Geo³-Hydrogéologie - Département ArGEnCo
(Architecture, Géologie, Environnement & Constructions)
Université de Liège

Départements de Biologie et de Géologie
Université de Namur

Axe Echanges Eau-Sol-Plante, Gembloux Agro bio-tech
Université de Liège

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

D1.8 Rapport Final

Coordinateur du projet :

Dr. Serge Brouyère (HGE-ULg)

Partenaires scientifiques :

ULg-HGE : Dr. Philippe Orban, Pierre Briers, Dr. Serge Brouyère

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

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

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

Rédaction : Serge Brouyère, Pierre Briers, Jean-Pierre Descy, Flore Schmit, Aurore Degré, Philippe Orban

Table des matières

Résumé en français 5
English abstract 5
Remerciements 6
1 Introduction et objectifs 8
1.1 Contexte et objectifs de la convention 8
1.2 Description des équipes partenaires du projet 9
2 Mise en place du projet 11
2.1 Sélection des bassins versants tests 11
2.2 Inventaires des données disponibles et mise en place du réseau de suivi 12
2.2.1 Collecte et mise à jour des données 13
2.2.2 Caractérisation géophysique des zones tests et implantation des piézomètres et micro-piézomètres 13
2.2.3 Forage des piézomètres et micro-piézomètres 15
2.2.4 Mise en place des réseaux de monitoring ESO-ESU-BIO 16
3 Résumé des investigations menées dans le cadre de l'étude 18
3.1 Investigations relatives au fonctionnement biologique des cours d'eau 18
3.2 Investigations sur le site expérimental de Hodoumont 19
3.3 Bilans hydrologiques 21
3.4 Campagne hydrochimique régionale 23
3.5 Investigations relatives aux échanges nappe – rivière 26
3.6 Campagne APL avec Nitrawal 28
4 Principaux travaux d'interprétations et synthèse des résultats obtenus 30
4.1 Développement et application d'indicateurs et d'une typologie des interactions ESO-ESU 30
4.2 Modélisation EPICgrid 32
4.3 Modélisation hydrogéologique à l'échelle du bassin du Hoyoux 33
5 Conclusions et perspectives 35
5.1 Principaux apports du projet 35
5.1.1 Apports en matière de compréhension et quantification des interactions ESO-ESU en tant que telles 36
5.1.2 Apports en matière de compréhension des mécanismes de pollution et de transfert des polluants dans les bassins versants 36
5.1.3 Apports en matière de compréhension des mécanismes et d'outils d'évaluation de la qualité biologique des cours d'eau 37
5.1.4 Apports en matière d'outils quantitatifs (indicateurs, modèles…) 38
5.1.5 Contributions du projet à des travaux externes et des communications 38

5.2 Mise en place d'un bassin pilote sur le Triffoy (= D4.5) 41
5.3 Perspectives pour la transposition des résultats sur d'autres bassins 43
5.3.1 Perspectives « Hydrogéologiques » suite à ESO-ESU 43
5.3.2 Perspectives « Bio » suite à ESO-ESU 44
5.3.3 Principales activités proposées pour cette « suite ESO-ESU » 44
Bibliographie 46

Liste des figures

Figure 2-1. Localisation de la masse d'eau RWM021 et des sous-bassins et cours d'eau concernés par l'étude. 12
Figure 2-2. Localisation des sites ayant fait l'objet d'investigations géophysiques pour l'implantation des forages des piézomètres réalisés dans le cadre de la convention. 14
Figure 2-3. Localisation des principaux points de mesures du réseau de suivi ESO-ESU-BIO. 17
Figure 3-1. Vue d'ensemble des piézomètres forés sur le site expérimental d'Hodoumont. 20
Figure 3-2. Carte hydrogéologique de la zone d'étude avec indication des écoulements souterrains et avec indication de la typologie des interactions ESO-ESU 23
Figure 3-3. Localisation des ouvrages échantillonnés lors de la campagne d'automne 2014 ; l'échantillonnage a été effectué soit par l'ISSeP (symbole rond) dans le cadre du réseau 'Survey Nitrate' rouge) ou de surveillance (bleu) soit par l'ULg-HGE (symbole carré) dans le cadre spécifique du projet. 25
Figure 3-4. Modèle conceptuel des transferts d'eau et logigramme fonctionnel d'un bassin versant dans les cas respectifs d'un cours d'eau drainant ou perdant (REM = mix des figures 46 et 47 du D3.5). 27
Figure 4-1. Définition d'une typologie des bassins versants basée sur une classification hiérarchique des indicateurs d'interactions ESO-ESU 31
Figure 4-2. : Modèle EPICgrid – Simulation de scénario de modification des pratiques agricoles (conditions d'implantation d'une CIPAN) 33
Figure 4-3. Comparaison des débits de base mesurés aux stations limnimétriques et dans les galeries drainantes du bassin du Hoyoux avec les valeurs calculées par le modèle. 34
Figure 5-1. Localisation des points de mesures du réseau de suivi proposé pour le monitoring à moyen et long terme dans le cadre de la mise en place d'un observatoire de l'environnement sur le bassin du Triffoy 42

Liste des tableaux

Tableau 2-1. Informations générales relatives aux piézomètres et micro-piézomètres qui ont été forés dans le cadre de l'étude. 16
Tableau 3-1. Résultats des bilans annuels calculés pour divers bassins versants étudiés dans le cadre de l'étude. 22
Tableau 3-2. Conformité des APL réalisés par Nitrawal dans les bassins versants du Triffoy et du Hoyoux amont à l'automne 2013 29
Tableau 4-1. Synthèse des indicateurs quantitatifs et de pression proposés dans le cadre du projet ESO-ESU. 31
Tableau 5-1. Liste des rapports techniques (délivrables) qui ont été produits dans le cadre du projet et lien vers les versions électroniques (format pdf) de ces rapports. 36
Tableau 5-2. Principaux travaux d'étudiants réalisés en liaison avec le projet. 41

Résumé en français

Les mécanismes d'interactions entre les nappes d'eau souterraine et les cours d'eau dont l'état et l'usage anthropique qui en sont fait peuvent être préjudiciables d'un point de vue quantitatif et qualitatif pour l'un ou l'autre de ces deux compartiments du cycle de l'eau. Par ailleurs, la contamination des masses d'eau souterraine par le nitrate reste d'actualité. Partant de ces constats, une étude financée par le Service Public de Wallonie a été menée sur une période de 39 mois visant à investiguer (1) le sens, l'importance et la dynamique des échange d'eau, à l'échelle de la section de rivière, entre la nappe d'eau souterraine et la rivière; (2) l'impact de ces interactions sur les débits d'étiage des cours d'eau en fonction des prélèvements dans la nappe et sur l'état écologique du cours d'eau; (3) les mécanismes et le temps de transfert et d'abattement des polluants (nitrate) entre les eaux souterraines et de surface à l'échelle des bassins versants. Les conséquences de ces mécanismes sur l'évolution à moyen et à long termes de la qualité des eaux souterraines et de surface étaient à déterminer. Pour cela, le projet a reposé sur la mise en œuvre d'une série d'investigations de terrain essentiellement centrées sur les interfaces entre les compartiments 'eau de surface' et 'eau souterraine' (sol et zone non saturée et interface nappe-rivière), tout en acquérant des informations complémentaires relatives aux nappes d'eau souterraine. Les investigations, menées dans les bassins versants du Hoyoux amont et du Triffoy dans le Condroz, ont visé à apporter des réponses spécifiques à des problèmes de quantité ou de qualité de l'eau associés aux interactions ESO-ESU dans les bassins sélectionnés et des réponses génériques sous forme de nouvelles connaissances relatives aux mécanismes de recharge et d'échanges nappe - rivière, d'évolution des concentrations en nitrate dans les bassins, des données et mesures pour la paramétrisation de modèles, et des outils de gestion des ressources en eau sous forme d'indicateurs quantitatifs et qualitatifs pour les eaux de surface en interaction avec les eaux souterraines.

English abstract

Mechanisms of interactions between groundwater bodies and rivers whose status and anthropogenic use can be detrimental from a quantitative and qualitative point of view to one or the other of these two compartments of the water cycle. In addition, contamination of groundwater by nitrate remains relevant. Based on these observations, a study financed by the Public Service of Wallonia was carried out over a period of 39 months to investigate (1) the direction, importance and dynamics of water exchange between groundwater and rivers at the scale of a river section; (2) the impact of these interactions on river baseflows and the river ecological status as a function of groundwater withdrawal and recharge at the catchment scale; (3) mechanisms and timing of transfer and abatement of pollutants (nitrate) between groundwater and surface waters at the watershed scale. The consequences of these mechanisms on the medium- and long-term evolution of groundwater and surface water quality were to be determined. To achieve this, the project relied on the implementation of a series of field investigations essentially focused on the interfaces between surface water and groundwater compartments (soil and unsaturated zone and water-table interface), while acquiring additional information on groundwater. The investigations carried out in the watersheds of the upstream Hoyoux and Triffoy watershed in the Condroz region aimed to provide

specific responses to water quantity and quality issued associated with groundwater – surface water interactions in the selected basins and generic responses in the form of new knowledge concerning the mechanisms of recharge and groundwater - river exchanges, concerning the evolution of nitrate concentrations in watersheds, data and measurements for the parameterization of models, and water resources management tools in the form of quantitative and qualitative indicators for groundwater - surface water interactions.

Remerciements

Les équipes de projet souhaiteraient tout particulièrement remercier le Service Public de Wallonie pour la confiance accordée et les moyens mis à disposition en vue de mener cette étude ambitieuse dans les meilleures conditions, en particulier le Département de l'Eau et Environnement et, en son sein, la Direction des Eaux Souterraines (DESO) et la Direction des Eaux de Surface (DESU). Nous avons particulièrement pu compter sur le suivi, les conseils et l'appui de Mme Cristina Popescu, M. Roland Masset à la DESO et de M. Nicolas Fermin et Pierre-Nicolas Libert à la DESU. Nous remercions également tout particulièrement M. Francis Delloye pour son rôle de courroie de transmission avec le GT Groundwater de la Commission Européenne qui a permis de rendre visible nos premiers résultats à l'échelon international. Les membres du Comité d'Accompagnement de la convention sont également chaleureusement remerciés pour leurs participations actives aux diverses réunions qui se sont déroulées durant le projet.

Nous voudrions aussi tout particulièrement remercier l'équipe locale du Contrat Rivière Hoyoux, en particulier Sylvie Messiaen mais aussi de nombreux bénévoles qui nous ont en particulier offert une aide très précieuse, notamment pour la mise en place initiale et le retrait ultérieur de la fibre optique qui a été déployée sur près de deux kilomètres dans le lit du Triffoy à Marchin. Une pensée toute particulière pour M. J.Borghoms. Nos remerciements également à G.Michel et L.Remacle de la CWEPSS pour les nombreux échanges et l'opportunité de valoriser les travaux de la convention dans le cadre de l'Atlas du Karst tout fraichement édité.

Nous ne pourrons également jamais assez remercier M. G.Kervyn qui nous a très chaleureusement accueilli et permis de mettre en place le site expérimental sur les propriétés du Château d'Hodoumont, s'intéressant plus qu'à son tour à nos travaux et au bienêtre de P.Briers durant ses longues soirées d'hiver à suivre les essais dans sa roulotte de chantier (lui offrant même le couvert à l'occasion !) et, surtout, nous offrant par cet accueil des conditions de sécurisation du matériel que nous n'aurions sans doute jamais trouvé ailleurs dans le bassin. Tout cela en gardant tout son flegme et sa bonne humeur, même lorsque, à l'occasion de la livraison de la roulotte de chantier, nous avons défoncé l'allée d'accès en face du château…

L'autre site expérimental, celui des micro-piézomètres, n'aurait jamais pu être installé sans le soutien de M. P.-E. d'Ans. Il nous a permis un accès permanent aux prairies, nous permettant de travailler dans les meilleures conditions.

