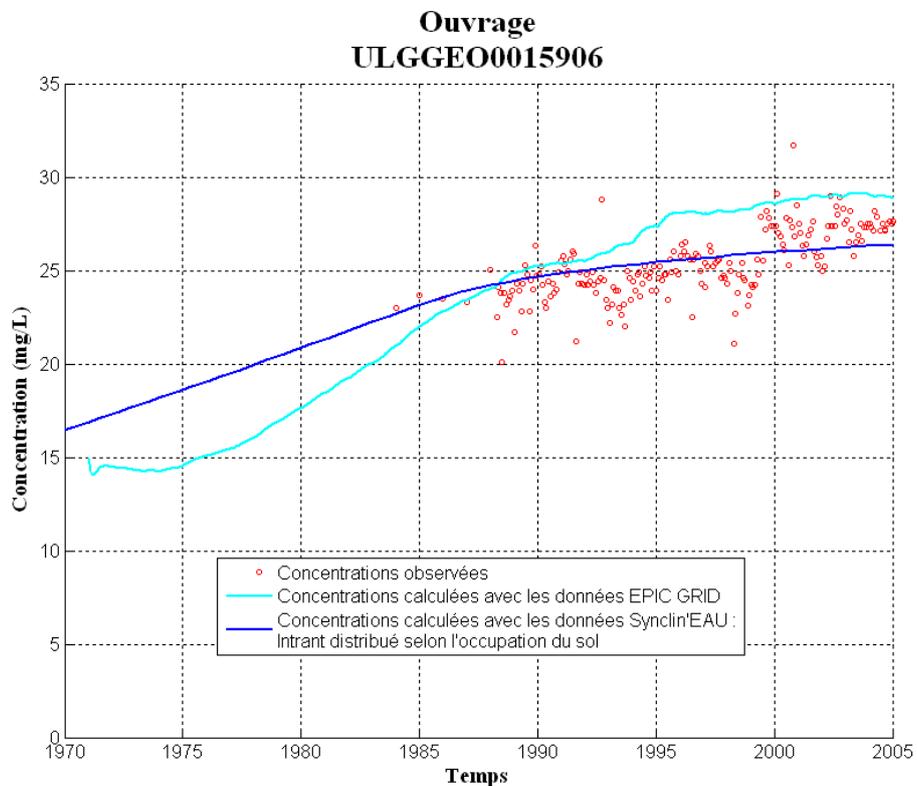


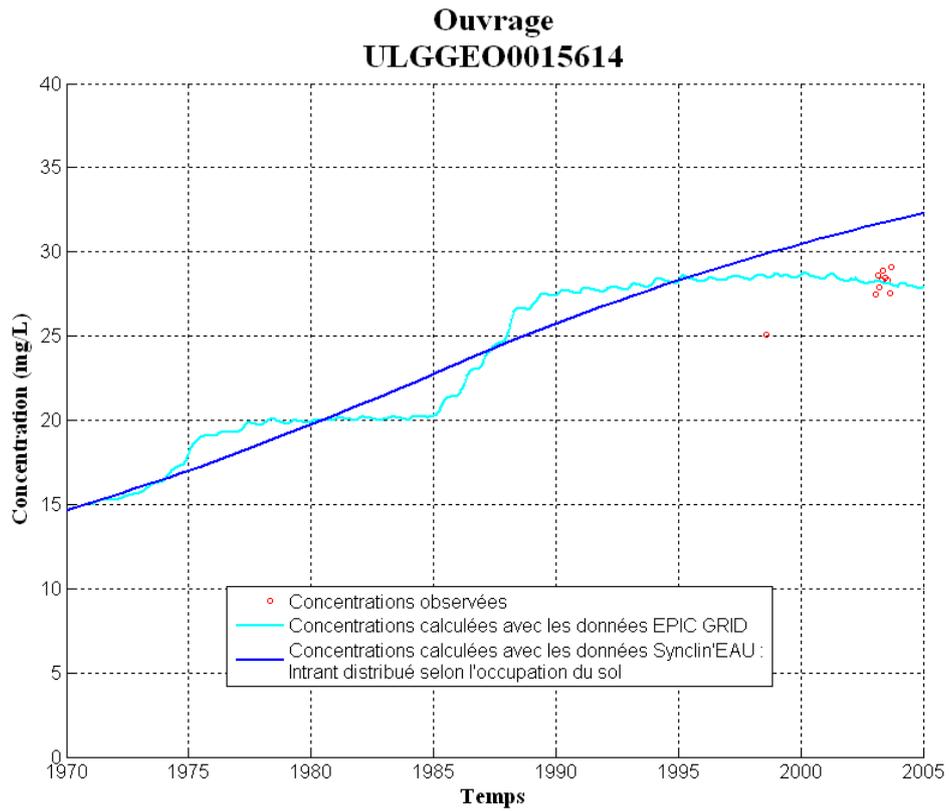
Figure 35 : Evolution temporelle des concentrations en nitrate observées et calculées en utilisant respectivement les intrants simplifié et spatialisé Synclin'EAU et les intrants EPICgrid, au point d'observations 51. (VERSION PROVISoire)



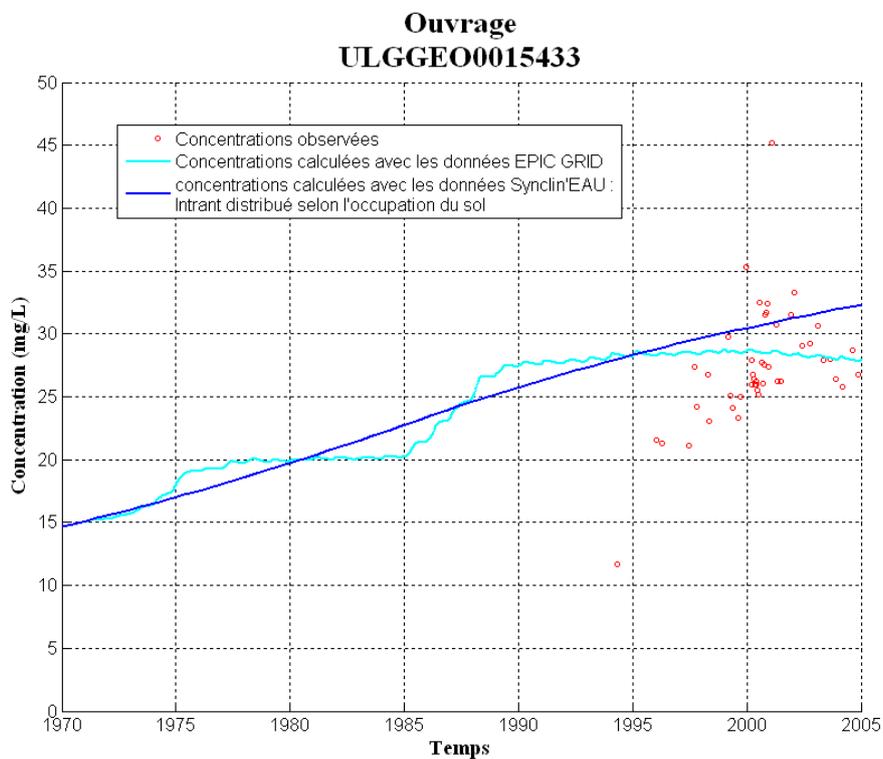
**Figure 36 : Evolution temporelle des concentrations en nitrate observées et calculées en utilisant respectivement les intrants simplifié et spatialisé Synclin'EAU et les intrants EPICgrid, au point d'observations 52. (VERSION PROVISoire)**



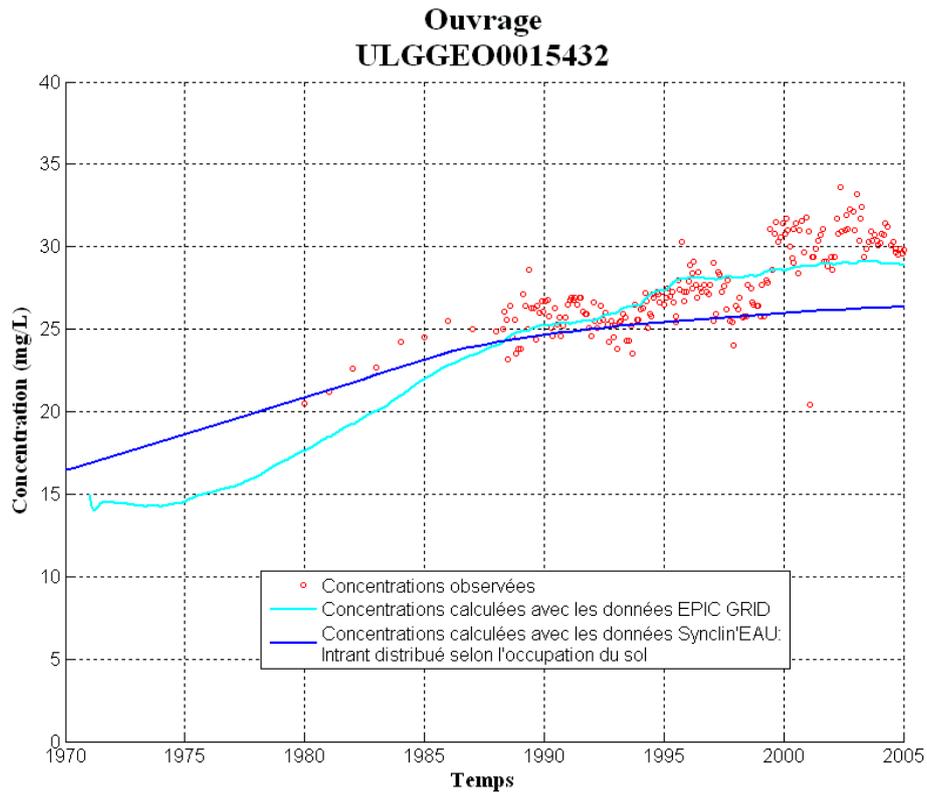
**Figure 37 : Evolution temporelle des concentrations en nitrate observées et calculées en utilisant respectivement les intrants simplifié et spatialisé Synclin'EAU et les intrants EPICgrid, au point d'observations 53. (VERSION PROVISoire)**



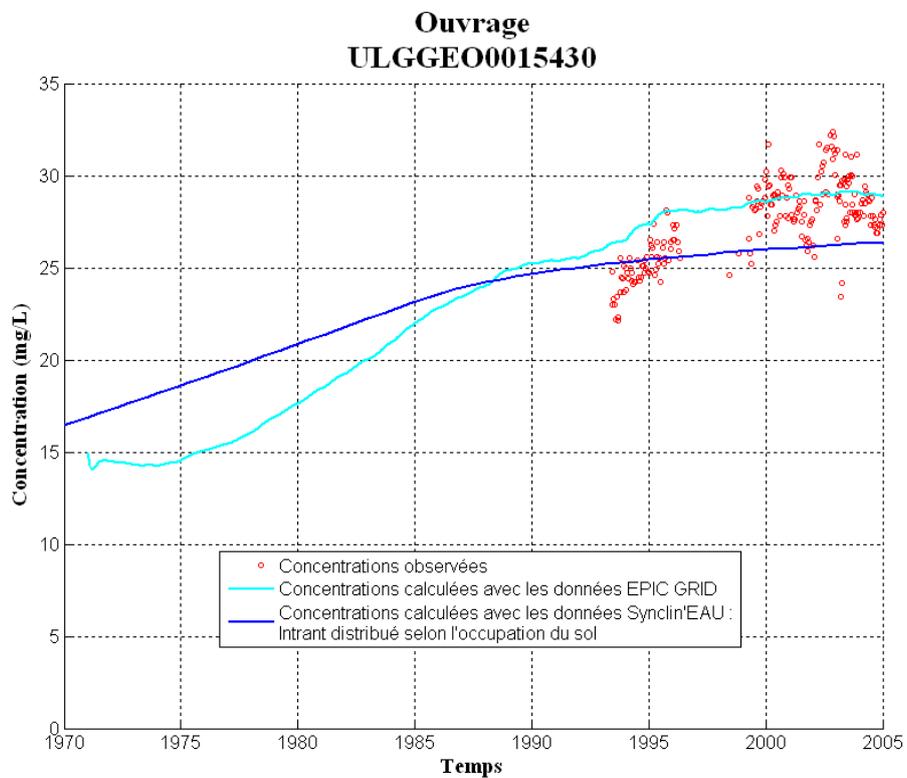
**Figure 38 : Evolution temporelle des concentrations en nitrate observées et calculées en utilisant respectivement les intrants simplifié et spatialisé Synclin'EAU et les intrants EPICgrid, au point d'observations 54. (VERSION PROVISoire)**



**Figure 39 : Evolution temporelle des concentrations en nitrate observées et calculées en utilisant respectivement les intrants simplifié et spatialisé Synclin'EAU et les intrants EPICgrid, au point d'observations 56. (VERSION PROVISoire)**