Nous souhaitons également remercier un ensemble d'acteurs essentiels qui, par diverses manières, nous ont apporter aide et support, en particulier les compagnies d'eau, la CILE, Vivaqua, la CIESAC et l'AIEC pour les données fournies et les facilités offertes sur le terrain, Nitrawal pour les données de terrain concernant les pratiques agricoles dans les bassins étudiés ainsi que les analyses APL et l'ISSeP qui a contribué à la campagne hydrochimique régionale en prenant en charge le remplissage d'échantillons nécessaires pour les besoins de la convention à l'occasion de ses propres campagnes de prélèvement pour compte du SPW et en fournissant les résultats de leurs analyses sur les points intéressants du projet. Merci à K.Tirez, W.Brusten et M. Wevers pour les analyses relatives au bore (concentration et isotopie $\delta^{11}B$) réalisées par le 'Separation and Conversion Technology Unit' au VITO à Mol et à K.Knoeller pour les analyses du $\delta^{15}N$ et $\delta^{18}O$ du nitrate réalisées par le 'Department of Catchment Hydrology' du 'Helmholtz-Centre for Environmental Research UFZ' de Leipzig en Allemagne. L'analyse des données biologiques et écologiques des deux cours d'eau étudiés doit beaucoup à l'expertise d'Anne-Marie Lançon, du bureau d'études Bi-Eau, Angers, et de Liévin Castelain et Adrien Latli, URBE, UNamur: tous deux ont grandement contribué à l'élaboration du délivrable sur l'impact écologique des interactions ESO-ESU. Nicolas Rachart, alors étudiant à l'Hepn, Ciney, a contribué à l'acquisition de mesures en continu de paramètres physico-chimiques. Nous sommes également reconnaissants au personnel de Vivaqua, Modave, et aux riverains du Hoyoux à Petit-Avin pour leur contribution à la prise d'échantillons d'eau pour les déterminations de concentration en nitrate.

Que les nombreux bénévoles, collègues, chercheurs et étudiants qui ont apportés leurs petites aides et grandes aides, à l'occasion ou de manière répétée, soient également remerciés : S. Abras, E. Crescenzi, F. Dollé, N. Fernandez de Vera, S. Gaillez, J. Gesels, V. Hakoun, T. Hermans, P. Jamin, A. Jurado, B. Louis, F. Nguyen, C. Nogues, J. Otten, E. Pujades, T. Robert, I. Ruthy, A. Smoos, C. Sprumont, C. Thomas, S. Wildemeersch, T. Willems.

Malheureusement, cette liste de remerciements n'est certainement pas exhaustive et, d'ores et déjà, nous nous excusons auprès de celles et ceux que nous avons omis de citer. En les remerciant chaleureusement malgré cet oubli !

1 Introduction et objectifs

1.1 Contexte et objectifs de la convention

Les travaux réalisés dans le cadre du projet Synclin'EAU (« Caractérisation hydrogéologique et support à la mise en œuvre de la Directive Européenne 2000/60 sur les masses d'eau souterraine en Région Wallonne ») avaient permis de mettre en évidence et de préciser dans une certaine mesure l'existence d'un risque, pour certaines masses d'eau souterraine, et particulièrement pour la masse d'eau souterraine RWM021 (Calcaires et grès du Condroz), de ne pas répondre aux objectifs environnementaux requis par la Directive Cadre Eau. Les mécanismes d'interactions entre les nappes d'eau souterraine et les cours d'eau dont l'état actuel et l'usage anthropique qui en est fait, peuvent en effet être préjudiciables, tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif, à l'un et/ou l'autre de ces deux compartiments du cycle de l'eau.

En réalité, il n'existait jusque-là, aucune étude exhaustive et intégrée en Wallonie abordant, à l'échelle d'un bassin hydrographique élémentaire (constitué d'au moins une et éventuellement de plusieurs masses d'eau de surface) et de manière concertée et cohérente, les aspects tant géologiques et hydrogéologiques qu'hydromorphologiques et écologiques des interactions entre les nappes d'eau souterraine (ESO) et les eaux de surface (ESU). Une telle approche est pourtant absolument nécessaire pour certaines masses d'eau souterraine afin (1) d'aboutir, comme exigé par la Directive Cadre, à une estimation de la ressource en eau souterraine disponible, tenant compte des besoins d'un bon état écologique des eaux de surface, (2) de statuer sur leur caractère à risque et sur leur bon ou mauvais état quantitatif et qualitatif en relation avec les interactions eaux de surface – eau souterraine, (3) de statuer sur l'impact des eaux souterraines sur l'état quantitatif et qualitatif des eaux de surface associées. Ce constat était en réalité identique pour une grande majorité des masses d'eau souterraine et de surface de la région, ceci reflétant le manque de connaissances sur le fonctionnement de ces interactions.

Par ailleurs, la contamination des masses d'eau souterraine par le nitrate reste d'actualité. Conformément à la directive 91/676/CEE, la Région doit réviser la désignation des zones vulnérables et le programme d'action tous les 4 ans. La proposition de désignation de l'entièreté de la masse d'eau souterraine RWM021 en zone vulnérable a été faite à l'Union européenne. Cela fait partie du projet de révision des zones vulnérables en Wallonie, qui a été soumis à l'enquête publique, conformément au Livre Ier du Code de l'Environnement. A ce niveau, le problème est essentiellement lié au fait que les données, connaissances et outils actuels ne permettaient pas de procéder à des analyses de tendances robustes, basées sur des approches mécanistiques fiables, des concentrations en nitrate, tant dans les eaux souterraines que dans les eaux de surface. Ces faiblesses trouvaient principalement leur origine dans le peu de connaissances expérimentales sur les temps de transfert des polluants dans la zone non saturée, les temps de résidence effectifs des polluants dans les nappes d'eau souterraine et le potentiel d'abattement des nitrates dans les berges, à l'interface nappe-rivière.

En réalité, les deux domaines ciblés ci-dessus (interactions ESO-ESU et analyses de tendances) sont intimement liés. Une analyse du « turnover » de l'eau et des polluants est requise, depuis leurs sources d'émission (ponctuelle ou diffuse), en passant par la zone non saturée et l'eau souterraine, jusqu'à leur réapparition dans les cours d'eau en transitant par leurs berges. Elle doit apporter des données et connaissances essentielles pour le développement d'outils de quantification et de gestion des masses d'eau souterraine et contribuer à expliquer la dynamique des concentrations en nitrate dans les cours d'eau, au cours d'un cycle hydrologique ou en fonction des conditions météorologiques, et à distinguer les contributions respectives des différentes sources de pollution (pollution agricole ou domestique, ponctuelle ou diffuse…) à l'origine des problèmes étudiés.

Partant de ces constats, la convention ESO-ESU a tenté d'investiguer les points spécifiques suivants :

- Analyser, à l'échelle de la section de rivière, le sens, l'importance et la dynamique des échange d'eau entre la nappe d'eau souterraine et la rivière ;
- Déterminer, à l'échelle du bassin versant et/ou de la zone d'alimentation d'un captage, l'impact des interactions sur les débits à l'étiage et le fonctionnement écologique des cours d'eau et en fonction des prélèvements dans la nappe et de la recharge de celle-ci ;
- Établir et valider, à l'échelle du bassin versant, les mécanismes et le temps de transfert et d'abattement des polluants (nitrate) entre les eaux souterraines et de surface (sol – nappe et nappe –rivière).

Les conséquences de ces mécanismes sur l'évolution à moyen et à long termes de la qualité des eaux souterraines et de surface étaient à déterminer. Pour cela, le projet a reposé sur la mise en œuvre d'une série d'investigations de terrain essentiellement centrées sur les interfaces entre les compartiments 'eau de surface' et 'eau souterraine', à savoir le sol et la zone non saturée d'une part, l'interface nappe-rivière d'autre part, tout en acquérant des informations complémentaires essentielles au niveau des nappes d'eau souterraine. Les investigations ont été menées à différentes échelles imbriquées : (1) l'échelle du cours d'eau ou du tronçon de cours d'eau, (2) l'échelle du bassin versant et (3) l'échelle de la masse d'eau souterraine. Elles ont visé à apporter d'une part des réponses spécifiques à des problèmes de quantité ou de qualité de l'eau associés aux interactions ESO-ESU dans les bassins sélectionnés, d'autre part des réponses génériques sous forme de nouvelles connaissances (ex : mécanismes d'échanges, évolution des concentrations, données et mesures pour la paramétrisation des modèles …) et d'outils de gestion des ressources en eau (ex : indicateurs quantitatifs et qualitatifs pour les eaux de surface en interaction avec les eaux souterraines) et, in fine, des bassins pilotes pouvant par la suite alimenter les bases de données et de connaissances en support à la prise de décision.

1.2 Description des équipes partenaires du projet

La convention a été établie entre la Région Wallonne et le Service d'Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement de l'Université de Liège. Cependant, quatre équipes universitaires ont collaboré au projet : le service d'Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement de l'Université de Liège (HGE-ULg), l'Unité BIOSE de Gembloux (BIOSE-ULg), le Laboratoire d'Ecologie des Eaux Douces de

l'Université de Namur (LEED-UN) et le Département de Géologie de l'Université de Namur (GEOL-UN). La durée de la convention était initialement fixée à 30 mois, prenant cours le 1er avril 2013. Suite à des retards encourus pour la mise en place du site expérimental (cf. ***Rapport d'Activité n°4***), la convention s'est finalement étalée sur une durée de 39 mois, prenant effectivement fin en juin 2016 (à budget initial inchangé).

La distribution du travail entre les différentes équipes a globalement été organisée comme suit. L'**équipe HGE-ULg** s'est chargée de la gestion globale du projet, des mesures et du monitoring des flux et des interactions à l'échelle du cours d'eau, de la discrimination des sources de contamination des ESO, du développement d'indicateurs de sensibilité des MESO et MESU aux interactions, de l'amélioration du modèle numérique hydrogéologique développé dans le cadre du projet Synclin'EAU pour la masse d'eau souterraine RWM021 et de la mise en place de bassins pilotes pour du monitoring à long terme. L'**équipe GEOL-UN** a eu pour responsabilité principale le suivi quantitatif des ESU et ESO pour les calculs de bilans à l'échelle des bassins tests. L'**équipe LEED-UN** s'est focalisée sur l'évaluation de la qualité biologique des cours d'eau, notamment via un monitoring physico-chimique des eaux de surface, et du développement d'indicateurs pour l'évaluation des de l'impact des interactions ESO-ESU sur l'écologie des cours d'eau. Enfin, l'équipe **BIOSE-ULg** s'est concentrée sur la mise en place d'une campagne de suivi des pratiques agricoles dans la zone d'étude (notamment la réalisation et l'interprétation de tests APL en collaboration avec Nitrawal) et sur le développement d'une modélisation EPIC-GRID tenant compte des pratiques agricoles identifiées dans les bassins étudiés.

Le travail à effectuer a été subdivisé en quatre grandes unités (« workpackages – WP ») :

- WP 1 Coordination de la convention
- WP 2 Mise en place du réseau de mesure quantitatif - qualitatif
- WP 3 Expérimentation et suivi quantitatif - qualitatif
- WP 4 Interprétation – Développement d'outils – Généralisation

Ce rapport final a pour objectif de présenter de manière globale et synthétique l'ensemble des travaux menés et des résultats obtenus dans le cadre de la convention. Il est structuré comme suit. Après ce **Chapitre 1** d'Introduction générale, le **Chapitre 2** revient sur la mise en place du projet, allant de la sélection des bassins versants en comité d'accompagnement à la mise en place effective des réseaux de suivi et des dispositifs expérimentaux qui ont servi de base aux travaux menés dans le cadre de la convention. Dans la foulée, le **Chapitre 3** revient de manière synthétique sur l'ensemble des investigations qui ont été menées et le **Chapitre 4** décrit les principaux travaux d'interprétation, d'analyse, de synthèse et d'exploitation des données collectées. Enfin, le **Chapitre 5** propose des conclusions et perspectives déclinées à la lumière de l'ensemble des résultats obtenus. Ce chapitre inclut également, au point 5.2, la proposition de pérennisation du réseau de mesure sur le bassin du Triffoy en tant qu'observatoire de l'environnement, conformément à l'activité 4.5 de la convention). Ceci constitue donc le ***Délivrable D4.5 Bassins pilotes pérennisés et programme de monitoring mise en place***. À chaque fois que cela est nécessaire et possible, le texte renvoie vers les différents rapports intermédiaires et délivrables qui ont été produits en cours de projet où les informations

détaillées peuvent être retrouvées. L'ensemble des rapports mentionnés sont disponibles sur internet, principalement via le Répertoire Institutionnel des références bibliographique de l'Université de Liège, ORBI (http://orbi.ulg.ac.be). Ils sont accessibles simplement en cliquant sur les liens dynamiques insérés dans le texte de ce rapport final.

2 Mise en place du projet

2.1 Sélection des bassins versants tests

Lors de l'élaboration de la convention, il avait été établi que des investigations seraient menées tant à l'échelle locale qu'à l'échelle régionale, sur des bassins tests définis de commun accord avec la Région. Les zones tests envisagées pour ces investigations devaient être essentiellement associées à des masses d'eau de surface ou des petits bassins hydrogéologiques identifiés par la DGARNE comme étant susceptibles de poser des problèmes en liaison avec les interactions ESO-ESU. Les critères de sélection qui avaient été retenus étaient les suivants :

- des bassins sujets à une pression quantitative significative suite aux prélèvements d'eau souterraine ;
- des bassins caractérisés par des sources a priori contrastées de nitrate (agricoles, rejets domestiques), avec, si possible, certains de ces bassins caractérisés par une composante nitrate «unique» (ex : rejets agricoles seuls, pas de rejets domestiques) ;
- un risque avéré / soupçonné par rapport aux interactions ESO-ESU;
- un ou des bassins témoins : ex : absence de rejet, zone vulnérable vs zone non vulnérable …

Quelques bassins avaient été présélectionnés au stade du montage de la convention, à savoir le Hoyoux amont (incluant le captage Vivaqua de Modave et le captage des Avins), le Triffoy (captages CILE et Vivaqua), la Molignée et le Burnot. Les deux premiers bassins se justifiaient par l'importance des interactions ESO-ESU qui les caractérisent et surtout par la pression que peuvent y constituer les captages. Leur complémentarité se justifiait en outre par le fait que, dans le Triffoy, la pression est essentiellement agricole, tandis que dans le Hoyoux amont, bassin plus étendu, la pression nitrate est a priori plutôt de nature mixte. Les bassins de la Molignée ou du Burnot se justifiaient par le fait qu'ils étaient situés dans la zone vulnérable anciennement désignée, dans une optique d'analyse comparée zone vulnérable – zone non vulnérable. Entre ces premiers choix et le démarrage effectif de la convention, l'ensemble du Condroz a été inclus en zone vulnérable et donc ces distinctions n'avaient plus le même sens. Il était également convenu qu'une série d'investigations pourraient être menées en dehors des bassins tests retenus, en particulier à l'échelle de la masse d'eau souterraine RWM021. Il s'agissait en particulier des campagnes visant à évaluer l'âge et les temps de résidence des eaux souterraines et l'origine des sources de nitrate.

Ces choix ont été rediscutés lors du premier comité d'accompagnement du projet (cf. PV du CA n°1 du 06 mai 2013) et les choix du Triffoy et du Hoyoux Amont ont été entérinés par le Comité d'Accompagnement, en conservant l'option de mener, au cas par cas, des investigations sur d'autres contextes complémentaires. Le bassin de Tailfer a notamment été proposé comme bassin « témoin »

sans pression nitrate notable associée aux pratiques agricoles ou aux rejets urbains. En pratique, il s'est avéré que ce bassin n'est pas aussi « vierge » qu'initialement escompté, avec une occupation du sol très contrastée entre son flanc nord essentiellement boisé et son flanc sud beaucoup plus agricole et urbanisé, ainsi qu'une géologie fort différente des autres bassins. Au final, les travaux se sont principalement concentrés sur les deux bassins sélectionnés, complétés par une campagne hydrochimique régionale à l'échelle de l'ensemble de la masse d'eau souterraine RWM021. Le bassin de Tailfer a cependant fait l'objet d'une attention particulière, notamment lors de la campagne hydrochimique régionale, mais aussi grâce à la réalisation d'un mémoire de fin d'étude d'une étudiante du master en géologie à l'ULg (C.Thomas, 2016). La Figure 2-1 reprend la localisation de la masse d'eau souterraine et des sous-bassins versants et cours d'eau concernés par l'étude.

Figure 2-1. Localisation de la masse d'eau RWM021 et des sous-bassins et cours d'eau concernés par l'étude.

2.2 Inventaires des données disponibles et mise en place du réseau de suivi

L'ensemble des travaux de mise en place des dispositifs requis pour la mise en œuvre du programme de mesures et d'investigations ont fait l'objet de l'activité 2 du projet. Le travail a été organisé en 4 tâches principales (telles que mentionnées dans la convention) dont la mise en œuvre et les principaux résultats sont décrits ci-dessous.

2.2.1 *Collecte et mise à jour des données*

Grâce aux études déjà réalisées sur la masse d'eau RWM021, en particulier les cartes hydrogéologiques et le projet Synclin'EAU, ainsi que l'état des lieux DCE et les résultats du RCS (base de données AQUAPHYC, base de données biologique du DEMNA), un nombre important de données étaient disponibles et déjà intégrées au sein des bases de données de la Région. Le travail a donc consisté à collecter et faire une synthèse des informations et données disponibles au niveau des deux bassins qui ont été étudiés dans le cadre du projet (Triffoy et Hoyoux Amont).

Pour les eaux souterraines, le travail s'est basé principalement sur les travaux de la Carte Hydrogéologique et sur la Banque de Données Hydrogéologiques (BD Hydro) qui elle-même centralise les données venant d'autres banques de données (ex : Calypso, Dix-sous …). La Geodatabase constituée à l'occasion du projet Synclin'EAU (partie RWM021) a également été une importance source de données et informations en appui au volet hydrogéologique du projet ESO-ESU. Cette collecte a permis de faire l'inventaire des points d'accès à la nappe, des données associées (piézométrie, hydrochimie, qualité de l'eau…), des données de bilans hydrologiques etc. Pour les eaux de surface, le travail s'est principalement basé sur la Banque de Données physico-chimiques (Aquaphyc) de la Région avec mise à disposition des données des stations situées dans les bassins sélectionnés (station #15022 Ruisseau du Triffoy à Vierset-Barse, #15024 – Hoyoux à Vierset-Barse, #50128 – Hoyoux à Marchin). Pour la composante sol, le travail s'est basé sur les bases de données qui permettent de décrire le compartiment « sol » ainsi que les pressions diffuses issues du secteur agricole qui affectent la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines : données biophysiques permettant de caractériser le sol, le sous-sol, la topographie ainsi que l'occupation du sol, données climatiques et données agronomiques permettant de caractériser la distribution spatiale ainsi que l'évolution temporelle des pratiques agricoles (types de cultures, apports d'intrants, …) sur base de statistiques régionales (INS, RICA…). L'inventaire des données existantes portant sur les eaux souterraines, les eaux de surface et le sol a fait l'objet du ***Délivrable D2.1 Mise à jour des données disponibles pour le projet***.

2.2.2 *Caractérisation géophysique des zones tests et implantation des piézomètres et micro-piézomètres*

Une part importante du programme d'investigation vise à mieux quantifier les flux d'eau et de polluants et leurs temps de transfert dans le continuum sol – zone non saturée – nappe d'eau souterraine – rivière, dans le contexte des calcaires carbonifères. Cela reposait sur des expérimentations de terrain (traçages, mesures de flux …) pour lesquels des piézomètres devaient être implantés avec soin, dans des zones d'écoulements préférentiels. Pour placer au mieux ces points d'observation, une campagne géophysique a été mise en œuvre pour déterminer, dans les secteurs ciblés, les meilleurs emplacements possibles pour les forages.

Le travail de prospection géophysique a été confié à et réalisé par l'Unité de Recherche en Géophysique Appliquée de l'ULg (Prof. F. Nguyen). Les premières investigations géophysiques ont été menées au niveau de trois sites situés à Marchin et Hodoumont dans le bassin du Triffoy et à Havelange dans le bassin du Hoyoux amont (Figure 2-2).

Figure 2-2. Localisation des sites ayant fait l'objet d'investigations géophysiques pour l'implantation des forages des piézomètres réalisés dans le cadre de la convention.

Pour les deux premiers sites, l'objectif était d'identifier des zones plus fracturées du bedrock calcaire dans lesquels l'eau souterraine peut s'écouler de manière préférentielle. Pour le troisième site, l'objectif visait plus à caractériser le contexte et les formations géologiques le long du coude du ruisseau d'Havelange (le long d'un secteur perdant de ce cours d'eau). Les méthodes géophysiques qui ont été mises en œuvre sont des tomographies électriques (ERT) couplées, pour les sites de Marchin et d'Havelange, à des mesures de polarisation spontanée (PS). Au total, deux profils ERT perpendiculaires et un profil PS ont été réalisés sur le site d'Havelange, un ERT sur le site de Hodoumont et un ERT et un PS sur le site de Marchin. Sur base de ces résultats, des implantations ont été proposées pour les forages de piézomètres (cf. point suivant). Ces travaux de prospection géophysique ont fait l'objet du ***Délivrable D2.2 Rapport technique décrivant les résultats de la prospection géophysique ainsi que l'emplacement des forages***.

Par la suite, des compléments d'investigations géophysiques ont encore été menés dans le cadre du projet pour certains besoins spécifiques. Les résultats ont été intégrés dans les délivrables décrivant les activités et investigations pour lesquelles ces mesures étaient requises. En particulier, sur le site de Hodoumont, il s'est avéré (cf. point 2.2.3 relatif au forage des piézomètres) que la zone de moindre résistivité du sous-sol qui avait été mise en évidence par la géophysique ne correspondait finalement pas à des calcaires fracturés mais à une poche de sable (paléo-karst). Un nouveau profil ERT a été réalisé un peu plus à l'ouest du premier, près d'une zone d'affleurement de calcaire dans

une prairie. Ce nouveau profil a cette fois clairement montré que les calcaires étaient à faible profondeur et le site expérimental a été implanté à cet endroit (cf. point 3.2 relatif au site expérimental d'Hodoumont). Les résultats de cette prospection géophysique complémentaire sont disponibles dans le ***Délivrable D3.2 Rapport technique relatif à la réalisation (mode opératoire et premiers résultats) des essais de traçage dans le continuum sol – zone non saturée – eau souterraine – rivière***.

Pour l'implantation des micro-piézomètres en bord de rivière, aucune prospection géophysique n'a finalement été réalisée. Les emplacements de ces forages ont été définis sur base d'anomalies de températures mises en évidence à l'aide de la fibre optique (méthode DTS – Distributed Temperature Sensing) déployée sur une longueur de 2 km dans le ruisseau du Triffoy (cf. points 2.2.3 et 3.2). Ces anomalies ont été interprétées comme reflétant des arrivées plus localisées d'eau souterraine dans la rivière.