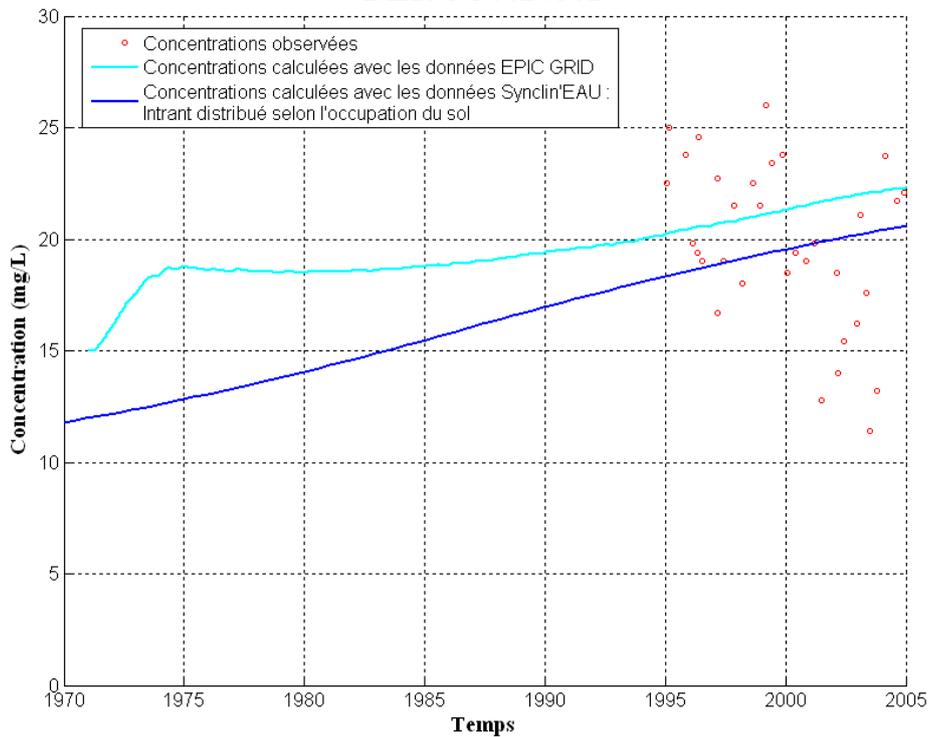


**Figure 40 : Evolution temporelle des concentrations en nitrate observées et calculées en utilisant respectivement les intrants simplifié et spatialisé Synclin'EAU et les intrants EPICgrid, au point d'observations 57. (VERSION PROVISoire)**



**Figure 41 : Evolution temporelle des concentrations en nitrate observées et calculées en utilisant respectivement les intrants simplifié et spatialisé Synclin'EAU et les intrants EPICgrid, au point d'observations 58. (VERSION PROVISoire)**

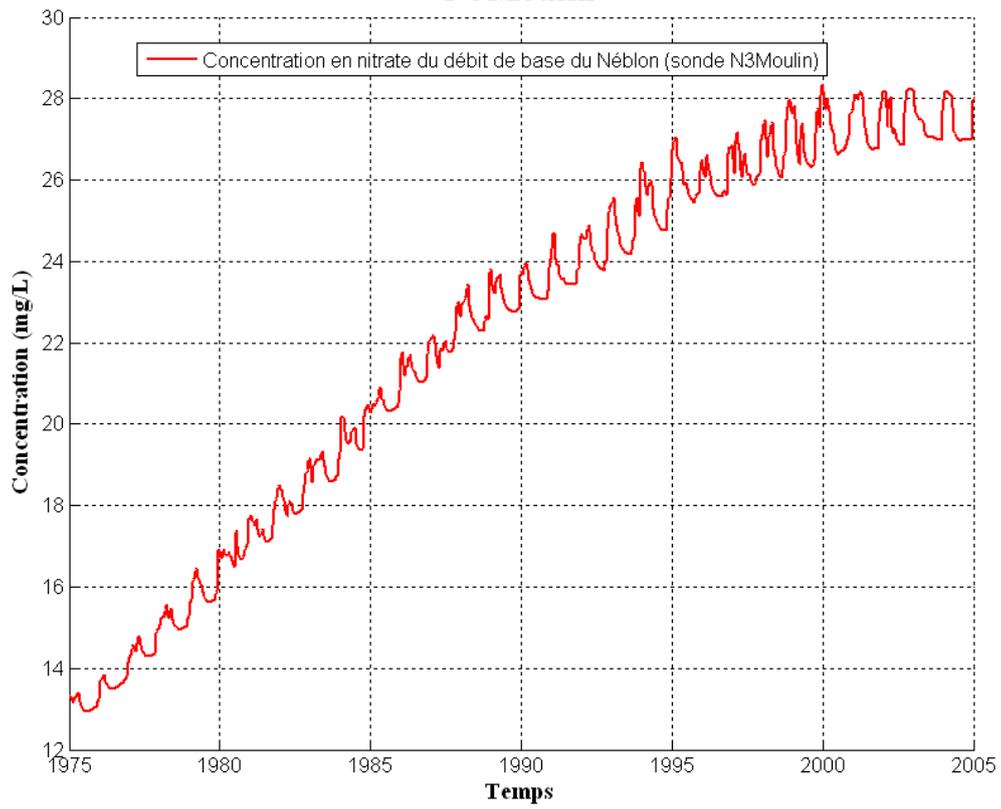
**Ouvrage  
DIXSOU0027561**



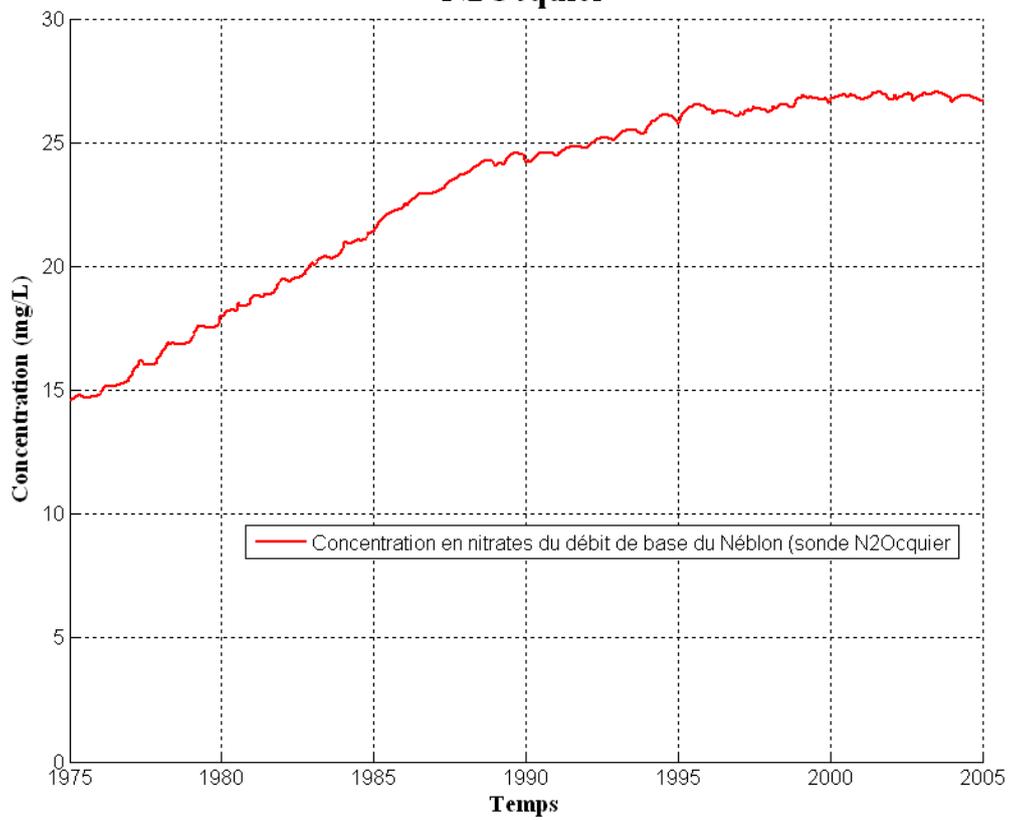
**Figure 42: Evolution temporelle des concentrations en nitrate observées et calculées en utilisant respectivement les intrants simplifié et spatialisé Synclin'EAU et les intrants EPICgrid, au point d'observations 124. (VERSION PROVISoire)**

Un des atouts de l'approche de modélisation régionale est de permettre la quantification des flux massiques ou des concentrations en nitrate dans les eaux souterraines échangées avec le réseau hydrographique de surface (condition de Fourier externe). La Figure 43 reprend les variations de concentrations calculées dans le débit de base au droit des stations limnimétriques du projet Synclin'EAU 'N3 Moulin' et 'N2 Ocquier' et du captage de Néblon-le-Moulin en utilisant les intrants calculés avec EPICgrid. Ces concentrations calculées augmentent depuis environ 15 mg/l (condition initiale) et évoluent vers des teneurs proches de 30 mg/l. Ici encore, les valeurs des concentrations se stabilisent durant les 5 dernières années. A hauteur de la station limnimétrique Synclin'EAU N3Moulin, les résultats du modèle montrent une variation saisonnière des concentrations en nitrates dans le débit de base. Il semblerait que de plus fortes concentrations en nitrates y soient calculées durant les périodes de hautes eaux.

### N3Moulin



### N2Ocquier



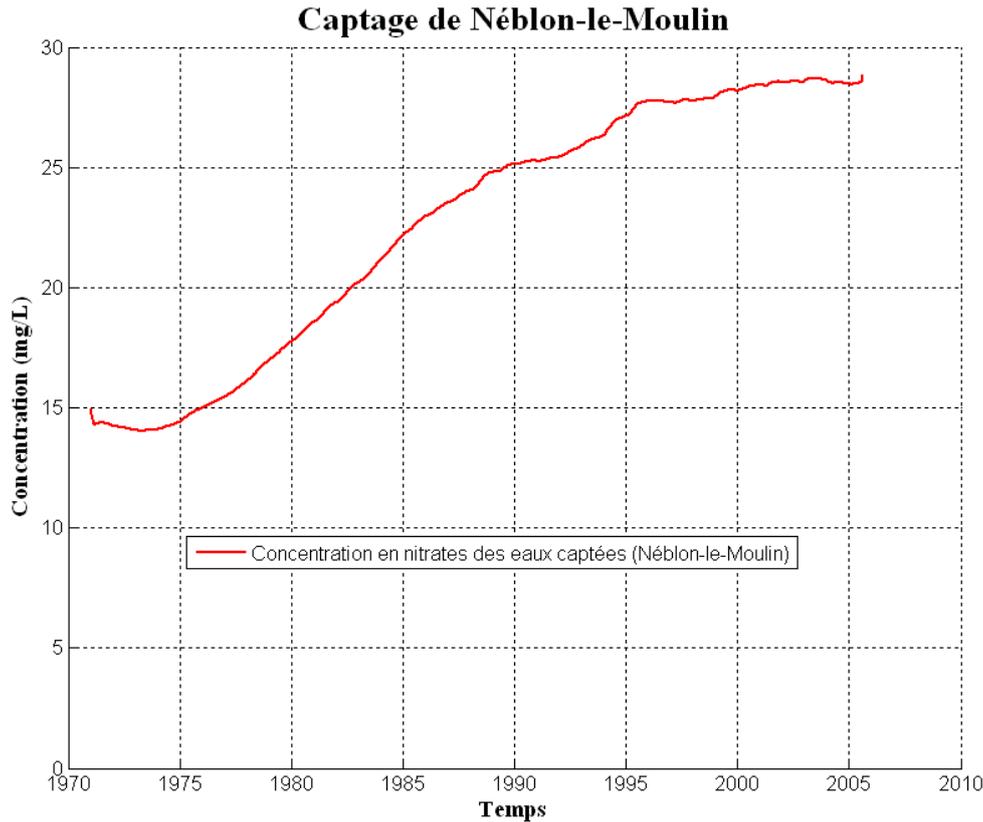


Figure 43 : Concentrations en nitrate calculées dans les débits de base au niveau des sondes ‘N3 Moulin’ et ‘N2 Ocquier’ et dans les eaux souterraines captées à l’émergence de Néblon-le-Moulin. (VERSION PROVISOIRE)

### 3.4 Prédiction des évolutions des concentrations en nitrate dans le bassin du Néblon pour deux scénarios simplifiés d’intrant en nitrate

Le modèle du bassin du Néblon permet d’étudier localement l’effet de changements dans les concentrations en nitrates dans les eaux d’infiltration, par exemple suite à des changements de pratiques agricoles, sur les concentrations en nitrates retrouvées dans les eaux souterraines.