2.2.3 Forage des piézomètres et micro-piézomètres

Sur base des résultats obtenus avec la géophysique et le DTS, des piézomètres profonds et des micro-piézomètres ont été implantés, forés et équipés. L'équipe HGE-ULg a été chargée, pour compte de la Région, de la rédaction du cahier de charge relatif au marché de forages profonds et la désignation de l'entreprise de forage, du choix des emplacements, du suivi opérationnel et scientifique des opérations de forage, de la réalisation des logs et du rapport de forage. La réalisation des forages profonds a été effectuée par la société « Smet GWT » conformément au choix de l'adjudicataire faisant suite à l'ouverture des offres du 5 juillet 2013. Ces forages ont été exécutés au marteau fond-de-trou (MFT) avec des diamètres de départ allant de 140 à 280mm. Le forage des micro-piézomètres a lui été confié à la société « Etablissement Chapon ». Ces forages-ci ont été réalisés au moyen de la méthode de la tarière et du marteau fond-de-trou (MFT) d'un diamètre de 100mm.

Le synthétise les informations relatives aux piézomètres profonds et micro-piézomètres forés dans le cadre du projet. L'ensemble des informations techniques relatives aux opérations de forage sont rassemblées dans le ***Délivrable D2.3 Rapport technique relatif au forage des piézomètres et micropiézomètres***.

Les piézomètres profonds ont été réalisés dans deux buts principaux. Quatre (04) piézomètres ont été forés à divers emplacements des bassins du Triffoy (F1-State et P5-Hodoumont) et du Hoyoux amont (F6 et F7 Petit-Avin) en vue de compléter les informations locales sur la piézométrie et l'hydrochimie des secteurs étudiés. Quatre forages ont également été réalisés pour mettre en place le site expérimental à Hodoumont (P1 et P2 forés et crépinés dans la nappe des calcaires, P3 et P4 forés et crépinés dans la zone non saturée surmontant cette nappe). Ce site expérimental visait à réaliser des investigations relatives aux processus de transfert de l'eau et des polluants à travers le continuum zone non saturée – nappe d'eau souterraine dans les formations calcaires dans le but de mieux comprendre les mécanismes et quantifier les temps de transfert des polluants depuis la surface du sol vers la nappe d'eau souterraine et au sein de celle-ci.

Les micro-piézomètres ont été implantés sur deux sites distants de quelques centaines de mètres au voisinage immédiat des berges du Triffoy pour y mener des investigations spécifiques à l'étude des interactions ESO-ESU. Le site 1 est situé sur la parcelle cadastrée Marchin Section A 314/A/0/0 et comporte 4 micro-piézomètres dont deux avec une double crépine (MP 1, MP 2-3 et 2-6, MP 3-3 et 3-6 et MP 4). Le site 2 est situé sur la parcelle cadastrée Marchin Section C 257/C/0/0 et comporte 2 micro-piézomètres avec chaque fois une double crépine (MP 5-3 et 5-6 et MP- 6-3 et 6-6).

Nom	Bassin	X	Y	Z tubage	Profondeur	Lithologie principale	Diamètre forage	Diamètre tubage interne	Hauteur crépinée (m)
F1 State	Triffoy	212181	127889	211,8	42	Calcaire	180mm	4"	18
P1 Hodoumont	Triffoy	208897	125544	224,9	32,5	Calcaire	235mm	6"	24
P2 Hodoumont	Triffoy	208876	125543	225,4	45	Calcaire	235mm	3"	30 (P2Prof) et 8 (P2Sup)
P3 Hodoumont	Triffoy	208885	125545	226,49	3	Calcaire	140mm	3"	1
P4 Hodoumont	Triffoy	208897	125544	225,96	5,5	Calcaire	140mm	4"	1
P5 Hodoumont	Triffoy	208994	125658	228,4	26	Sable	280mm	4"	12
Petit-Avin 1 AMONT	Hoyoux Amont	214482	121242	236,8	21,5	Calcaire	235mm	4"	11
Petit-Avin 1 AVAL	Hoyoux Amont	214794	121529	229,4	18	Calcaire	235mm	4"	14
Micropiézomètre 1	Triffoy	211856	127856	185,7	5	Gravier	100mm	2"	1
Micropiézomètre 2-3	Triffoy	211781	127829	186,5	3	Limon	100mm	2"	1
Micropiézomètre 2-6	Triffoy	211781	127829	186,4	4	Gravier et sable	100mm	2"	1
Micropiézomètre 3-3	Triffoy	211768	127823	186,2	3	Limon	100mm	2"	1
Micropiézomètre 3-6	Triffoy	211768	127823	186,5	6	Calcaire	100mm	2"	1
Micropiézomètre 4	Triffoy	211751	127837	186,2	6	Calcaire et gravier	100mm	2"	1

Tableau 2-1. Informations générales relatives aux piézomètres et micro-piézomètres qui ont été forés dans le cadre de l'étude.

2.2.4 Mise en place des réseaux de monitoring ESO-ESU-BIO

L'étude des interactions et la quantification des flux entre ESO et ESU, ainsi que l'évaluation de l'impact des eaux souterraines sur la qualité chimique et biologique des eaux de surface requièrent la mise en place, sur les cours d'eau ou tronçons de cours d'eau, d'un réseau de monitoring permettant de mesurer, avec une fréquence élevée, l'ensemble des variables qui régissent ces interactions (paramètres météorologiques, niveau et débits des cours d'eau, niveaux piézométriques, température, hydrochimie ESO-ESU, éléments de qualité biologique…). Les réseaux de mesures adaptés ont été mis en place (station météorologique, sections de jaugeage, réseau piézométrique, sondes multi-paramètres …). L'objectif était de pouvoir suivre l'ensemble des variables sur un cycle hydrologique complet au minimum (au final deux cycles ont quasiment été suivis tenant compte de l'extension du projet à 39 mois). Ce monitoring a comporté à la fois un suivi quantitatif et qualitatif des eaux souterraines et des cours d'eau et un réseau d'échantillonnage biologique. Une description

détaillée du réseau de suivi mis en place dans la première phase du projet ESO-ESU est disponible dans le ***Délivrable D2.4 Réseau et programme de monitoring mis en place sur les sites tests***. La partie introductive du ***Délivrable D3.5 Quantification des échanges nappe-rivière pour les bassins tests*** synthétise également l'essentiel de l'information relative au réseau de suivi quantitatif et qualitatif en donnant plus de détails sur les types et fréquences de mesures finalement effectuées en pratique sur ce réseau. Le ***Délivrable D3.1 Acquisition des données pour l'interprétation de la pression associée des prélèvements d'eau souterraine sur l'état et le fonctionnement écologique des cours d'eau*** revient sur le réseau de monitoring biologique et les mesures qui ont effectivement été menées sur ce réseau.

La Figure 2-3 donne une vue d'ensemble de l'ensemble des points de mesures qui ont fait partie de ce réseau de suivi.

Figure 2-3. Localisation des principaux points de mesures du réseau de suivi ESO-ESU-BIO.

3 Résumé des investigations menées dans le cadre de l'étude

3.1 Investigations relatives au fonctionnement biologique des cours d'eau

L'étude de l'effet des interactions entre les ESO et les ESU demandait la mise en œuvre d'approches plus approfondies que celles utilisées pour l'évaluation de l'état écologique des ESU dans le cadre du réseau de contrôle de surveillance DCE mis en place par la Région. Ces méthodes évaluent l'impact sur l'écosystème aquatique de pressions anthropiques diverses, susceptibles d'altérer l'état hydro-morphologique, physico-chimique, chimique et biologique des masses d'eau de surface. Elles sont basées sur des échantillonnages périodiques à des stations fixes et sont destinées à évaluer une évolution de l'état écologique des masses d'eau à long terme. Elles ne permettent pas d'appréhender des processus physico-chimiques et écologiques à des échelles spatiales et temporelles relativement fines, pertinentes dans le cadre de cette étude. Par contre, les informations provenant du RCS ont permis de pointer un problème dans le Triffoy, où l'état écologique est « moyen » du fait d'indices biotiques invertébrés trop bas, alors que la qualité physico-chimique de l'eau est bonne à très bonne, sauf pour le nitrate. C'est pour cette raison –concentration en nitrate élevée - que les masses d'eau du Hoyoux et du Triffoy sont considérées comme étant à risque de non-atteinte du bon état.

L'étude bibliographique sur les effets sur l'écosystème des interactions ESO-ESU a permis de mettre en évidence que très peu d'études sur ce thème ont été menées. Par contre, il est bien démontré que des prélèvements d'eau entraînant des réductions de débit des cours d'eau ont des impacts écologiques, principalement par une réduction de la diversité et de l'abondance de la faune benthique, suite à une diminution / modification des habitats, suite à une sédimentation accrue et à des développements d'algues benthiques. Quant à un effet sur les communautés aquatiques de concentrations élevées en azote nitrique, la littérature est très pauvre, voire inexistante. Les diatomées et les macro-invertébrés benthiques apparaissent néanmoins comme des indicateurs pertinents pour évaluer des altérations physico-chimiques et hydromorphologiques.

Les campagnes menées sur le Hoyoux, le Ruisseau de Pailhe (affluent du Hoyoux) et le Triffoy ont permis de mettre en évidence des situations contrastées. D'une part, la physico-chimie et l'analyse des peuplements de diatomées benthiques montre que ces cours d'eau sont au minimum de bonne qualité et présentent des conditions stables favorables à une diversité taxonomique élevée. Les assemblages algaux ne semblent pas perturbés par la pollution azotée des cours d'eau étudiés, mais cette conclusion doit être nuancée car très peu de connaissances existent sur l'effet des concentrations en nitrate élevées. En effet, l'attention des hydrobiologistes s'est focalisée sur le phosphore, connu comme agent principal de l'eutrophisation des ESU. D'autre part, l'analyse détaillée des peuplements de macro-invertébrés benthiques et de leurs traits fonctionnels (traits biologiques et écologiques des espèces) dans plusieurs stations du Hoyoux et du Triffoy a mis en évidence que les peuplements du Hoyoux sont assez diversifiés – à la fois au niveau taxonomique (richesse en espèces) et au niveau écologique (diversité des « groupes fonctionnels » et des traits fonctionnels des espèces). Par contre, dans le Triffoy, alors que la qualité de l'eau est bonne à très bonne, la macrofaune benthique est relativement peu diversifiée et appauvrie sur le plan fonctionnel. L'analyse fine des traits des organismes révèle diverses anomalies par rapport à une

situation de référence, résultant d'une faible diversité des substrats, de l'accumulation de sédiment fin et de matière organique sur le fond et d'une vitesse de courant réduite suite à de faibles débits.

Deux conclusions majeures peuvent être tirées de cette étude : d'une part, le choix des indicateurs s'est révélé pertinent dans la mesure où ils ont permis de mettre en évidence un impact des interactions ESO-ESU sur l'état écologique des eaux de surface, avec la capacité d'évaluer la qualité de l'eau et l'impact écologique des perturbations hydromorphologiques ; d'autre part, les résultats de l'étude indiquent un effet probable des captages sur les conditions morpho-dynamiques et la qualité écologique dans le Triffoy, alors que le Hoyoux semble actuellement peu affecté à cet égard.

Les détails relatifs au fonctionnement biologique des cours d'eau sont disponibles dans le Délivrable ***D3.1 Acquisition des données pour l'interprétation de la pression associée des prélèvements d'eau souterraine sur l'état et le fonctionnement écologique des cours d'eau***.

3.2 Investigations sur le site expérimental de Hodoumont

Pour pouvoir mieux paramétrer des outils d'évaluation et de prédiction des tendances en matière de qualité et de quantité des eaux souterraines, il était nécessaire de disposer de connaissances plus approfondies sur les mécanismes et les temps de transfert et de résidence des polluants entre la surface du sol où ils sont épandus jusqu'à la nappe d'eau souterraine (lessivage vers l'eau souterraine) et en son sein (dispersion et mélange). Le site expérimental qui a été mis en place dans le bassin du Triffoy à Hodoumont visait à apporter des connaissances et informations nouvelles dans ce contexte. Le site (Figure 3-1), situé sur la propriété du château d'Hodoumont a été équipé avec deux forages crépinés dans la nappe d'eau souterraine (P1 : puits de pompage / reprise et P2 : puits d'injection) et deux forages dans la zone non saturée des terrains calcaires (P3 : crépiné à 3m et P4 : crépiné à 5m). Les détails relatifs au forage de ces piézomètres sont disponibles dans le ***Délivrable D2.3 Rapport technique relatif au forage des piézomètres et micropiézomètres***.

Un essai de pompage par paliers a été réalisé sur le puits P1. L'interprétation sur base de la méthode de Birsoy-Summers a été appliquée et les valeurs de transmissivités ainsi calculées sont comprises entre 1.3×10^{-3} et 2.6×10^{-3} m²/s. Ces valeurs sont corroborées avec celle de conductivité hydraulique calculée sur base des courbes caractéristiques du puits et des débits spécifiques (1.2×10^{-4} m/s).

Les essais de traçage ont été réalisés dans la zone saturée. Ils ont mis en évidence la connexion entre le P2 (puits d'injection) et le P1 (puits de restitution). Les vitesses maximales d'écoulement sous conditions de pompage variaient entre 5 et 11m/h. Cependant, aucune diminution du temps de transfert n'a été mise en évidence lors d'un pompage plus important au puits de restitution, cette augmentation de débit induisait même une plus grande dilution du traceur.

Figure 3-1. Vue d'ensemble des piézomètres forés sur le site expérimental d'Hodoumont.

Différents essais (infiltration, pompage et traçage) ont été réalisés sur le site expérimental, tant au niveau de la zone saturée que de la zone non saturée. La description et les résultats de ces essais sont disponibles dans le ***Délivrable D3.2 Rapport technique relatif à la réalisation (mode opératoire et premiers résultats) des essais de traçage dans le continuum sol – zone non saturée – eau souterraine - rivière***.

Des tests d'infiltration ont été réalisés sur les piézomètres P3 et P4 crépinés dans la zone non saturée. Ils ont permis de mettre en évidence une différence de comportement entre les deux piézomètres. Plusieurs jours ont été nécessaires pour l'infiltration de l'eau dans le P3 alors qu'il n'a fallu que quelques minutes pour que l'eau s'infiltre complètement dans le massif au P4. Cette différence de comportement se reflète au niveau des conductivités hydrauliques calculées (1.0 à 9.0 $\times 10^{-7}$ m/s pour le P3 – 3 à 8 $\times 10^{-5}$ m/s pour le P4).

Cette différence de comportement s'est également reflétée au niveau des résultats des essais de traçage réalisés dans la zone non saturée par injection de traceurs au P3 et au P4 avec récupération au puits de pompage P1. Les différents essais réalisés sur le P4 ont présenté des temps de transit très courts vers le P1 (première arrivée : 1h30 et temps modal : 3h30) alors qu'aucune restitution n'a été observée au puits P1 suite à l'injection réalisée au P4. Le mécanisme qui domine le transfert vertical est la gravité.

Les résultats obtenus permettent de mieux comprendre le comportement de l'eau et des solutés vers et dans la nappe des calcaires du Carbonifère. Les temps de transfert dans la zone non-saturée et dans la zone saturée ont été évalués et les données montrent que la dynamique des échanges est importante à l'interface sol – zone non saturée – nappe. Il est particulièrement ressorti de ces essais de traçage dans la zone non saturée des calcaires du Carbonifère que les temps de transfert sont globalement courts, ne fût-ce qu'en comparaison à d'autres contextes géologiques (par exemple dans les craies, cf. Brouyère 2001 et Brouyère et al. 2004).

Le site expérimental d'Hodoumont a également servi pour d'autres activités du projet. Une station météorologique a été installée près du château et elle a permis d'enregistrer des données sur deux années. Ces données ont servi pour le calcul des bilans (cf. point 3.3 ci-dessous). Un suivi de la piézométrie a également été assuré avec des sondes de pression. Enfin, des échantillons d'eau souterraine ont régulièrement été prélevés dans les piézomètres du site (puits de pompage P1 et piézomètre double crépine P2) pour évaluer la qualité chimique des eaux souterraines (cf. point 3.4) et suivre l'évolution des concentrations en en nitrate (cf. point 3.5).

3.3 Bilans hydrologiques

Les objectifs de cette partie de l'étude étaient de (1) Évaluer les flux d'eau souterraine entre les bassins tests ; (2) Évaluer les sens des échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines et (3) Comprendre la dynamique de ces échanges au cours du temps. Pour ce faire, des bilans hydrogéologiques, annuels et mensuels, ont été réalisés à différentes échelles spatiales : bassins versants du Hoyoux Amont à Modave, du torrent de Bonne et du Triffoy) ; sous-bassins du Hoyoux jusqu'à Petit Avin, du Ruisseau de Pailhe, et du Ruisseau d'Havelange ; tronçons du Triffoy : à Jamagne, à State et à Souce de Marchin. ;

Les résultats des bilans annuels (Tableau 3-1) mettent en évidence respectivement l'existence de flux sortant ou entrant par les limites des bassins hydrologiques. Un calcul de bilan qui boucle (terme de fermeture proche de zéro) indique que les flux sortant et entrant sont équivalents ou que ces flux sont très faibles et ne transparaissent pas dans le résultat du bilan.

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

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

Tableau 3-1. Résultats des bilans annuels calculés pour divers bassins versants étudiés dans le cadre de l'étude.

Afin de confirmer les flux d'eau souterraine estimés par le calcul des bilans annuels, des gradients piézométriques ont été calculés. Couplés aux bilans annuels, ils ont permis d'identifier les flux entre les bassins et sous-bassins (Figure 3-2), répondant ainsi au premier objectif de ce travail.

L'analyse de la piézométrie a permis de répondre au deuxième objectif qui était d'identifier le caractère (drainant, infiltrant, pseudo-équilibre) des cours d'eau et donc le sens des échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines (Figure 3-2).

Les résultats des bilans mensuels de toutes les stations mettent en évidence l'alternance du caractère excédentaire (ou un bilan bouclé dans le cas des cours d'eau perdant) aux périodes avec peu ou sans eau utile et du caractère déficitaire lors des périodes où l'eau utile est présente. En couplant les résultats des bilans mensuels avec les données de piézométrie, on constate que les bilans déficitaires sont systématiquement liés à la recharge de la nappe qui se fait en deux phases : 1°) la stabilisation du rabattement ; 2°) la remontée de la nappe. Le délai entre l'apparition de l'eau utile et le début de la remontée de la nappe est de l'ordre de 4-5 mois. Ce qui, pour la période 2014-2015, correspond au début du mois de janvier.

Figure 3-2. Carte hydrogéologique de la zone d'étude avec indication des écoulements souterrains et avec indication de la typologie des interactions ESO-ESU

3.4 Campagne hydrochimique régionale

L'objectif de réduction des concentrations en nitrate dans les eaux souterraines et de surface ne pouvant être atteint qu'en diminuant les quantités de nitrate relâchées dans l'environnement, il est de première importance d'identifier les sources de pollution qui y sont associées. Au-delà d'une caractérisation de l'hydrochimie des eaux souterraines, l'objectif de la campagne hydrochimique régionale a surtout visé à améliorer la détermination des types de sources de nitrate et de leurs contributions respectives à la contamination des eaux souterraines et de surface.

Pour ce faire, en complément aux différentes investigations réalisées à l'échelle locale au niveau des deux bassins tests du projet (***D3.2 Rapport technique relatif à la réalisation des essais de traçages dans le continuum sol – zone non saturée – eau souterraine - rivière*** **et** ***D3.5 Quantification des échanges nappe-rivière pour les bassins tests***), une étude hydrochimique a été menée à l'échelle de la masse d'eau souterraine RWM021 « Calcaire et grès du Condroz ». Divers ouvrages et points de prélèvement (puits, piézomètres, captages, sources, eaux de surface ...) ont été en vue de caractériser l'hydrochimie générale (éléments majeurs) ainsi que l'isotopie (nitrate et bore) de l'eau des ouvrages échantillonnés. L'étude des rapports isotopiques du nitrate et du bore offre en effet la perspective de discriminer les sources de contamination car celles-ci présentent généralement des signatures contrastées en matière de facteurs d'enrichissement isotopique. Le ***Délivrable D3.4 Caractérisation hydrochimique et campagne isotopique pour la discrimination des sources de pollution ponctuelles et diffuses*** fournit la description du réseau d'échantillonnage, les analyses chimiques réalisées et une interprétation des résultats sur base d'une étude hydrochimique classique, l'application de statistiques multivariées sur l'ensemble des données et une analyse des rapports isotopiques pour la discrimination des sources de contamination.

La première étape du travail a consisté en un inventaire des points de prélèvement accessibles sur l'ensemble de la masse d'eau souterraine RWM021. Un plan d'échantillonnage a été élaboré afin de répondre aux objectifs de la tâche. Les ouvrages ont été sélectionnés dans les différentes lithologies rencontrées et afin de définir les signatures hydrochimiques des différents pôles de composition hydrochimique (end-members). Une fois cette étape réalisée, la campagne d'échantillonnage a été mise en œuvre durant l'automne 2014 (de septembre à novembre). Cette période ayant coïncidé avec la campagne d'échantillonnage réalisée par l'ISSeP dans le cadre des réseaux de surveillance de la Région Wallonne, les prélèvements ont été en partie réalisés en collaboration avec l'ISSeP afin qu'ils prélèvent, en plus des échantillons nécessaires à leurs analyses, des échantillons d'eau pour des analyses spécifiques aux besoins du projet ESO-ESU (en particulier des échantillons pour les analyses isotopiques). Au total, 83 points ont été échantillonnées durant la campagne, à savoir 46 directement par HGE-ULg et 37 par l'ISSeP (Figure 3-3). La majorité de ces points correspondent à des prélèvements d'eau souterraine (71 points) et ont été complétés par quelques points de prélèvement sur les eaux de surface (12 points).

Les éléments majeurs et mineurs ont été analysés par l'ISSeP sur les échantillons du réseau 'SEQ-SM' en vue d'obtenir les teneurs des éléments chimiques classiquement présents dans les eaux souterraines. L'ensemble des échantillons prélevés par HGE-ULg et ceux du réseau 'Survey Nitrate' ont été analysés au laboratoire d'analyse en phase liquide de l'Université de Liège en vue de quantifier les éléments majeurs. Les analyses relatives au bore (concentration et isotopie $\delta^{11}B$) ont été confiées au VITO (Mol). Les analyses du $\delta^{15}N$ et $\delta^{18}O$ du nitrate ont été confiées au 'Department of Catchment Hydrology' du 'Helmholtz-Centre for Environmental Research UFZ' de Leipzig en Allemagne.

Figure 3-3. Localisation des ouvrages échantillonnés lors de la campagne d'automne 2014 ; l'échantillonnage a été effectué soit par l'ISSeP (symbole rond) dans le cadre du réseau 'Survey Nitrate' rouge) ou de surveillance (bleu) soit par l'ULg-HGE (symbole carré) dans le cadre spécifique du projet.