Deux scénarios extrêmes de changement de concentrations en nitrate dans les eaux d’infiltration ont été testés. Ces scénarios, quoique irréaliste, ont principalement pour but de mettre en évidence le temps de réponse des aquifères à des changements importants de niveau de concentration des intrants nitrate

1. Scénario 1: Diminution de moitié des intrants nitrates dans les eaux d’infiltrations des zones de prairies et de culture

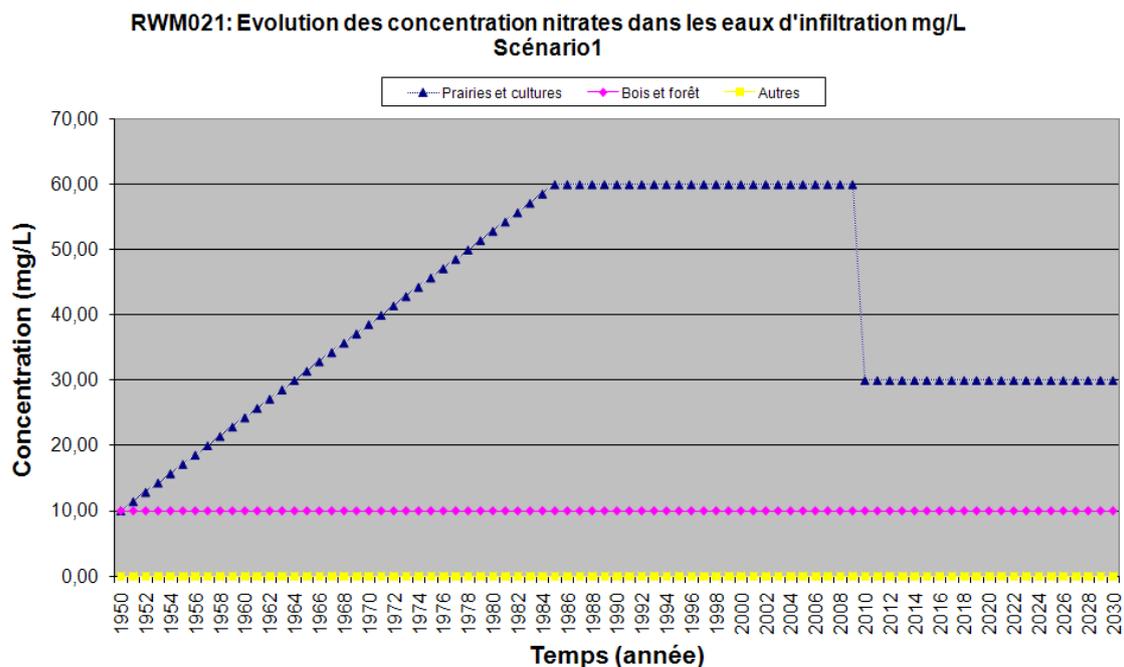


Figure 44: Evolution des concentrations en nitrate dans les eaux d'infiltration selon le scénario 1

- Scénario 2: Cas extrême de la suppression des intrants pour l'ensemble de la zone modélisée

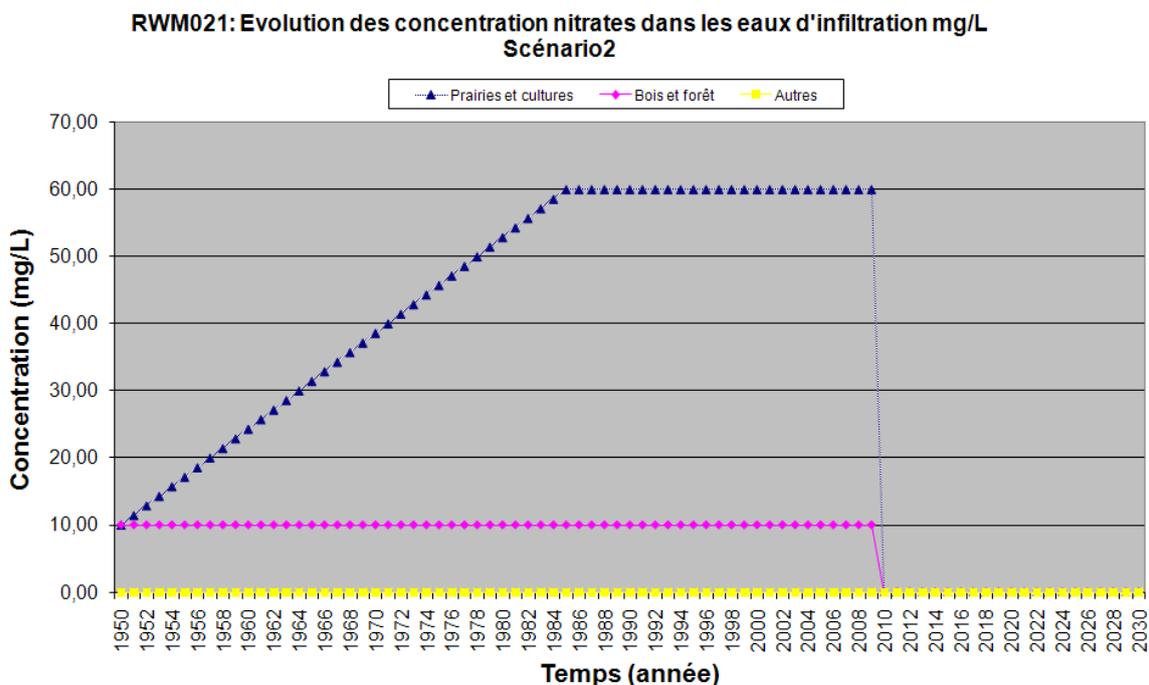
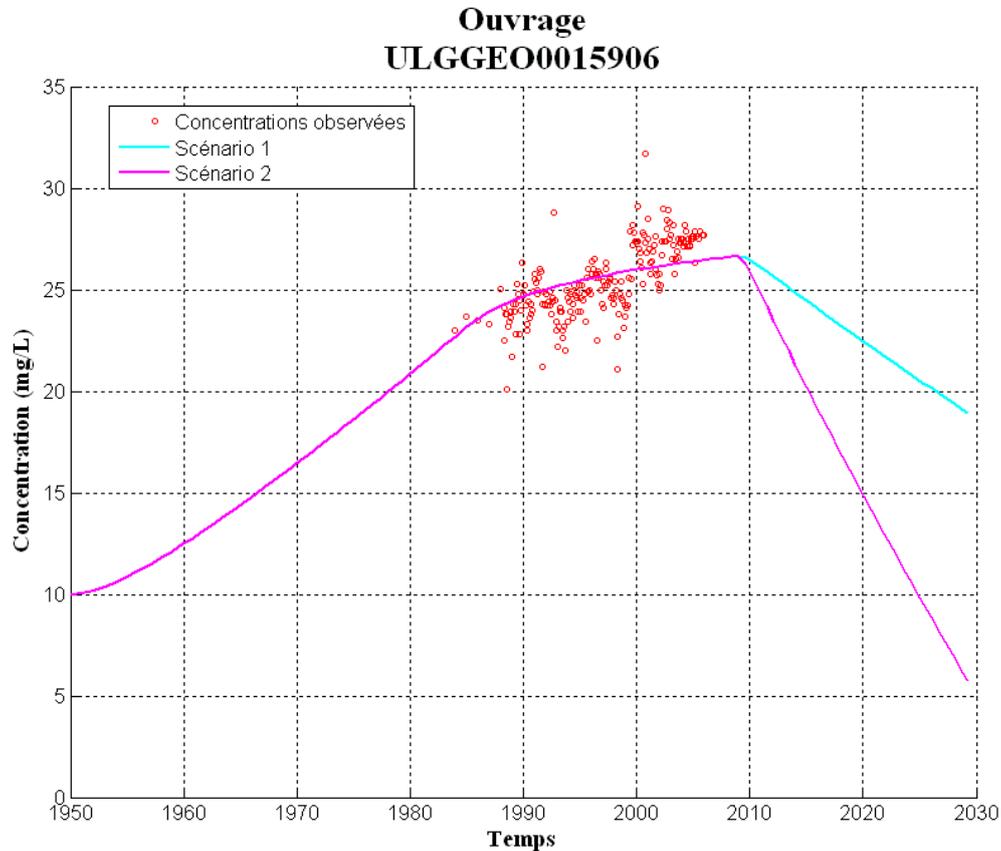


Figure 45: Evolution des concentrations en nitrate dans les eaux d'infiltration selon le scénario 2

La Figure 46 présente, un exemple d'évolutions des concentrations en nitrate calculées pour les simulations des scénarios 1 et 2 comparées aux mesures au point d'échantillonnage 53 du bassin du Néblon.



**Figure 46 : Evolution des concentrations en nitrate (mg/l) calculées pour les scénarios 1 et 2 au point d'observation nitrate 53 (VERSION PROVISoire)**

Les résultats des simulations à partir des scénarios 1 et 2, présentés aux Figure 46 à Figure 48 montrent que les concentrations en nitrate calculées dans le bassin du Néblon baissent rapidement et sur l'entièreté du bassin. Ces résultats sont cependant à nuancer. D'une part, les maillages utilisés pour construire les modèles Synclin'Eau ne permettent pas de représenter de manière détaillée la zone non saturée des aquifères modélisés. D'autre part, il n'existe, à ce jour, pas de données de terrain permettant de valider ces résultats, notamment en ce qui concerne les temps de transferts des solutés dans la zone non saturée des aquifères, pour des aquifères calcaires ou gréseux fracturés tels que ceux rencontrés dans le bassin du Néblon.

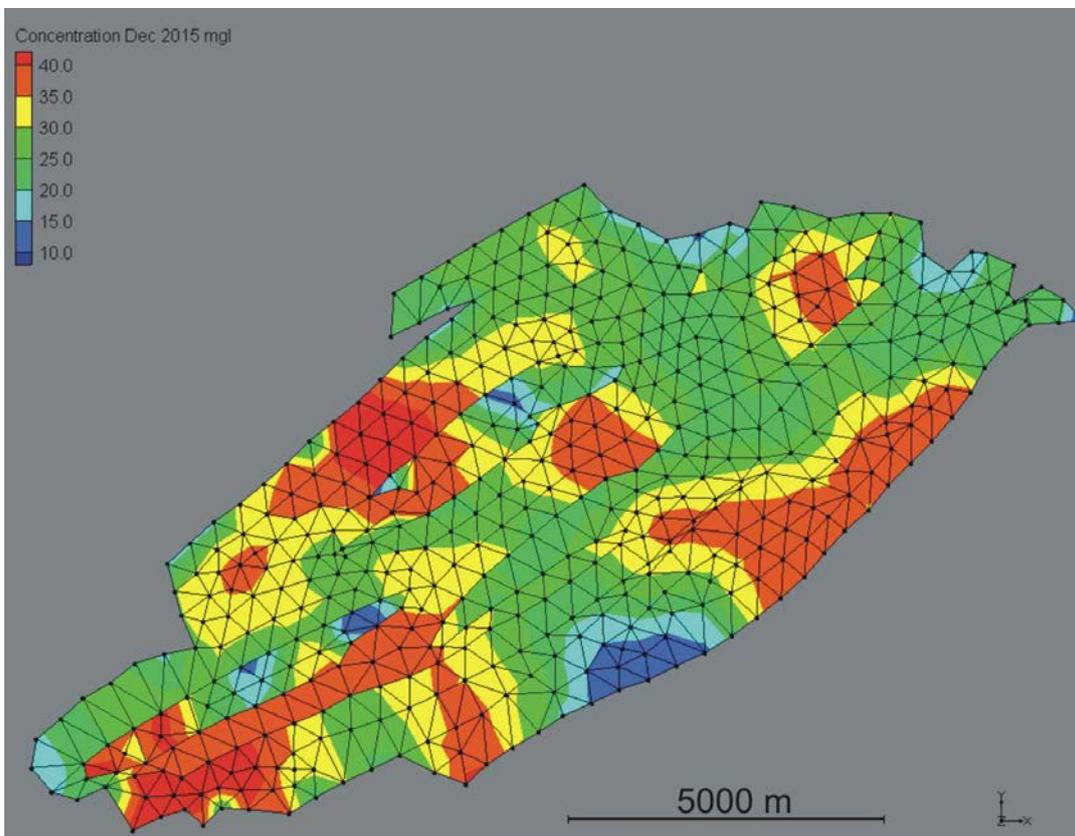
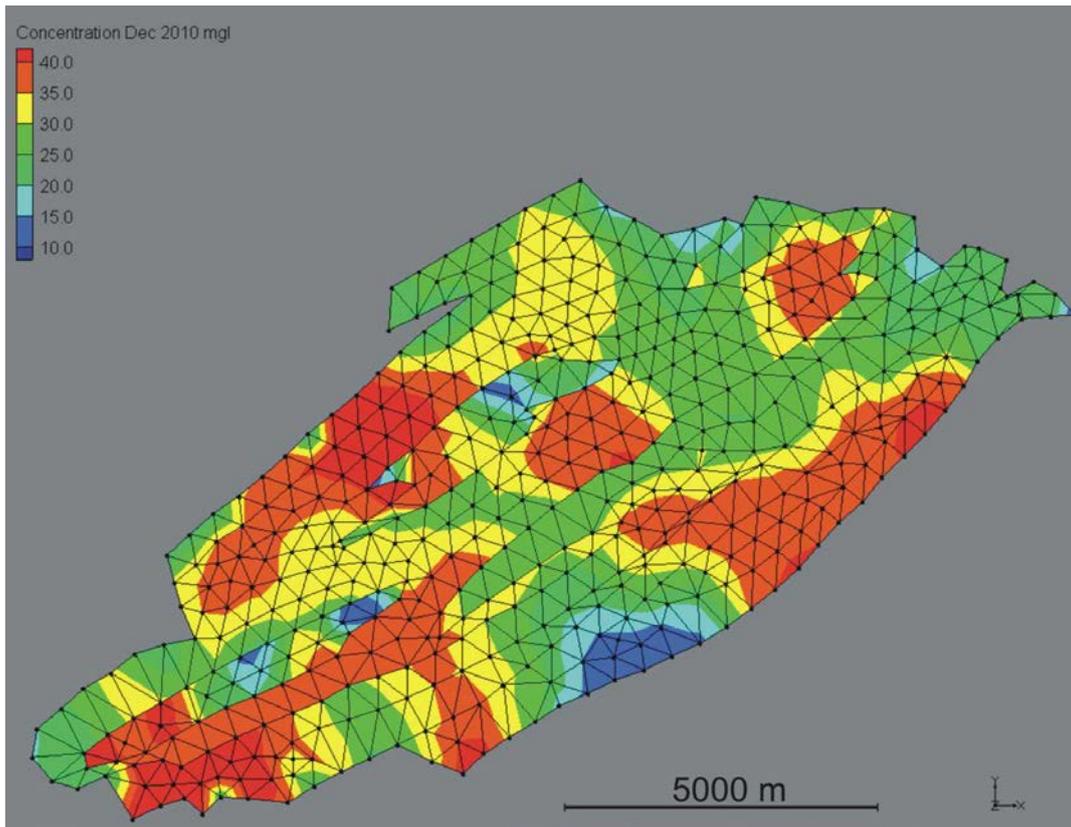


Figure 47 : Concentrations en nitrate (mg/l) simulée en décembre 2010 et décembre 2015 dans le bassin du Néblon pour le scénario1

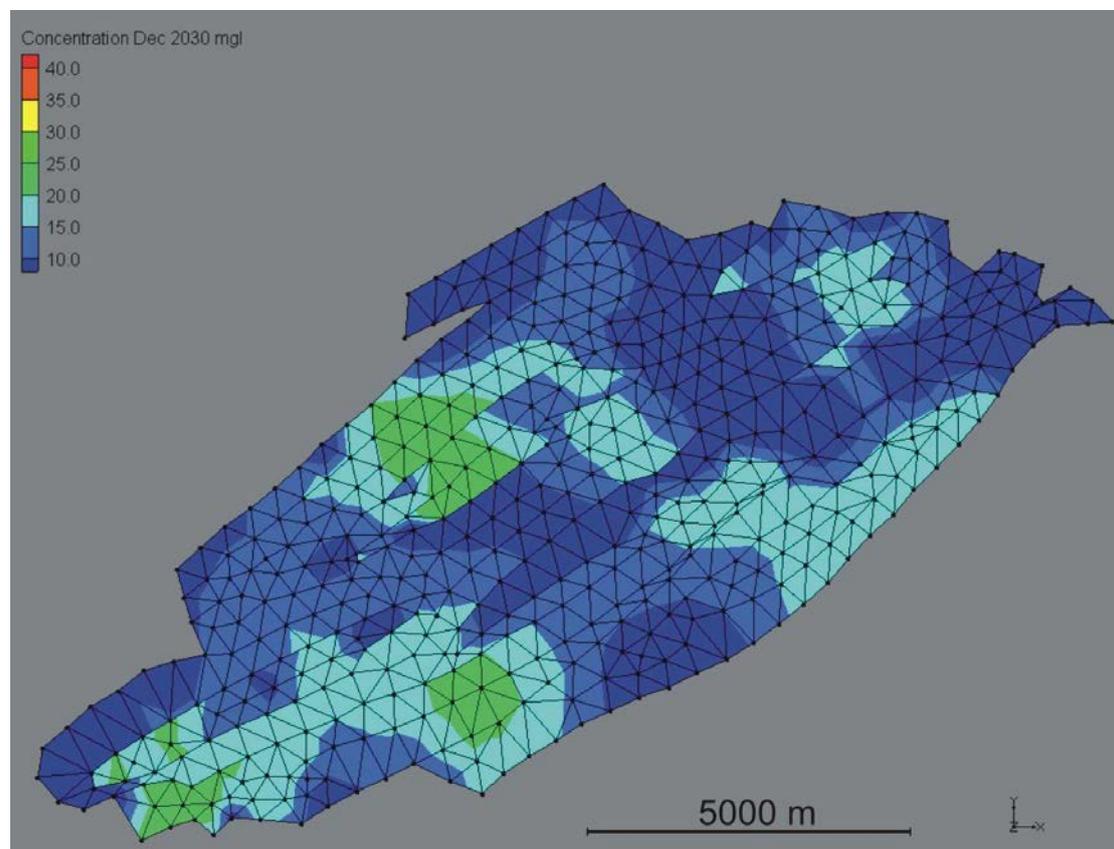
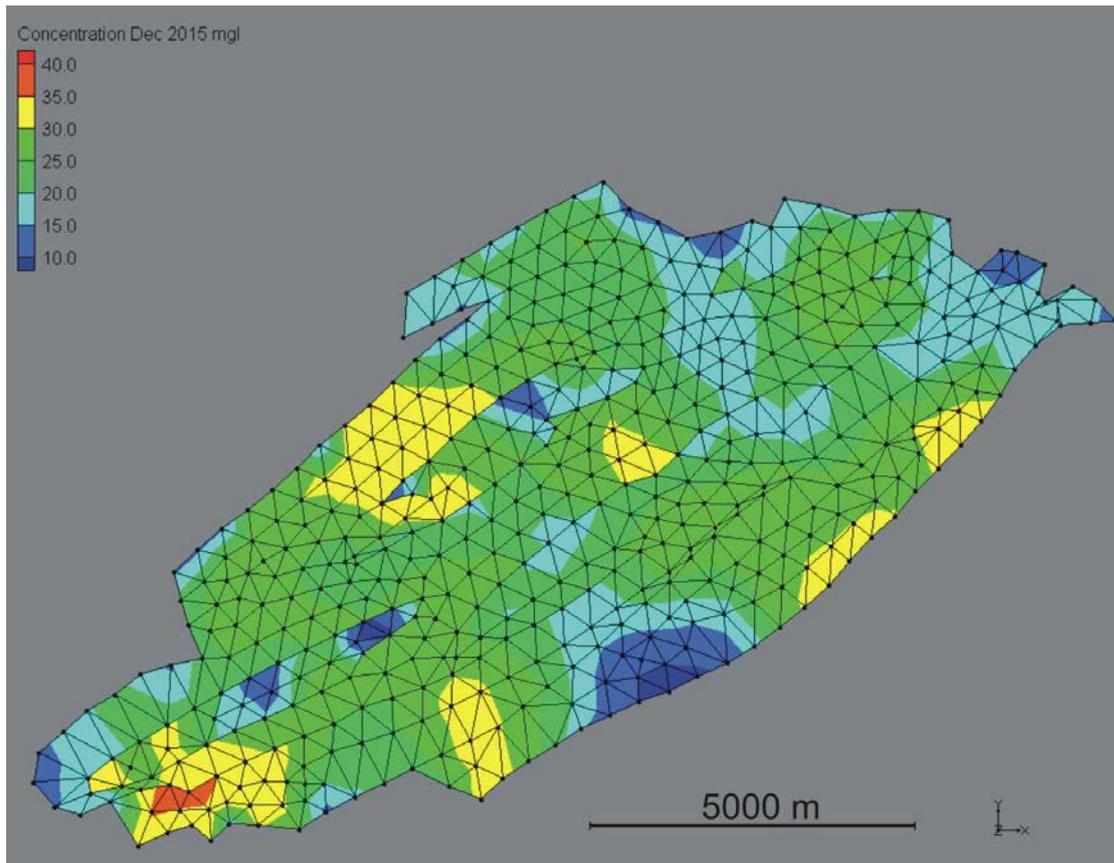


Figure 48 : Concentrations en nitrate (mg/l) simulée en décembre 2015 et décembre 2030 dans le bassin du Néblon pour le scénario2

## 4 Conclusions

Le livrable D6.3 constitue une synthèse des travaux réalisés par l'équipe ULg-Hydrogéologie, en accord avec la DGARNE et la SPGE, en vue de poursuivre l'exploitation des modèles numériques régionaux des masses d'eau souterraine RWM011, RWM012 et RWM021. Ces modèles ont été développés et calibrés dans le cadre du projet Synclin'Eau. Ce livrable reprend les résultats correspondant à différentes demandes spécifiques de la DGARNE.

D'un point de vue quantitatif, les travaux ont porté sur la quantification et la spatialisation des flux échangés entre sous-bassins et entre les eaux souterraines et les eaux de surface.

D'un point de vue qualitatif, différents travaux ont été réalisés en vue d'améliorer les simulations relatives à l'évolution temporelle des concentrations en nitrate dans les eaux souterraines principalement dans le bassin du Néblon en intégrant dans le modèle les résultats du modèle EPICgrid.

Cette dernière phase du projet Synclin'Eau a permis de confirmer la capacité de la méthodologie de modélisation régionale (initiée dans le cadre du projet PIRENE par ULg-Hydrogéologie) à reproduire les écoulements d'eau et le transport de soluté dans les eaux souterraines à l'échelle régionale.

D'un point de vue quantitatif, les modèles développés dans le cadre du projet Synclin'Eau sont opérationnels pour calculer les flux échangés entre sous-bassins hydrologiques et entre les différentes unités hydrogéologiques au sein d'un sous-bassin, pour autant que le découpage en sous-domaine ait été réalisé dans ce sens. Cette capacité est illustrée dans ce livrable pour quelques sous-bassins hydrologiques, choisis par la DGARNE, comme par exemple le bassin du Hoyoux ou le bassin du Houyoux. L'exemple du Houyoux est, de ce point de vue, particulièrement éclairant : les différentes simulations réalisées ont permis de mettre en évidence l'impact des captages de Vedrin sur la piézométrie régionale et sur les débits échangés entre le bassin du Houyoux et les bassins voisins.

Les modèles développés dans le cadre du projet Synclin'Eau peuvent également être utilisés pour définir le sens des échanges et estimer les débits d'eau échangés entre les eaux souterraines et les eaux de surface pour les différents tronçons de rivière représentés dans le modèle. Cette capacité est illustrée, dans ce livrable, pour différents bassins hydrologiques des masses d'eau souterraine RWM011 et RWM021. Quelques résultats de ces simulations ont pu être confrontés aux données de terrains acquises lors de la phase de caractérisation du projet Synclin'Eau (différents tronçons de rivière avaient pu être classés en fonction de leur caractère perdant ou drainant). Il est cependant impossible de confronter les résultats de modélisation avec des données de terrain pour l'ensemble des tronçons modélisés vu le caractère parfois lacunaire de ces données. Il faut cependant noter que le caractère régional des modèles et l'utilisation de mailles de tailles importantes ne permet pas toujours de représenter correctement les interactions locales entre les eaux souterraines et les eaux de

surface. Logiquement, il s'avère que les résultats obtenus dépendent très fortement de la qualité locale de la calibration et d'une bonne représentation de la piézométrie à proximité des cours d'eau.

En ce qui concerne la simulation du transport de nitrate dans les eaux souterraines, il est maintenant possible de calculer les concentrations en nitrate associées au débit d'eau souterraine transitant des nappes aquifères vers les cours d'eau. Des améliorations ont, dans cette optique, été apportées au code de calcul SUFT3D afin de permettre l'examen de ces données, déjà calculées dans les modèles développés précédemment mais non directement accessibles pour analyses. En illustration de ce progrès important, les concentrations calculées associées au débit de base sont présentées pour les différents bassins hydrologiques composant la masse d'eau souterraine RWM011.

A la demande de la DGARNE, des simulations complémentaires de l'évolution temporelle des concentrations en nitrates dans les aquifères du bassin du Néblon ont été réalisées. A cette fin, un modèle local du Néblon a été extrait du modèle régional de la masse d'eau souterraine RWM021. Les conditions appliquées aux frontières de ce modèle local ont été extraites des simulations effectuées à l'aide du modèle régional. Les flux massiques de nitrate associés aux flux d'infiltration calculés par le modèle EPICgrid (Gembloux Agro-Bio Tech, A. Degré, C. Sohler) ont été intégrés dans ce nouveau modèle. Les résultats des simulations, obtenus avec cette nouvelle représentation de l'intrant nitrate, ont été comparés aux résultats des simulations obtenus en représentant l'intrant nitrate de manière simplifiée et spatialisée sur base de l'occupation du sol. L'intégration des résultats EPICgrid permet, dans une certaine mesure, de mieux représenter l'évolution temporelle et d'améliorer la représentation de la variabilité saisonnière des concentrations en nitrate mesurées dans le bassin du Néblon. Les simulations réalisées pour le bassin du Néblon montrent, quelque soit la représentation de l'intrant nitrate testée, que les concentrations en nitrate évoluent à la hausse ou se stabilisent pour les dernières années simulées (2000-2005). Aucune évolution à la baisse des concentrations en nitrate n'est calculée.

Deux scénarios d'évolution des concentrations en nitrate dans les eaux souterraines ont été simulés en considérant deux schémas de diminution extrêmes des concentrations en nitrate dans les eaux d'infiltration. Les résultats de ces simulations montrent une réponse rapide du bassin du Néblon aux changements des concentrations en nitrate dans les eaux d'infiltration. Ces résultats sont cependant à nuancer. Il n'existe, à ce jour, pas de données de terrain concernant les temps de transfert de soluté dans la zone non saturée permettant de valider ces résultats pour des aquifères calcaires ou gréseux fracturés tels que ceux rencontrés dans le bassin du Néblon.

Le type de démarche et les résultats présentés dans ce livrable pourraient être étendus dans le futur à l'ensemble des zones modélisées dans le cadre du projet Synclin'Eau.

- Les calculs de bilans hydrogéologiques et les simulations des échanges entre les eaux souterraines et les eaux de surface pourraient être réalisés pour les différents sous-bassins modélisés, moyennant l'analyse des fichiers de résultats très riches en informations mais dont l'interprétation peut s'avérer être un travail considérable.

- Des simulations des évolutions temporelles des concentrations en nitrate similaires à celles réalisées dans le bassin du Néblon pourraient également être réalisées. L'extraction d'un modèle local sur base du modèle régional a montré son efficacité notamment en terme de temps de calcul et de définition des conditions aux frontières. Les simulations réalisées pour le bassin du Néblon ont, de plus, permis de mettre en place et de perfectionner les procédures et outils d'intégration des résultats du modèle EPICgrid au sein des modèles développés avec le code SUFT3D.