Les conclusions relatives à l'ensemble de l'étude hydrochimique qui y ont été proposées peuvent se résumer comme suit. Les analyses classiques de l'hydrochimie de l'eau ne permettent pas de différencier les différentes sources de contamination associées au nitrate. L'utilisation de l'isotopie du nitrate ($\delta^{15}N$ et $\delta^{18}O$) permet (1) de mettre en évidence les processus de dénitrification, et (2) de différencier les affluents forestiers qui présentent des rapports isotopiques très contrastés. Cependant, cette approche n'est pas suffisante du fait du caractère non conservatif du nitrate, ce qui conduit à une évolution de la signature isotopique du nitrate mélangeant les différentes sources entre elles. Cependant, combinée à l'isotopie du bore ($\delta^{11}B$) et à l'occupation du sol, l'approche isotopique permet de mieux mettre en évidence les pôles de contamination. Les ouvrages contaminés par des effluents urbains présentent une signature isotopique du bore faible tandis que les ouvrages situés dans des contextes agricoles présentent un rapport isotopique du bore nettement plus élevé. L'application de statistiques multivariées (matrices auto-organisantes) a également fourni une première estimation de l'importance relative des différentes sources de pollution sur la masse d'eau souterraine RWM021 en y distinguant des secteurs qui sont affectés par une contamination « mixte » agricole et urbaine (36% des points de prélèvement associés), des secteurs affectés par une contamination de type essentiellement urbaine (29%) ou agricole (20%) et des secteurs « non impactés » (15%). L'ensemble de la campagne montre également l'importance d'échantillonner les sources de contamination afin d'en connaître la signature chimique et isotopique. Cette information est primordiale afin de pouvoir définir les pôles de contamination mais également effectuer des comparaisons, soit directes soit statistiques, des points présentant des signatures moins différenciées.

3.5 Investigations relatives aux échanges nappe – rivière

L'objectif majeur de la convention était de mieux comprendre et de quantifier les échanges d'eau et de solutés entre les eaux souterraines et les eaux de surface et ce, dans des bassins de type calcaire carbonifère. Pour cela, un nombre important d'investigations ont spécifiquement été menées afin disposer de données, de mesures et d'observations permettant de mettre en évidence, déterminer la dynamique temporelle et quantifier les échanges d'eau entre nappe et rivière, ainsi qu'étudier et comprendre la dynamique du nitrate dans ce système interconnecté. Ces investigations ont consisté en des mesures directes sur le terrain, telles que des jaugeages, des suivis hydrochimiques, de température et de conductivité électrique, des mesures de flux, et des mesures indirectes basées par exemple sur l'application de la loi de Darcy pour le calcul de ces échanges. Ces mesures et investigations ont été menées sur toute la durée du projet sur les sous-bassins du Triffoy et du Hoyoux Amont. Le bassin du Triffoy offre un contexte ESO-ESU très typique d'une interaction de type « rivière drainante ». Le Hoyoux Amont présente différents types d'interactions mais le vallon du ruisseau d'Havelange a été étudié plus en détail parce qu'il est représentatif d'une interaction de type « rivière perchée ».

Le ***Délivrable D3.5 Quantification des échanges nappe-rivière pour les bassins tests*** revient sur les dispositifs de suivi quantitatif et qualitatif des eaux de surface et des eaux souterraines, les investigations menées et les résultats qui en ont découlés. Les conclusions et perspectives de ce délivrable proposent (1) un modèle conceptuel global et un organigramme type décrivant la dynamique de l'eau et des solutés (nitrate) dans des bassins calcaires du Condroz en interaction avec les eaux de surface (Figure 3-4), (2) un retour sur les moyens d'investigations mis en œuvre et leur adéquation pour mettre en évidence une série de processus relationnels entre ces compartiments essentiels du cycle de l'eau dans un bassin versant et (3) des perspectives visant à élargir le champ d'application des études nappe-rivière à d'autres contextes hydrologiques et hydrogéologiques.

De manière plus globale, ces travaux ont permis de définir une approche intégrée visant à caractériser et à décrire de manière systématique les interactions nappe-rivière dans un bassin versant et ils ont servi de base pour le développement et l'application d'indicateurs et d'une typologie relatifs au interactions ESO-ESU (cf. § 4.1 ci-dessous).

Figure 3-4. Modèle conceptuel des transferts d'eau et logigramme fonctionnel d'un bassin versant dans les cas respectifs d'un cours d'eau drainant ou perdant (REM = mix des figures 46 et 47 du D3.5).

3.6 Campagne APL avec Nitrawal

L'estimation des pressions diffuses issues du secteur agricole sur les eaux de surface et les eaux souterraines dans les 2 bassins versants tests (le Hoyoux amont et le Triffoy) a été réalisée via l'utilisation d'un modèle agro-hydrologique (modèle EPICgrid, Sohier, 2011). Afin d'alimenter ce modèle avec des données aussi réalistes que possible, une collaboration avec les encadrants de Nitrawal a été initiée.

Nitrawal a ainsi collecté chez les agriculteurs de la zone d'étude un nombre très important de données sur plus de 500 parcelles. Les données collectées ont trait notamment aux successions culturales et aux fertilisations minérales et organiques (dates et types de fertilisants). Des analyses d'engrais de ferme, des analyses standard ainsi que des mesures d'Azote Potentiellement Lessivable (APL) ont également été réalisées par Nitrawal.

L'Azote Potentiellement Lessivable ou APL est la quantité d'azote nitrique contenu dans le sol à l'automne, susceptible d'être entraîné hors de la zone racinaire pendant l'hiver (la profondeur considérée est de 90 cm en culture – 30 cm en prairie). L'APL est utilisé comme outil de contrôle en zone vulnérable dans le cadre du Programme de Gestion Durable de l'Azote (PGDA). Chaque année, au minimum 5% des exploitations ayant une partie ou la totalité de leur superficie agricole en zone vulnérable sont sélectionnés et contrôlés par l'Administration. Des mesures sont réalisées dans 3 parcelles de l'exploitation et sont comparées à des valeurs de référence. Les références sont établies à partir d'APL mesurés dans 40 exploitations agricoles suivies depuis 2002 par les membres scientifiques (GxABT et UCL) de Nitrawal. Ces exploitations reçoivent des conseils de fertilisation et gèrent leurs parcelles dans le respect du PGDA.

La majorité des mesures d'Azote Potentiellement Lessivable (APL) réalisées par Nitrawal chez les agriculteurs des bassins versants du Triffoy et du Hoyoux amont durant les automnes 2013 et 2014 se sont avérées conformes (exemple de l'année 2013 au Tableau 3-2). Certaines valeurs très importantes sont cependant occasionnellement observées. Ces valeurs peuvent résulter d'une mauvaise conduite de la culture (fumure excessive, …) mais peuvent aussi refléter un accident survenu en cours de culture (problème phytosanitaire ou autre).

Une réunion de sensibilisation a été organisée à la commune d'Ohey, en collaboration avec Nitrawal et en présence de l'équipe HGE ULg, afin de présenter aux agriculteurs les résultats des mesures d'Azote Potentiellement Lessivable (APL) réalisées par Nitrawal durant l'automne 2013.

Classe		NB obs.	APL conformes	APL non conformes
1	Betteraves	4	3 (75%)	1 (25%)
2	Céréales non suivies d'une culture implantée en automne	15	13 (87%)	2 (13%)
3	Céréales suivies d'une culture implantée en automne ; chicorée	10	9 (90%)	1 (10%)
4	Maïs	16	14 (88%)	2 (12%)
5	Pomme de terre	2	1 (50%)	1 (50%)
6	Colza	7	7 (100%)	0 (0%)

7	Légumes cultivés pour leurs feuilles, tiges ou fruits	3	2 (67%)	1 (33%)
8	Prairies pâturées ou fauchées	-	-	-

Tableau 3-2. Conformité des APL réalisés par Nitrawal dans les bassins versants du Triffoy et du Hoyoux amont à l'automne 2013

4 Principaux travaux d'interprétations et synthèse des résultats obtenus

4.1 Développement et application d'indicateurs et d'une typologie des interactions ESO-ESU

Dans les premiers états des lieux par masses d'eau de surface et d'eau souterraine, la Région n'avait pas pu statuer de manière claire sur l'influence de l'interdépendance nappe-rivière sur l'état respectif des eaux souterraines et des eaux de surface. Partant de ce constat, un des objectifs principaux du projet ESO-ESU était d'établir des indicateurs de ces interactions et les moyens de les calculer (***Délivrable D4.1 Développement d'indicateurs des interactions entre eaux souterraines et eau de surface***).

Partant de la conceptualisation des interactions nappe-rivière qui a découlé du ***Délivrable D3.5 Quantification des échanges nappe-rivière pour les bassins tests*** (cf. § 3.5 ci-dessus) qui décrit en « cascade » les différentes composantes des flux d'eau et de matières, le choix s'est porté sur des indicateurs de type *cause à effet*, en s'inscrivant également implicitement dans une approche de type DPSIR avec une distinction claire entre, d'une part, une liste d'indicateurs « intrinsèques » relatifs aux interactions nappe-rivière, d'autre part, des indicateurs de pression (Tableau 4-1) . Les premiers visent essentiellement à objectiver l'importance des interactions nappe-rivière indépendamment de toute influence de l'Homme (ex : importance du débit de base sur l'écoulement dans le cours d'eau), les deuxièmes visent à établir la pression anthropique sur le milieu naturel (ex : importance des prélèvements d'eau). Si besoin, des méthodes spécifiques ont été proposées pour calculer ces indicateurs.

Pour tester et illustrer l'approche développée, les indicateurs proposés ont été calculés pour les bassins tests (Triffoy et Hoyoux Amont) sur base des données collectées dans le projet, en s'appuyant principalement sur les résultats obtenus à l'échelle des bassins (***Délivrable D3.3 Bilans Hydrogéologiques***) et à l'interface nappe – rivière (***Délivrable D3.5 Quantification des échanges nappe-rivière pour les bassins tests***). Du fait des contextes étudiés dans le projet (principalement des cours d'eau drainants de type alcalin), l'essentiel de l'analyse a porté sur le cas où l'échange d'eau est essentiellement depuis l'eau souterraine vers le cours d'eau. Cependant, la généralisation de ces indicateurs à d'autres types de bassins a été discutée.

Indicateur	Symbole	Formule	Descriptif	Section
Intrinsèque	I^1_{ESO}	I/EU	Importance de l'infiltration dans le bassin versant	4.1.1
	I^1_{ESU}	R/EU	Importance du ruissellement dans le bassin versant	4.1.1
	I^2_{ESO}	Q_{ESO}/I	Importance du drainage de la nappe par échanges d'eau souterraine entre bassins	4.1.2
	I^2_{ESU}	Q_B/I	Importance du drainage de la nappe par le cours d'eau	4.1.2
	BFI	Q_B/Q_T	Importance du débit de base sur le débit total du cours d'eau	4.1.3
	I^3_{ESO}	Q^r_B/Q_B	Importance de la composante de drainage rapide	4.1.4
	I^4_{ESO}	Q^l_B/Q_B	Importance de la composante de drainage lent	4.1.4
Pression	P_1	Q_C/EU	Importance des prélèvements par rapport à l'eau utile	4.2.1
	P_2	Q_C/I	Importance des prélèvements par rapport à l'eau disponible pour l'infiltration	4.2.1
	P_3	Q_C / (Q_C + Q_T)	Impact des prélèvements sur le débit du cours d'eau	4.2.1

Tableau 4-1. Synthèse des indicateurs quantitatifs et de pression proposés dans le cadre du projet ESO-ESU.

Sur base du croisement des divers indicateurs, une typologie des bassins versants, basée sur une classification hiérarchique des indicateurs (Figure 4-1) a également été proposée, permettant de distinguer différents fonctionnements du cours d'eau en rapport avec les interactions ESO-ESU et de clarifier l'importance relative de l'eau souterraine sur le régime et l'état quantitatif et qualitatif du cours d'eau.