Enfin, l'approche de modélisation développée dans le cadre du projet Synclin'Eau pourrait être appliquée à d'autres zones en Région wallonne. Les outils et procédure d'intégration des résultats du modèle EPICgrid au sein des modèles 'eau souterraine' pourraient également être appliqués à d'autres modèles régionaux développés précédemment comme, par exemple, celui réalisé, pour la bassin du Geer dans le cadre du projet AquaTerra.

## Annexe 1 : Modifications apportées au code de calcul SUFT3D

### Aspect quantitatif

En parallèle aux travaux de modélisation, comme depuis le début de ce projet de modélisation régionale, de nouvelles exigences en matière de résultats débouchent sur des améliorations de l'outil de calcul. Le SUFT3D, code éléments finis du service d'Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement de l'Université de Liège, a été développé pour répondre à certaines nouvelles exigences.

Les améliorations apportées au code de calcul SUFT3D portant sur des aspects quantitatifs sont les suivantes :

1. les débits échangés à travers des conditions limites internes de type I (Dirichlet) sont calculés et accessibles par l'utilisateur du code SUFT3D.
2. La représentation des débits échangés entre les eaux souterraines et le réseau d'eau de surface a été améliorée. Le débit transitant par ce type de condition frontière (type Fourier) peut désormais être limité quand la différence de hauteur d'eau entre la nappe et la rivière devient importante. Ceci permet d'éviter de calculer au sein des modèles des débits échangés trop importants et donc d'introduire dans le modèle des quantités d'eau importantes qui n'ont pas de réalité physique. En pratique quand la hauteur d'eau dans la nappe aquifère est proche de la hauteur d'eau dans la rivière, le débit échangé est calculé par :

$$Q = \alpha (H_{riv} - H_{nappe})$$

où  $Q$  est le débit échangé entre la nappe aquifère et la rivière,  $\alpha$  est le coefficient d'échange fonction des propriétés du lit de la rivière,  $H_{riv}$  est la hauteur d'eau dans la rivière et  $H_{nappe}$  est la hauteur d'eau dans la nappe aquifère.

Si la hauteur d'eau dans la nappe descend sous une valeur seuil de référence  $H_{min}$ , le débit échangé est alors limité et calculé par :

$$Q = \alpha (H_{riv} - H_{min})$$

3. des fichiers de sortie reprenant directement les différents débits d'eau calculés (maille par maille) à travers les frontières externes de type Fourier du domaine de calcul sont désormais créés en fin de simulation. Ces nouveaux fichiers permettent d'analyser ces valeurs de débits déjà calculés dans les versions précédentes du code mais non directement accessibles pour examen.

## Aspect qualitatif

Comme pour le volet quantitatifs, de nouvelles améliorations ont été apportées au code SUFT3D sur des aspects qualitatifs, portant sur :

- Le calcul des flux massiques du polluant au travers des conditions limites internes et externes du modèle:

$$Q_{massique} = C_{moy} \times Q_{eau}$$

où  $Q_{massique}$  est le débit massique transitant au travers de la face du maillage considérée,  $C_{moy}$  est la moyenne des concentrations calculées aux noeuds de la face considérée,  $Q_{eau}$  est le débit d'eau transitant au travers de la face considérée.

- Un nouveau schéma numérique, la méthode OSC (Orthogonal Subdomain Collocation (Putti and Cordes, 1998<sup>3</sup>)) a été implémentée dans le SUFT3D. Lorsque la méthode des éléments finis avec volume de contrôle telle qu'implémentée dans le SUFT3D est utilisée, la méthode OSC constitue une alternative à la méthode classique de Galerkin pour évaluer les termes de la matrice de conductance nécessaire aux calculs des flux échangés. L'avantage de cette méthode (Blessent, 2009<sup>4</sup>) est de produire une matrice de conductance présentant de meilleures caractéristiques pour la résolution des équations par les solveurs itératifs. Pour plus de détails sur cette technique, le lecteur est invité à se référer aux documents dont les références sont reprises en note de bas de page.

---

<sup>3</sup> Putti M. and Cordes C. (1998) *Finite-element approximation of the diffusion operator on tetrahedra* SIAM Journal on Scientific Computing 19 (4): 1154-1168.

<sup>4</sup> Blessent D. (2009) *Integration of 3D geological and numerical models based on tetrahedral meshes for hydrogeological simulations in fractured porous media* PhD thesis presented at the Université Laval 181 p.

## **Annexe 2 : Résultats des nouvelles calibrations apportées aux modèles représentant les masses d'eau souterraines RWM011 et RWM021**

Les modifications successives apportées au maillage du modèle hydrogéologique et au code de calcul ont eu un certain impact sur les résultats des simulations tant en écoulement qu'en transport. Une nouvelle phase de calibration a donc dû être réalisée. Le code d'inversion UCODE (2005), déjà utilisé précédemment dans le projet a été utilisé pour la calibration automatique des modèles développés sur base des nouveaux maillages RWM021 et RWM011.

Les données hydrogéologiques utilisées pour la calibration des modèles en régime d'écoulement permanent (sollicitations moyennes sur l'année 2006) sont identiques à celles utilisées lors de la calibration antérieure présentée dans le livrable D6.2. Il s'agit du même jeu de données : niveaux piézométriques, débits de base de certaines rivières, eaux drainées par certains captages, concentrations en nitrates. Nous renvoyons le lecteur aux détails donnés à ce sujet dans le livrable D6.2. Ce chapitre reprend néanmoins quelques résultats concernant les valeurs optimisées de recharge et de conductivités hydrauliques. Les résultats relatifs aux flux d'eau souterraine échangés entre sous bassins et les flux échangés entre eaux souterraines et eaux de surface sont quant à eux présentés dans des chapitres spécifiques.

### **Modèle de la masse d'eau souterraine RWM011**

Lors de la nouvelle calibration sur l'année 2006 du modèle régional représentant la masse d'eau RWM011, un accent important a été porté sur une représentation soignée des échanges entre les eaux souterraines et les eaux de surface.

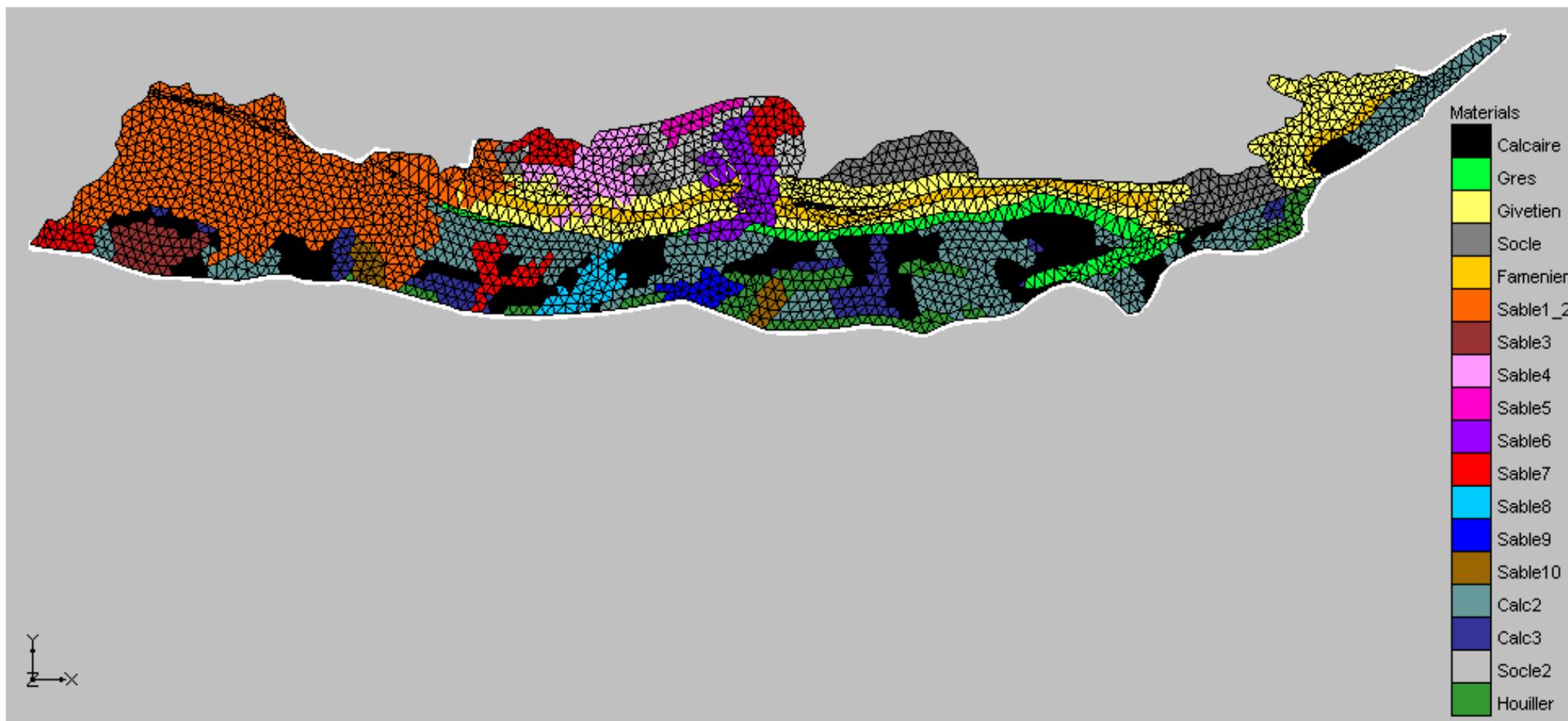


Figure 49: Distribution spatiale des matériaux représentant des zones de propriétés hydrogéologiques différentes obtenues après calibration du modèle représentant la masse d'eau souterraine RWM011. (VERSION PROVISoire)

Sur base de la calibration précédente, des modifications ont été apportées aux valeurs de conductivité hydraulique des matériaux (Tableau 6)

<u>Matériaux</u>	<u>K en m/s</u>				
Calcaire	$8.54 \times 10^{-4}$	Sable3-Sable4	$1.00 \times 10^{-4}$	Sable10	$5.00 \times 10^{-6}$
Grès	$2.90 \times 10^{-7}$	Sable5	$3.70 \times 10^{-6}$	Calc2	$1.77 \times 10^{-6}$
Givetien	$5.56 \times 10^{-5}$	Sable6	$2.87 \times 10^{-5}$	Calc3	$5.00 \times 10^{-4}$
Socle	$6.00 \times 10^{-7}$	Sable7	$5.00 \times 10^{-4}$	Socle2	$1.00 \times 10^{-6}$
Famennien	$1.00 \times 10^{-7}$	Sable8	$5.00 \times 10^{-5}$	Houiller	$4.12 \times 10^{-6}$
Sable1_2	$1.00 \times 10^{-5}$	Sable9	$5.00 \times 10^{-6}$		

**Tableau 6 : Valeurs des conductivités hydrauliques obtenues après ajustement de la calibration en régime permanent du modèle de la masse d'eau souterraine RWM011**

La recharge du modèle en régime permanent d'écoulement (année 2006) du modèle RWM011 est basée sur l'eau utile (286.82 mm/an) et est distribuée selon la géologie à l'aide des coefficients d'infiltration définis dans le Delivrable 3.12. Les valeurs de recharges sont donc les suivants:

Formation géologique	Recharge (mm/an)
Carbonifère	183.56
Sables	183.56
Socle	47.27
Givetien	206.51
Famenien	49.56
Grès	160.62

**Tableau 7. Valeurs de recharge obtenues après calibration en régime permanent du nouveau modèle de la masse d'eau souterraine RWM011**

La frontière sud du modèle représentant la masse d'eau RWM011 est perméable. Pour chaque élément frontière un flux entrant ou sortant est calculé sur base de la piézométrie interne et d'une piézométrie externe de référence (condition de type Fourier). En fonction du gradient hydrogéologique, un flux d'eau souterraine quitte ou rentre dans le modèle. Ces flux d'eau

sont ajustés en modifiant les valeurs du paramètre  $\alpha$  jusqu'à obtenir une reproduction correcte de la piézométrie à proximité de ces frontières:

$$Q = \alpha(H_{int} - H_{ext})$$

où  $Q$  est le débit échangé au travers de la portion de frontière considérée,  $\alpha$  est le coefficient d'échange,  $H_{int}$  est la hauteur d'eau calculée par le modèle au nœud situé sur la frontière et  $H_{ext}$  est la hauteur d'eau de référence imposée à l'extérieur du modèle.

Sur la Figure 50, les portions de frontière de la masse d'eau souterraine RWM011 sur lesquelles une condition aux frontières de type Fourier est prescrite sont représentées en rouge. Le Tableau 8 reprend, pour ces différentes portions de frontière, la valeur du coefficient  $\alpha$  utilisée dans le modèle.

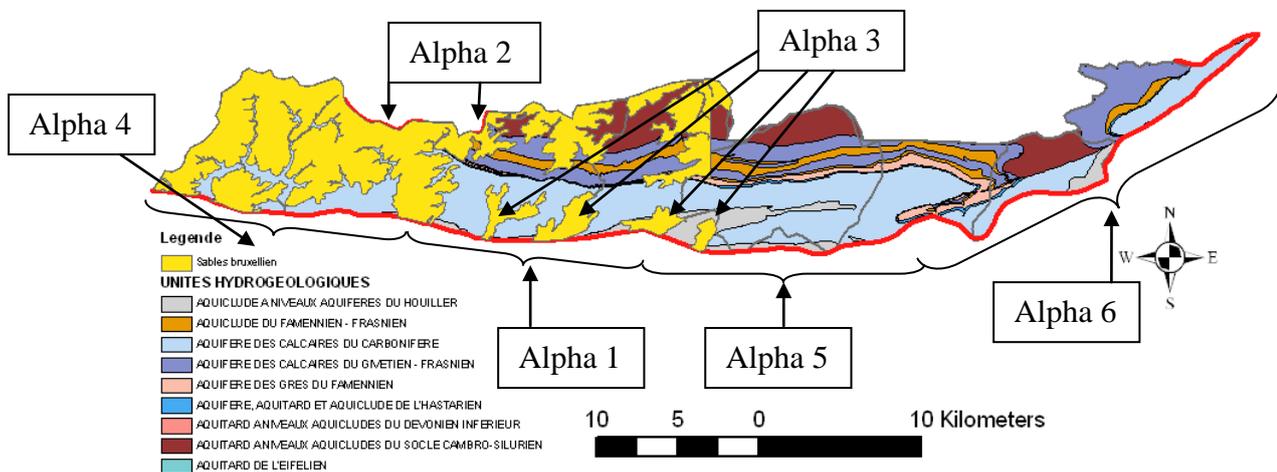


Figure 50: Frontière externe perméable du modèle (en rouge) et portion pour laquelle le paramètre alpha est utilisé

<b><u>Coefficients Fourier externes (frontière sud)</u></b>	<b><u>Position</u></b>	<b><u>Alpha en m/s</u></b>
Alpha1	Frontière sud du bassin du Orneau (vers la Sambre)	$1.00 \times 10^{-10}$
Alpha2	Frontière Nord vers le bassin de la Senne	$1.00 \times 10^{-9}$
Alpha3	Frontière sud : Sable 7, Sable 8 et Sable 9	$1.00 \times 10^{-9}$
Alpha4	Frontière Sud du bassin du Piéton (vers la Sambre)	$1.00 \times 10^{-6}$
Alpha5	Frontière Sud du bassin Houyoux (vers la Meuse)	$1.00 \times 10^{-6}$
Alpha6	Frontière Sud du bassin de la Mehaigne (vers la Meuse)	$1.00 \times 10^{-4}$

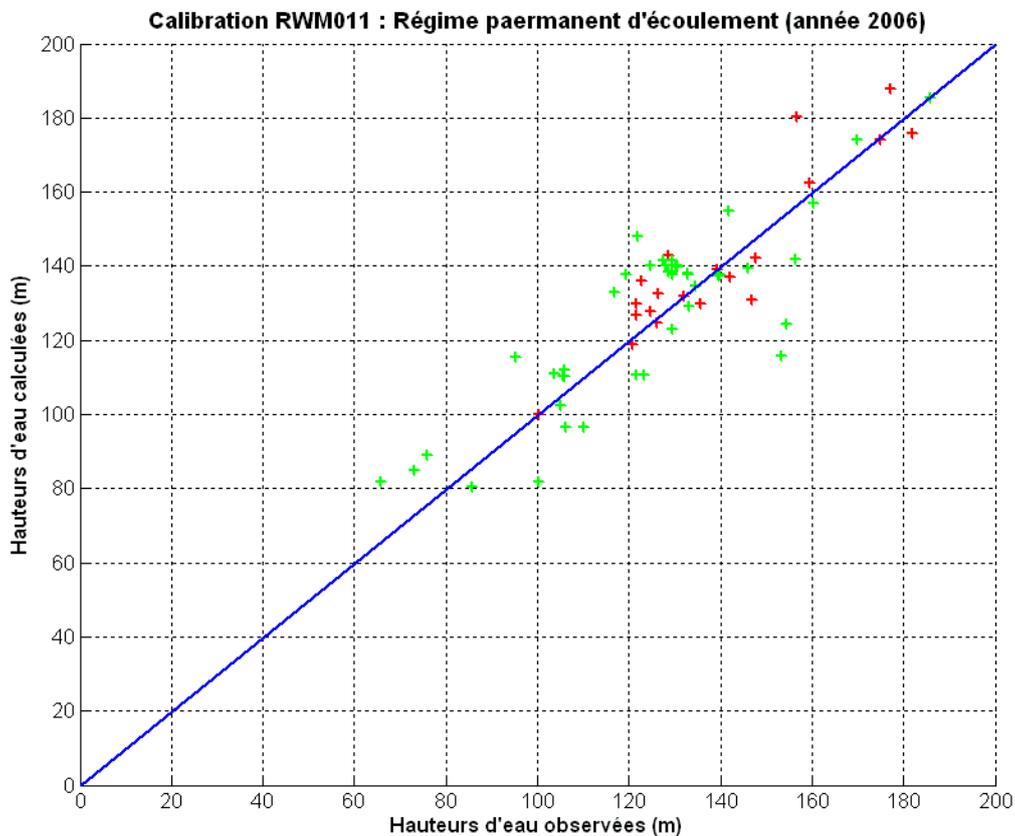
**Tableau 8 : Valeurs, obtenues après calibration, des coefficients d'échange  $\alpha$  des conditions frontières externes de type Fourier imposées sur les frontières du modèle**

Les galeries drainantes exploitées par VIVAQUA à Vedrin sont également représentées dans le modèle par des conditions frontières de type Fourier. Les profondeurs de ces galeries ainsi que les valeurs des coefficients d'échange obtenus après calibration sont présentés dans le Tableau 9. Notons que la galerie du Croisie n'a pas été représentée dans sa globalité puisqu'elle passe sous une rivière qui est représentée pas le même type de condition limite externe (conflit).

<b>Coefficients Fourier externes (Captage de Vedrin)</b>	<b>Galeries</b>	<b>Alpha en m/s</b>
Alpha7	Galerie du Pecquet (100m de profondeur)	$8.00 \times 10^{-7}$
Alpha8	Galerie Nord - Galerie Sud (100m de profondeur)	$1.00 \times 10^{-7}$
Alpha9	Areine (80m de profondeur)	$5.00 \times 10^{-8}$

**Tableau 9: Valeurs, obtenues après calibration, des coefficients d'échange  $\alpha$  des conditions frontières externes de Fourier représentant les galeries de captage de Vedrin dans le modèle**

Les hauteurs piézométriques observées et calculées, obtenues après calibration du modèle sont comparées à la Figure 51. Pour la plupart des piézomètres, les écarts entre valeurs mesurées et observées sont acceptables. Pour quatre d'entre eux néanmoins, l'erreur est supérieure à 20 mètres. Les croix vertes représentent les piézomètres pour lesquels la hauteur d'eau observée est considérée comme représentative à l'échelle régionale (puit ni exploité ni situé dans une carrière). Par rapport à la calibration obtenue et présentée dans le livrable D6.2 pour la piézométrie, on ne constate pas d'amélioration significative. Par contre, la représentation des débits de base est bien meilleure, et ce plus particulièrement pour le débit de base de la Ligne.



**Figure 51 : Comparaison des hauteurs d'eau observées et calculées, en régime permanent pour la masse d'eau souterraine RWM011, Les croix vertes représentent les piézomètres pour lesquels la hauteur d'eau observée est considérée comme représentative à l'échelle régionale (puit ni exploité ni situé dans une carrière)**

Le Tableau 10 reprend les valeurs de débit de base<sup>5</sup> estimées à l'aide du VCN3 et calculées au moyen du modèle calibré à hauteur des stations limnimétriques qui avaient été mises en place à Rhisnes sur le Houyoux et à Saint Martin sur la Ligne. Le tracé de l'Orneau s'étendant en

<sup>5</sup> Pour rappel, les débits de base sont extraits des données mesurées de débit à l'aide de l'outil VCN3. Pour plus d'information, le lecteur est invité à se référer au livrable 6.2.

effet au-delà des frontières du modèle, le débit de base estimé à cet emplacement ne constitue qu'un ordre de grandeur du résultat à obtenir. La station limnimétrique de l'Orneau a également été utilisée à titre informatif.

<b>Sondes AQUALIM</b>	<b>Débits de base estimés à partir duVCN3</b> (m <sup>3</sup> /s)	<b>Simulation : valeur calculée par le modèle SYNCLIN'EAU</b> (m <sup>3</sup> /s)
Houyoux- Rhisnes	0.039	0.035
Ligne – Saint Martin	0.119	0.121

**Tableau 10: Valeurs des débits de base simulés et calculés après calibration en régime permanent pour la masse d'eau souterraine RWM011**

Pour le captage par galerie drainante de Vedrin, le débit moyen capté est de 0.296m<sup>3</sup>/s. Le modèle prédit un débit de drainage de **0.303m<sup>3</sup>/s** en très bon accord avec le débit moyen capté.

La dernière version du code SUFT3D permet d'analyser face par face du maillage les transferts d'eau à travers des conditions limites externes de type Fourier. Pour la captage de Vedrin, cette fonctionnalité nouvelle a ainsi permis de vérifier que, conformément à ce qu'on observe en réalité, le modèle représente bien le fait que les eaux drainées proviennent essentiellement des galeries Nord et de Pecquet alors que la somme des débits drainés au niveau de la galerie la plus au sud (Areine) est quasi nulle.

### Modèle de la masse d'eau souterraine RWM021

La calibration du modèle représentant la masse d'eau RWM021 a également été légèrement améliorée. Les résultats obtenus pour le bassin du Hoyoux et du Néblon ont été particulièrement tenus à l'oeil car ils font l'objet d'investigations plus précises sur des aspects quantitatifs et qualitatifs.

Les valeurs de conductivité hydraulique attribuées aux différents matériaux utilisés dans le modèle ont donc été modifiées lors de cette nouvelle phase de calibration (Figure 52 et Tableau 11).

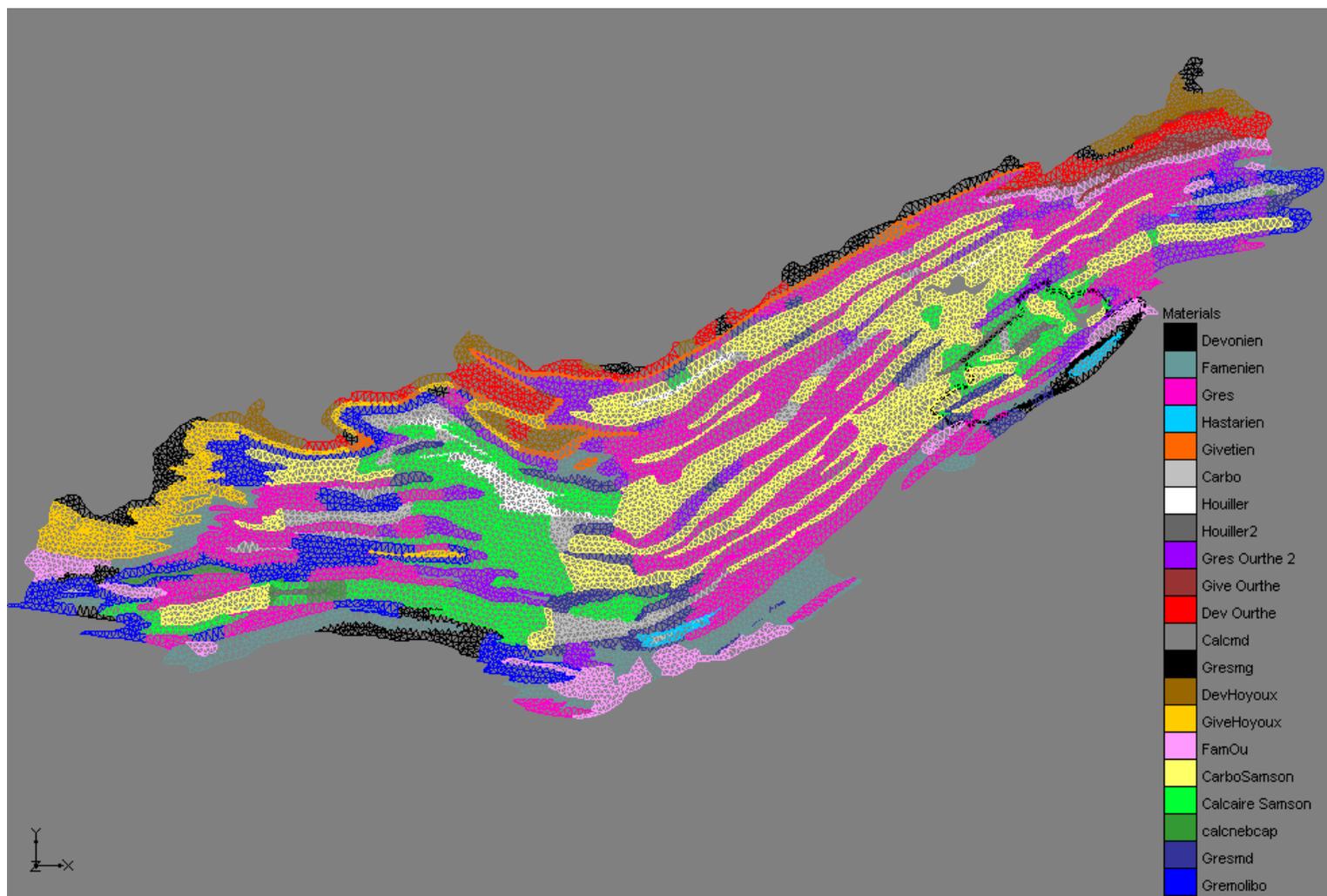


Figure 52 : Distribution spatiale des matériaux représentant des zones de propriétés hydrogéologiques différentes obtenue après calibration du modèle représentant la masse d'eau souterraine RWM021. (VERSION PROVISoire)