Figure 4-1. Définition d'une typologie des bassins versants basée sur une classification hiérarchique des indicateurs d'interactions ESO-ESU

Finalement, un calcul des flux de nitrate basé sur les données de terrain a également été présenté et comparé aux flux théoriques calculés par la méthode de quantification des « efforts » à réaliser pour

l'atteinte du bon état qualitatif des eaux de surface par la méthode du « GAP ». Ces flux ont également été comparés à ceux modélisés par le modèle EPIC (cf. § 4.2 ci-dessous). Il est à noter que par la suite (hors convention ESO-ESU) une première tentative d'extension de la méthodologie et de la définition d'indicateurs d'interactions ESO-ESU a été effectuée pour un contexte plus karstique (de type perte – résurgence) dans le bassin de Tailfer dans le cadre du mémoire de fin d'études de C.Thomas (2016).

4.2 Modélisation EPICgrid

Le modèle EPICgrid est un modèle hydrologique sol et zone vadose incluant les cycles des éléments (N,P) et permettant de représenter les flux diffus vers les eaux de surface et vers les eaux souterraines. Ce modèle a été utilisé dans le cadre du projet afin notamment d'estimer les pressions diffuses issues du secteur agricole sur les eaux de surface et les eaux souterraines et de tester l'impact des pratiques agricoles sur la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines.

La répartition des termes du bilan hydrologique par bassin versant (évapotranspiration, écoulement vers les eaux de surface (ruissellement direct et flux hypodermiques lents, recharge de la nappe de base) a été estimée pour chaque bassin versant en tenant compte des caractéristiques intrinsèques des bassins versants (occupation du sol, nature du sous-sol). En outre, la confrontation des résultats du modèle et des données observées a permis d'évaluer le sens des interactions nappe / rivière et, en première approche, les volumes concernés. La comparaison avec l'analyse des chroniques hydrologiques réalisées dans le cadre du projet (***Délivrable D3.3 Bilans Hydrogéologiques***) est venue renforcer ces conclusions.

Le modèle EPICgrid a également permis d'évaluer les flux d'azote vers les eaux de surface et vers les eaux souterraines. Outre la pollution agricole diffuse, la contribution du secteur domestique à la pollution azotée des eaux de surface a également été estimée. Pour le Triffoy et ses sous-bassins, la contribution du secteur domestique à la pollution azotée des eaux de surface est de l'ordre de 10%. Pour le Hoyoux, cette contribution est globalement plus importante (21 à 28 % selon le scénario envisagé) et peut s'avérer localement significative.

Les concentrations moyennes en nitrate dans les eaux de surface calculées via la modélisation agro-hydrologique se sont avérées être du même ordre de grandeur que les concentrations observées.

Le modèle a également été utilisé pour tester l'impact des pratiques agricoles sur la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines. Le modèle a non seulement permis de reproduire les APLs (Azote Potentiellement Lessivable) observés mais a également permis d'identifier des pratiques agricoles permettant de réduire les contaminations.

A titre d'exemple, la Figure 4-2 présente l'impact des conditions d'implantation d'une CIPAN (Culture Intermédiaire Piège A Nitrate) sur le stock d'azote dans les 90 premiers centimètres de sol (profondeur correspondant à la mesure de l'APL sous culture) ainsi que sur la concentration en nitrate de l'eau de lessivage durant l'hiver qui suit. Sans l'implantation d'une CIPAN, le stock d'azote à l'automne augmente de manière très importante suite à la minéralisation des résidus végétaux et de

la matière organique. La concentration en nitrate de l'eau de lessivage durant l'hiver suivant est alors importante (61 mg NO_3^-/L). Les pertes d'azote à 90 cm de profondeur ainsi que la concentration en nitrate de l'eau de lessivage durant l'hiver sont réduites par l'implantation d'une CIPAN, cette réduction étant d'autant plus importante que la CIPAN est implantée dans de bonnes conditions.

Figure 4-2. : Modèle EPICgrid – Simulation de scénario de modification des pratiques agricoles (conditions d'implantation d'une CIPAN)

4.3 Modélisation hydrogéologique à l'échelle du bassin du Hoyoux

L'activité "modélisation hydrogéologique" du projet ESO-ESU avait pour objectif de développer un outil de prédiction de l'état quantitatif et qualitatif des eaux souterraines, en tenant particulièrement compte des interactions entre les eaux souterraines (ESO) et les eaux de surface (ESU) pour les bassins étudiés dans le cadre du projet. A cette fin, un modèle physiquement basé et spatialement distribué simulant les écoulements et le transport de solutés en milieu souterrain a été développé pour le bassin amont du Hoyoux à l'aide du code SUFT3D (Carabin & Dassargues 1999, Brouyère 2003)) et de la méthode HFEMC (Brouyère et al. 2009, Orban et al. 2010a). Basé sur le modèle développé pour la masse d'eau souterraine RWM021 dans le cadre du projet Synclin'EAU (Brouyère et al. 2007, 2011 ; Orban et al. 2008, 2010b), ce nouveau modèle intègre les données nouvellement acquises, notamment sur les mécanismes de transfert d'eau et de solutés dans la zone non saturée et dans la nappe (transfert rapide dans les couches superficielles de calcaires altérés, transfert plus lent dans les couches plus profondes) et les interactions nappe-rivière (localisation plus précise des zones d'échanges, définition du sens des échanges et quantification des flux échangés). A cette fin, et en comparaison avec le modèle régional développé pour la masse d'eau RWM021 dans le cadre du projet Synclin'EAU, ce nouveau modèle local a été développé en utilisant un maillage à la fois plus raffiné horizontalement et basé sur un plus grand nombre de couches d'éléments finis suivant la verticale, permettant de mieux intégrer l'hétérogénéité verticale des formations géologiques que ce qui avait pu être effectué dans le modèle régional.

Les travaux de calibration décrit dans le ***Délivrable D4.3 Amélioration du modèle mathématique développé pour la masse d'eau RWM021 dans le cadre de Synclin'EAU***, effectués en régime permanent, ont permis d'obtenir une reproduction satisfaisante par le modèle de la piézométrie observée, des échanges souterrains entre les sous-bassins versants de la zone étudiée et des interactions nappes-rivières. Concernant les échanges nappes-rivière, la partie du modèle représentant le bassin du Triffoy a fait l'objet d'une attention particulière lors de la calibration. Les résultats obtenus par la modélisation ont, de cette manière, reproduit les apports d'eau souterraine observés entre les différentes stations de jaugeage installées le long du cours d'eau (Figure 4-3). Les travaux de calibration réalisés en régime transitoire ont permis de reproduire les fluctuations temporelles de la piézométrie et des débits de base telles qu'observées sur le terrain.

Figure 4-3. Comparaison des débits de base mesurés aux stations limnimétriques et dans les galeries drainantes du bassin du Hoyoux avec les valeurs calculées par le modèle.

Ce modèle devait ensuite être utilisé pour reproduire les tendances sur le long terme des concentrations en nitrate observées dans les eaux souterraines mais également les fluctuations saisonnières des concentrations en nitrate observées dans la nappe et le débit de base. Différents scénarii d'intrants nitrate, fournis par le modèle EPIC-GRID, devaient être simulés afin d'évaluer l'évolution des concentrations en nitrate dans les eaux souterraines et leur influence sur la qualité des eaux de surface. Cependant, suite à des difficultés numériques et par manque de temps et de ressources humaines en fin de convention, le travail n'a pas pu être complétement finalisé. Le modèle « local » est cependant disponible et pourra ultérieurement être rendu fonctionnel moyennant l'obtention des ressources nécessaires pour y parvenir.

5 Conclusions et perspectives

5.1 Principaux apports du projet

Au cours des 39 mois sur lesquels s'est déroulé le projet, un grand nombre d'investigations ont été menées sur le terrain, permettant de collecter de nombreuses données qui, par les traitements qui leur ont été appliqués, ont permis des avancées significatives en matière de compréhension et quantification des mécanismes d'interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface (principalement les cours d'eau). Les travaux ont également permis de proposer des outils et indicateurs utiles pour une évaluation objective de l'importance de ces interactions sur l'état et l'évolution de chacun de ces compartiments essentiels du cycle de l'eau en Wallonie.

Le Tableau 5-1 reprend l'ensemble des rapports techniques qui ont été produits dans le cadre du projet. Dans la foulée, les principaux acquis sont résumés.

N° délivrable	Intitulé	Lien web vers le rapport
D2.1	Mise à jour des données issues des bases de données	http://hdl.handle.net/2268/201152
D2.2	Rapport technique décrivant les résultats de la prospection géophysique ainsi que l'emplacement des forages	http://hdl.handle.net/2268/204856
D2.3	Rapport technique relatif au forage des piézomètres et micropiézomètres	http://hdl.handle.net/2268/201153
D2.4	Réseau et programme de monitoring mis en place sur les sites tests	http://hdl.handle.net/2268/201154
D3.1	Acquisition des données pour l'interprétation de la pression associée des prélèvements d'eau souterraine sur l'état et le fonctionnement écologique des cours d'eau	http://hdl.handle.net/2268/205247
D3.2	Rapport technique relatif à la réalisation des essais de traçage dans le continuum sol – zone non saturée – eau souterraine - rivière	http://hdl.handle.net/2268/201155
D3.3	Bilans hydrogéologiques	http://hdl.handle.net/2268/195407
D3.4	Caractérisation hydrochimique et campagne isotopique pour la discrimination des sources de pollution ponctuelles et diffuses du nitrate	http://hdl.handle.net/2268/201156
D3.5	Quantification des échanges nappe-rivière pour les bassins tests	http://hdl.handle.net/2268/195405
D4.1	Développement d'indicateurs des interactions entre eau souterraine et eau de surface	http://hdl.handle.net/2268/195406
D4.2	Modélisation agro-hydrologique des bassins versants du Triffoy et du	http://hdl.handle.net/2268/203893

	Hoyoux Amont	
D4.3	Amélioration du modèle mathématique développé pour la masse d'eau RWM021 dans le cadre de Synclin'EAU	http://hdl.handle.net/2268/201157

Tableau 5-1. Liste des rapports techniques (délivrables) qui ont été produits dans le cadre du projet et lien vers les versions électroniques (format pdf) de ces rapports.

5.1.1 Apports en matière de compréhension et quantification des interactions ESO-ESU en tant que telles

Sur le plan de l'étude des interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines, la convention a permis de mettre en œuvre et tester un panel très complet de méthodes d'investigations et d'essais visant à comprendre et mieux quantifier les flux d'eau et de matières échangés entre les nappes d'eau souterraine et les cours d'eau. Parce que cela en était l'objet premier et par le fait des cours d'eau étudiés (Triffoy et Hoyoux amont), ces travaux ont surtout porté sur le cas général de cours d'eau drainants, essentiellement de type alcalin. Grâce à ces informations et nouvelles connaissances, la partie du bassin du Hoyoux située dans la masse d'eau souterraine RWM021 dispose maintenant d'une caractérisation hydrologique complète, incluant les flux dans les eaux de surface, dans les eaux souterraines et à leurs interfaces. De manière plus générique, les travaux ont permis de proposer un modèle conceptuel détaillé décrivant le fonctionnement hydrologique de bassins versants de ce type (cf. chapitre 6.1 du délivrable D3.5).

Ces travaux ont fourni une base de données et informations qui ont été centralisés sous forme d'une géodatabase mise à disposition du Service Public de Wallonie et qui ont été à la base de tous les travaux d'interprétation et de production d'outils d'aide à la décision (cf. typologie et indicateurs Eso-ESU ci-dessous).

Au-delà de la mise en œuvre des techniques déployées sur le Hoyoux amont et le Triffoy, l'expérience pratique qui en a découlé a permis de fournir une discussion et des recommandations en vue de répéter des mesures et investigations de même type sur d'autres bassins versants (cf. chapitre 6.2 et 6.3 du délivrable D3.5).