<u>Matériaux</u>	<u>K en m/s</u>				
Devonien	$6.80 \times 10^{-7}$	GrèsOurthe2	$2.44 \times 10^{-7}$	CarboSamson	$1.01 \times 10^{-4}$
Famenien	$9.85 \times 10^{-6}$	Giveourthe	$2.80 \times 10^{-4}$	CalcaireNéblon	$5.00 \times 10^{-6}$
Grès	$9.38 \times 10^{-7}$	DevOurthe	$1.46 \times 10^{-7}$	Calcnebcap	$1.46 \times 10^{-4}$
Hastarien	$5.00 \times 10^{-6}$	Calcmd	$5.00 \times 10^{-4}$	Gresmd	$1.29 \times 10^{-7}$
Givetien	$8.23 \times 10^{-5}$	Gresmg	$2.13 \times 10^{-6}$	Gremolibo	$1.56 \times 10^{-6}$
Carbonifère	$4.00 \times 10^{-5}$	DévHoyoux	$4.00 \times 10^{-7}$		
Houiller	$4.00 \times 10^{-7}$	GiveHoyoux	$1.04 \times 10^{-5}$		
Houiller2	$1.00 \times 10^{-7}$	FamOu	$1.71 \times 10^{-7}$		

**Tableau 11: Valeurs des conductivités hydrauliques obtenues après calibration en régime permanent du nouveau modèle de la masse d'eau souterraine RWM021**

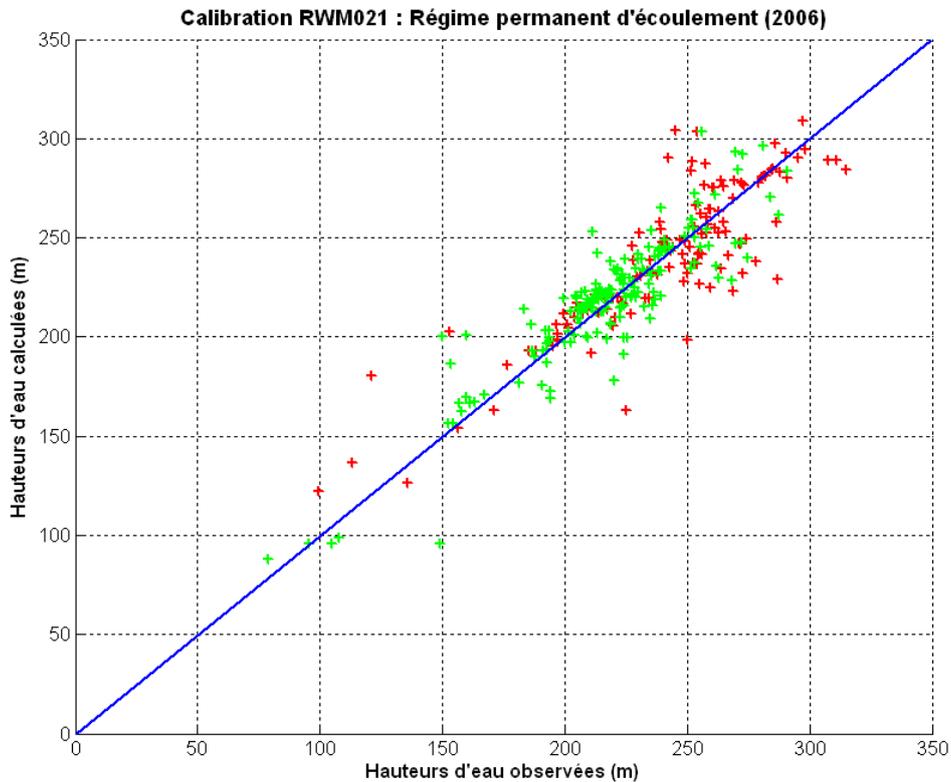
La recharge du modèle en régime permanent d'écoulement (année 2006) du modèle RWM021 est basée sur l'eau utile (421.71 mm/an) et est distribuée, selon la géologie de la façon suivante:

Formation géologique	Recharge (mm/an)
Devonien	57.91
Famenien	60.73
Grès	196.80
Hastarien	224.91
Givetien	253.03
Carbonifère	224.91
Houiller	60.73

**Tableau 12 : Valeur de la recharge obtenue après calibration en régime permanent pour le modèle de la masse d'eau RWM021**

A la Figure 53, les hauteurs piézométriques observées et calculées, obtenues après calibration en régime permanent sont comparées. Les croix vertes représentent les piézomètres dits représentatifs à l'échelle régionale (voir D6.2). Ces piézomètres, qui ne sont ni exploités ni situés dans des carrières en exploitation ont plus de chance de constituer une donnée intéressante de la piézométrie de la zone où ils se trouvent. Le recours aux outils d'optimisation, utilisé pour la calibration du modèle représentant la masse d'eau souterraine RWM021, a permis de mieux tenir compte de cette disparité dans le jeu de données en

attribuant, dans le processus de calibration, un "poids" plus important aux mesures piézométriques les plus représentatives à l'échelle régionale.



**Figure 53: Comparaison des hauteurs d'eau observées et calculées, en régime permanent pour la masse d'eau souterraine RWM021**

La qualité de la calibration en matière de flux en régime permanent relatif à la masse d'eau souterraine RWM021 est illustrée dans le Tableau 8 et, graphiquement, par la Figure 9. On peut tout particulièrement noter la très bonne estimation des débits de base pour les stations limnimétriques sur le Néblon (N2\_Ocquier, N3\_Moulin), le Hoyoux (H3\_Modave, H4\_Limet, H5\_Roiseau+ H6Triffoy), le Bocq (Yvoir) et la Molignée (Warnant). La calibration présentée est plus que satisfaisante car elle décrit très bien les débits de base des bassins hydrologiques étudiés.

Station limnimétrique	Valeur estimée (VCN3) (m <sup>3</sup> /s)	Valeur calculée (m <sup>3</sup> /s)
H3_Modave	0,468	0,428
H4_Limet	0,714	0,680
H5_Roiseu+H6_Triffoy	0,925	0,855
N1_Jenneret	0,008	-0,160
N2_Ocquier	0,067	0,058
N3_Moulin	0,203	0,162
Yvoir – Bocq	1,011	1,008
Warnant - Mollignée	0,665	0,6262
Captage de Modave	0,668	0,6519
Captage de Néblon-le-moulin	0,271	0,264

Tableau 13 : Valeurs des différents flux observés et calculés pour les bassins du Hoyoux et du Néblon, du Bocq et de la Mollignée

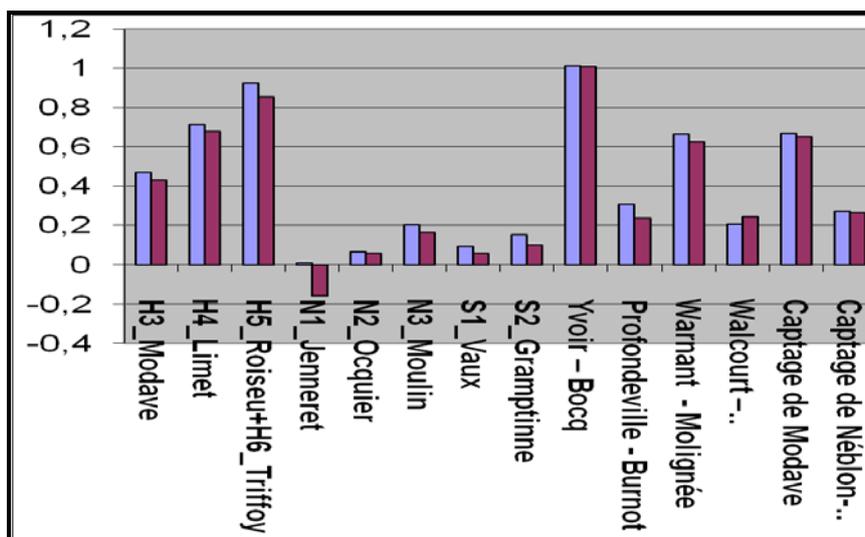


Figure 54 : Comparaison des débits de base observés (bleu) et calculés (mauve) en régime permanent pour la masse d'eau souterraine RWM021

### Annexe 3: Modifications apportées au maillage des masses d'eau RWM021 et RWM011.

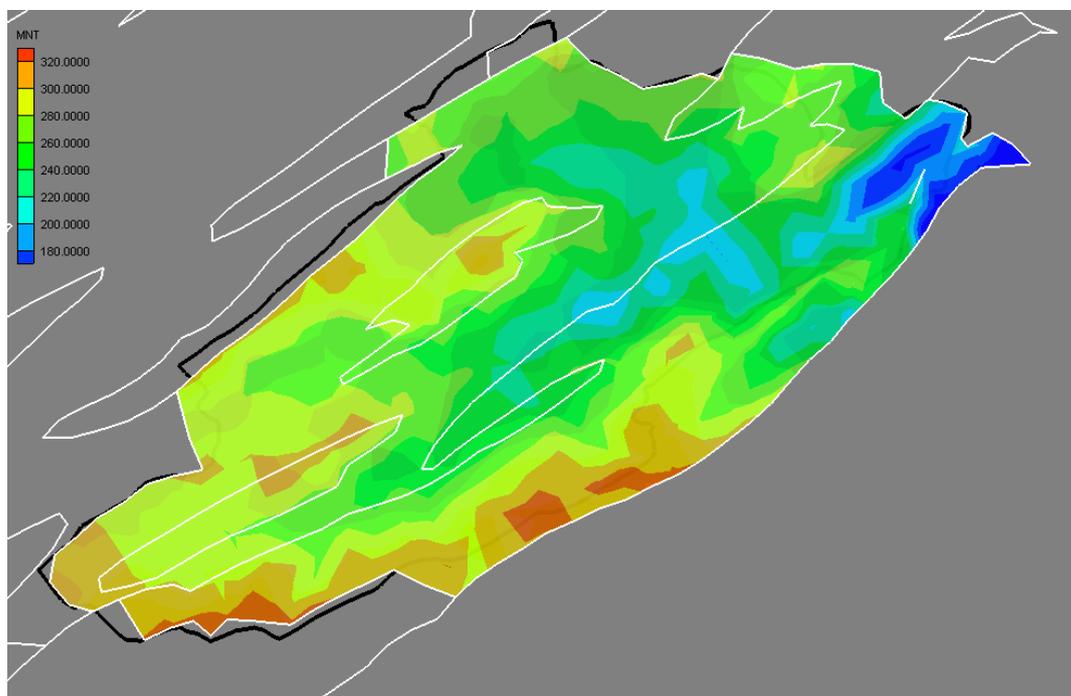


Figure 55 : Bassin du Néblon (4 sous-domaines de calcul) (VERSION PROVISoire)

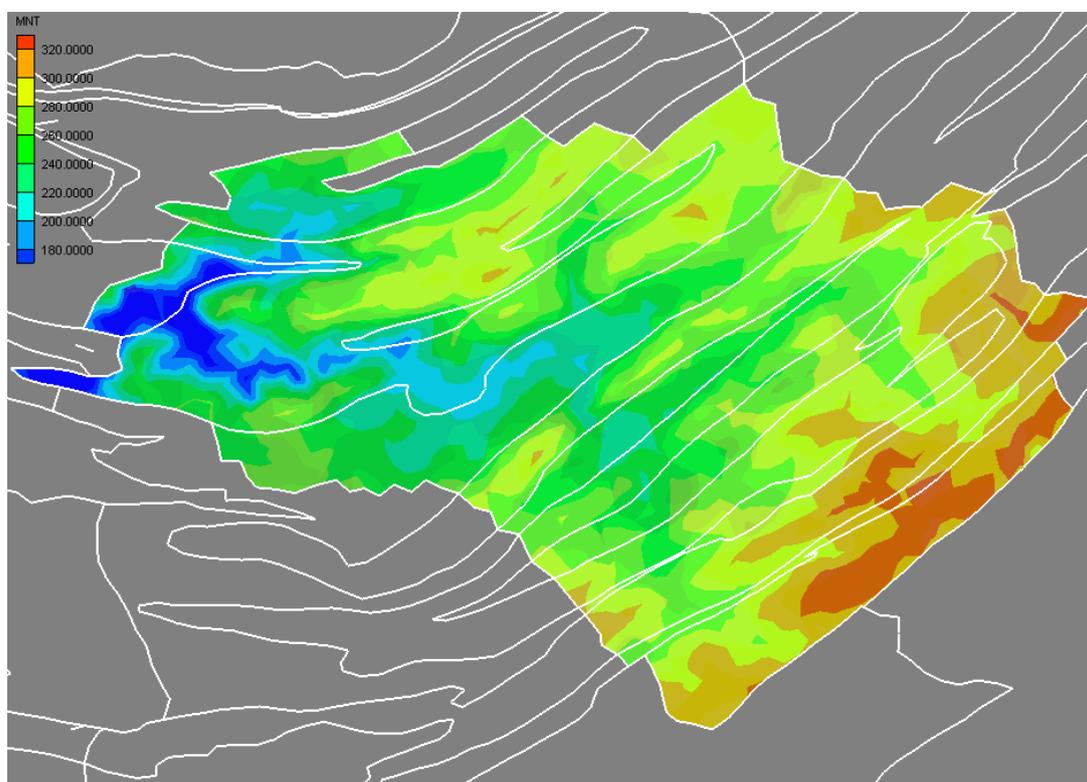


Figure 56 : Bassin du Bocq (15 sous-domaines de calcul) (VERSION PROVISoire)

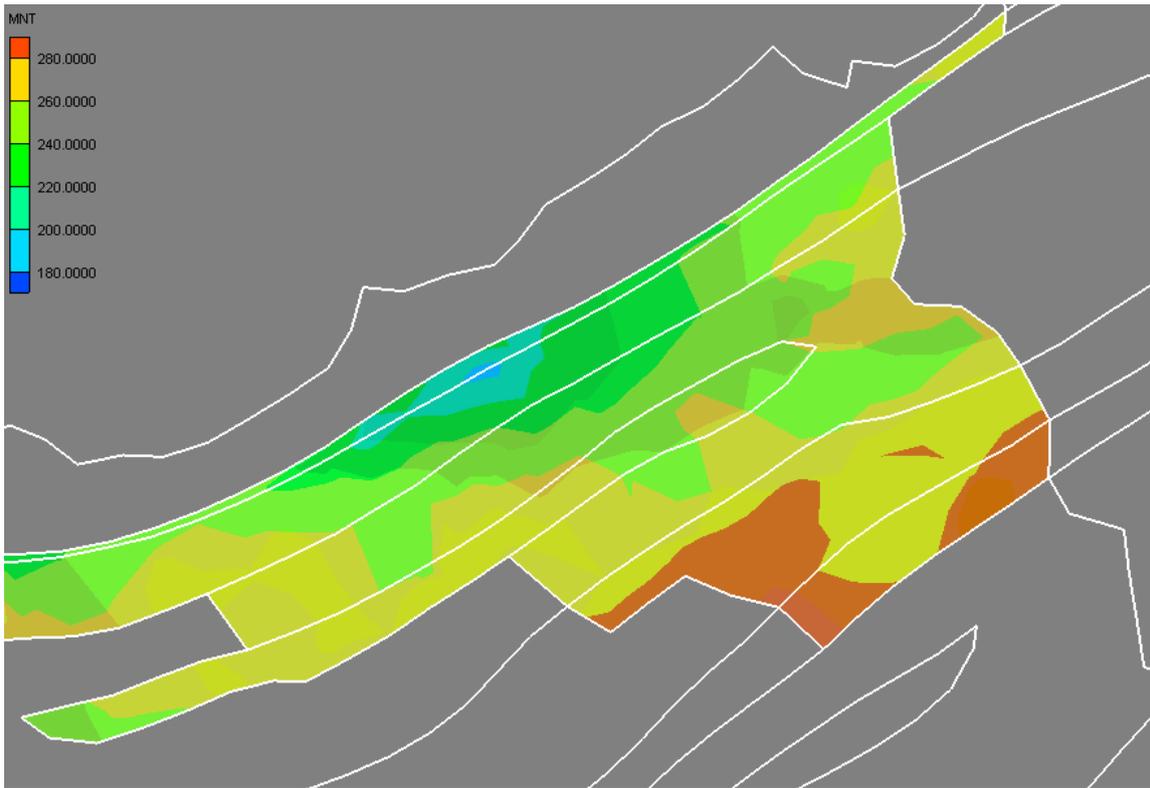


Figure 57 : Bassin du Samson amont (3 domaines de calcul supplémentaires) (VERSION PROVISoire)

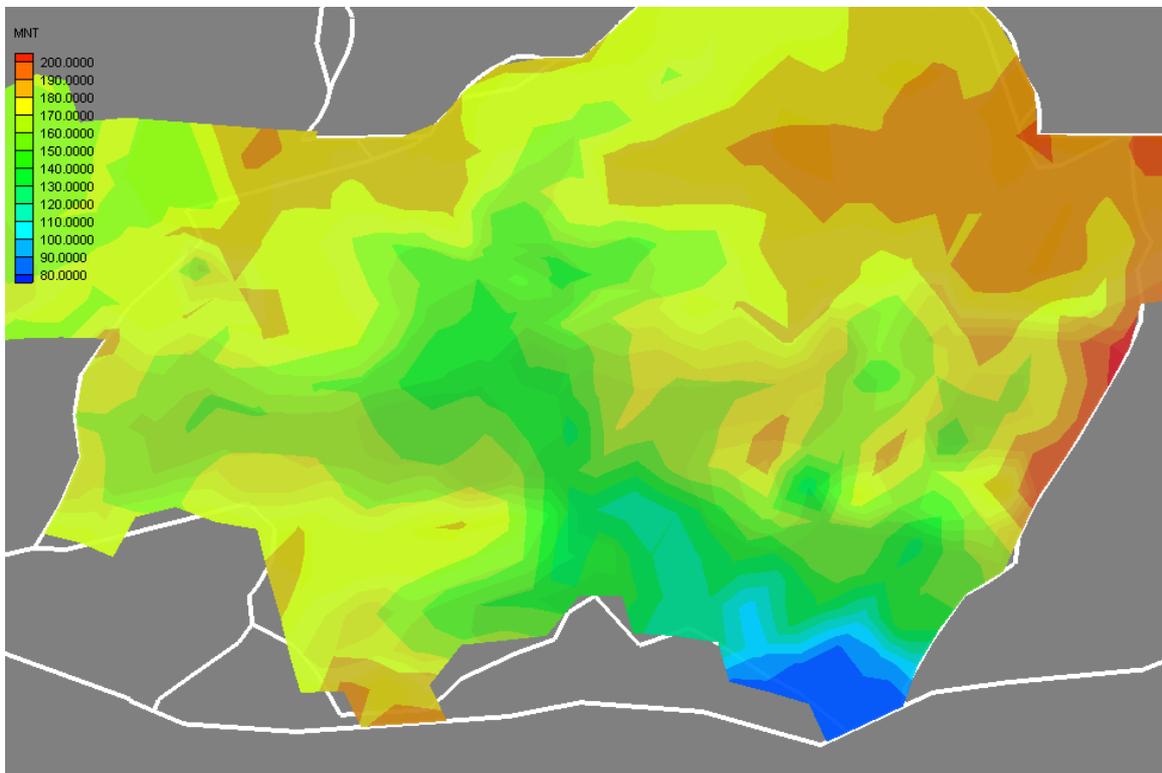


Figure 58 : Bassin du Houyoux aval (3 domaines de calcul supplémentaires) (VERSION PROVISoire)

## Annexe 4 : Bilan hydrogéologique du bassin du Bocq

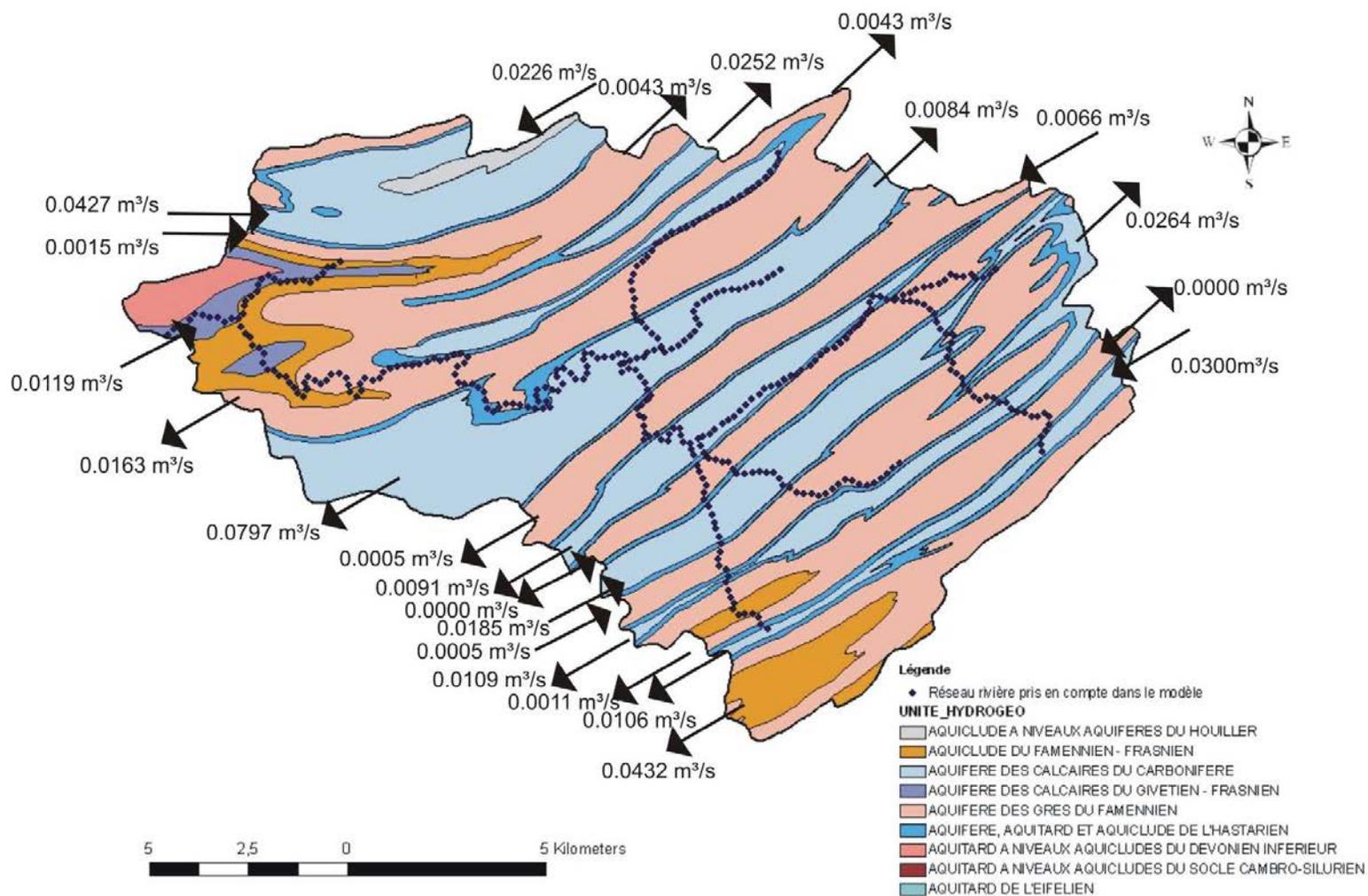


Figure 59 : Bilan hydrogéologique du bassin du Bocq

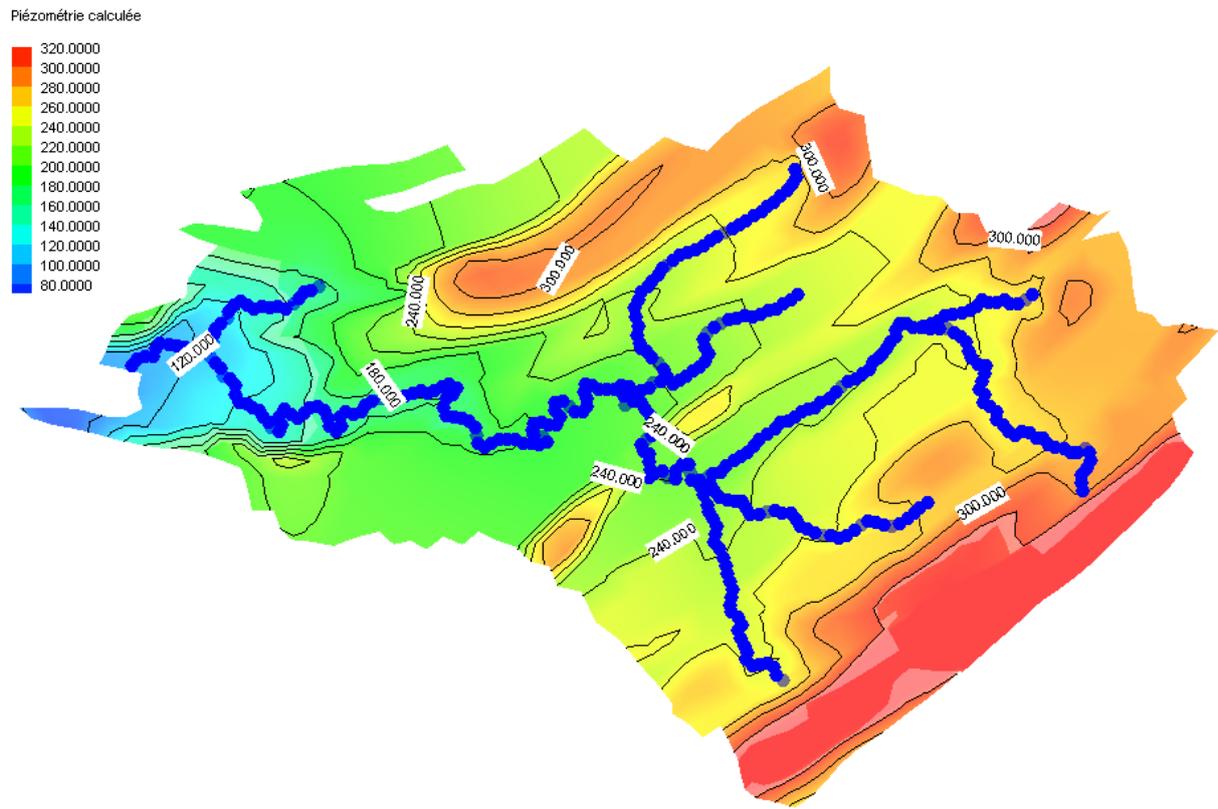


Figure 60 : Piézométrie calculée dans le bassin du Bocq (VERSION PROVISOIRE)