5.1.2 Apports en matière de compréhension des mécanismes de pollution et de transfert des polluants dans les bassins versants

Sur ces aspects, la convention a apporté des avancées significatives sur deux points : (1) la dynamique du nitrate (NO_3^-) dans le continuum sol – zone non saturée – nappe – rivière et (2) des premiers éléments de différenciation des sources de pollution au nitrate (agricole vs urbain).

Les investigations menées sur le site expérimental d'Hodoumont et les campagnes d'échantillonnage et de monitoring des concentrations en nitrate dans les eaux souterraines et les eaux de surface ont permet de proposer le modèle de transfert suivant. Sur la base d'un cycle hydrologique annuel, il a été démontré que le Hoyoux et le Triffoy sont alimentés à quasi 90% par de l'eau souterraine. Dans les bassins étudiés, les nappes d'eau souterraine sont contaminées de manière assez généralisée à des niveaux proches (mais inférieurs) aux 25 mg/L NO_3^-. Pendant la période d'étiage, voire l'essentiel

de l'année, les eaux souterraines alimentent donc les cours d'eau avec une charge en nitrate similaire (des différences significatives n'ont pas été observées et il n'y a donc a priori pas de raison de penser qu'une certaine dénitrification a lieu dans la zone hyporhéique). Par contre, à la reprise de l'infiltration en hiver, on observe une nette augmentation des concentrations en nitrate dans les eaux souterraines, en particulier en crête de nappe. Celle-ci résulte du lessivage des résidus azotés des terres agricoles à la fin des cultures. Le temps de transfert sol – nappe est très court dans les calcaires carbonifères comme l'ont démontré les essais de traçage réalisés dans la zone non saturée à Hodoumont. Durant ces mêmes périodes hivernales, le débit de base des eaux souterraine vers les eaux de surface augmente de manière significative et on observe dans les cours d'eau une augmentation des concentrations en nitrate quasi synchrone avec celle observée dans l'eau souterraine. Lors des fortes précipitations hivernales, la composante de ruissellement s'active momentanément, contribuant alors à une augmentation prononcée du débit des cours d'eau et une dilution des concentrations en nitrate (et de la plupart des éléments majeurs) est observée. L'ensemble de ces mécanismes permet de décrire et d'expliquer la dynamique des concentrations en nitrate dans les cours d'eau au cours de l'année.

A une échelle plus régionale, les campagnes d'échantillonnage menées ont permis d'établir qu'une approche combinée hydrochimie – isotopie stable du nitrate ($\delta^{15}N$ et $\delta^{18}O$) et du bore ($\delta^{11}B$) croisée avec l'occupation du sol et une analyse multivariée permettait de dégager des tendances en matière d'origine du nitrate présent dans les eaux souterraines. Ces résultats ont cependant confirmé que les bassins versants étudiés sont avant tout impactés par du nitrate d'origine agricole à mixte.

5.1.3 Apports en matière de compréhension des mécanismes et d'outils d'évaluation de la qualité biologique des cours d'eau

Dans le cadre de la convention, plusieurs indicateurs biologiques ont été testés : les diatomées, généralement sensibles à la qualité physico-chimique de l'eau, et les macro-invertébrés benthiques, également sensibles aux conditions morpho-dynamiques. L'approche privilégiée dans le projet a été d'examiner les communautés non seulement au niveau de leur diversité taxonomique, mais aussi au niveau fonctionnel, via les traits biologiques et écologiques des espèces. Cette approche permet de mieux cerner les facteurs qui influencent la qualité biologique des cours d'eau et d'établir dans quelle mesure l'eau souterraine est susceptible d'affecter cet état soit par sa composante quantitative, soit par sa qualité physico-chimique. De ces investigations, il ressort avant tout que le nitrate ne semble pas, dans l'état actuel des connaissances, constituer un facteur dégradant de la qualité biologique des cours d'eau. Par contre, la perturbation du régime hydrique des cours d'eau, affecté par des pertes et les captages, est effectivement susceptible d'avoir un impact sur les communautés benthiques, via la réduction des vitesses s'écoulement et la modification de la nature des fonds et des habitats des cours d'eau.

De manière plus générale, le monitoring et les mesures hydrochimiques menées sur les cours d'eau (en particulier le Triffoy) ont permis de confirmer le caractère très alcalin de ces rivières (avec des eaux sursaturées en carbonate en sortie de bassin, contribuant à expliquer l'existence des barrages

de travertins biologiques que l'on retrouve en particulier sur le Triffoy juste avant sa convergence avec le Hoyoux et sur le Hoyoux.

5.1.4 Apports en matière d'outils quantitatifs (indicateurs, modèles…)

Sur le plan d'outils quantitatifs, l'apport principal de la convention est d'avoir établi une série d'indicateurs qui permettent de relativiser l'importance des interactions nappe – rivière sur le comportement respectif de chacun de ces compartiments, ainsi que des indicateurs qui permettent de quantifier l'impact potentiel de pressions telles que les prélèvements par captage sur le comportement global de l'eau dans le bassin versant. Ces indicateurs ont également permis de proposer une typologie des bassins versants en fonction de leurs combinaisons, permettant de définir une série de cas de figures auxquels des problèmes spécifiques de gestion quantitative ou qualitative des eaux peuvent être identifiés. Des méthodes ont été proposées pour le calcul des indicateurs proposés à partir de mesures effectuées dans les bassins versants et ces calculs ont été appliqués à titre illustratif sur les bassins versants du Hoyoux amont et du Triffoy.

A côté de cela, des travaux ont également été menés en matière de modélisation des flux d'eau et de matières dans les bassins versants étudiés. Une modélisation EPIC-GRID a été réalisée sur base de données spécifiquement collectées dans les bassins étudiés, permettant en particulier de s'intéresser au calcul des APLs (Azote Potentiellement Lessivable). Ces résultats sont utiles puisque cet azote résiduel est précisément celui qui conduit aux augmentations de concentrations en nitrate dans les eaux souterraines et les cours d'eau telles qu'observées en hiver tant dans le Hoyoux amont que le Triffoy. Ils confirment que les plans de gestion de l'azote qui visent à contrôler ces APLs, voireà les réduire, sont nécessaires si l'on veut à terme diminuer la pression nitrate sur les eaux souterraines et les cours d'eau.

Un important travail de modélisation a également été mené en vue d'extraire un modèle local « Hoyoux Amont » du modèle régional qui avait été développé pour la masse d'eau souterraine RWM021 dans le cadre du projet Synclin'EAU. Ce modèle a été amélioré en tenant compte des nouvelles informations et données collectées dans le cadre de la convention. Suite à quelques difficultés numériques et par manque de temps et de ressources humaines en fin de convention, le travail n'a pas pu être complétement finalisé. Le modèle « local » est cependant disponible et pourra ultérieurement être rendu fonctionnel moyennant l'obtention des ressources nécessaires pour y parvenir. Suite à ces difficultés, la convention n'a pas pu proposer d'outil d'analyse et de prédiction de tendance relatif à qualité eau souterraine et des eaux de surface à l'étiage. Malgré tout, les résultats obtenus sur les mécanismes de transfert du nitrate dans le continuum sol – nappe – rivière permettent maintenant de bien comprendre la variabilité temporelle des concentrations en nitrate dans ces différents compartiments, en particulier au sein des cours d'eau.

5.1.5 Contributions du projet à des travaux externes et des communications

La convention a également contribué à toute une série d'activités périphériques qui ont bénéficié des travaux menés dans le cadre du projet ESO-ESU. Les principales sont reprises ci-dessous.

5.1.5.1 Contribution au Guidance document sur les GWAAE du GT Groundwater de la Commission Européenne

Suite à l'invitation de S.Brouyère par F.Delloye à une réunion du Groupe de Travail Groundwater de la Commission Européenne à Luxembourg les 5 et 6 octobre 2016, il a été proposé d'inclure un « case study » basé sur les travaux menés sur le Triffoy dans le cadre de la convention ESO-ESU dans le « Technical Report on Groundwater Associated Aquatic Ecosystems ». Celui-ci est le document guide officiel de la Commission Européenne visant à décrire ce que sont les écosystèmes aquatiques dépendant des eaux souterraines et fournit une série de bases scientifiques et techniques et de recommandations relatives à la prise en considérations de ces écosystèmes particuliers dans les plans de gestion des masses d'eau pour l'implémentation de la Directive Cadre Eau 2000/60. Il est à noter que seuls deux « case studies » ont alimenté ce rapport, dont celui sur le Triffoy.

5.1.5.2 Contributions à l'Atlas du Karst wallon : bassins du Hoyoux et de la Solières

De manière relativement synchrone au déroulement du projet ESO-ESU, la CWPESS a été chargée par le Service publique de Wallonie de faire un recensement actualisé et de rédiger la monographie relative aux phénomènes karstiques rencontrés dans les bassins du Hoyoux et de la Solières.

Outre une collaboration effective sur le terrain, les équipes du projet ESO-ESU ont contribué à la rédaction de cette monographie avec deux articles spécifiquement dédiés aux eaux souterraines du bassin du Hoyoux et aux interactions nappe - rivière dans le Triffoy et, indirectement, à un article sur la biodiversité dans les fonds de vallée du Triffoy. Les données bibliographiques relatives à ces contributions sont reprises ci-dessous.

- Briers P., Descy JP., Schmit F., Hallet V., Orban P. & Brouyère S., 2016, Le bassin du Triffoy et les eaux souterraines – Exemple de caractérisation des échanges entre nappe et rivière, Atlas du karst wallon : Bassins du Hoyoux et de la Solières, Commission Wallonne d'Etude et de Protection des Sites Souterrains, La Hulpe, SPW.
- Briers P, Jamin P., Ruthy I., Orban P. & Brouyère S., 2016, Hydrogéologie du bassin du Hoyoux, Atlas du karst wallon : Bassins du Hoyoux et de la Solières, Commission Wallonne d'Etude et de Protection des Sites Souterrains, La Hulpe, SPW.
- Bouxin G., Briers P., Michel G., 2016, Végétation du ruisseau du Triffoy et du Hoyoux près du moulin de Roiseux, Atlas du karst wallon : Bassins du Hoyoux et de la Solières, Commission Wallonne d'Etude et de Protection des Sites Souterrains, La Hulpe, SPW.

5.1.5.3 Collaborations avec le Contrat Rivière Meuse aval

Tout au long de la convention, des contacts étroits ont été assurés avec l'antenne locale de Marchin du Contrat Rivière Meuse aval. Le projet y a été présenté lors d'une séance (4/10/2013) et décrit dans le document de communication du Contrat Rivière (Meuse Info). Des collaborations ont été menées, avec en particulier, l'aide du Contrat Rivière pour la mise en place, puis le repli de la fibre optique qui avait été déployée sur deux kilomètres dans le lit du Triffoy.

5.1.5.4 Collaborations avec Nitrawal

Afin d'alimentaire le modèle EPICgrid avec des données aussi réalistes que possible, une collaboration avec Nitrawal avait été initiée. Nitrawal a ainsi collecté chez les agriculteurs de la zone d'étude un nombre très important de données sur plus de 500 parcelles. Les données collectées ont trait notamment aux successions culturales, aux fertilisations minérales et organiques (dates et types de fertilisants). Des analyses d'engrais de ferme, des analyses standard ainsi que des APL ont également été réalisés.

5.1.5.5 Publications et communications dans des colloques et congrès

Les résultats intermédiaires du projet ESO-ESU ont fait l'objet de diverses communications dans des colloques et conférences internationales. La liste des principales communications est reprise ci-dessous. D'autres communications sont en préparation.

- Briers, P., Schmit, F., Orban, P., Sohier, C., Degré, A., Hallet, V., Descy, J.-P., & Brouyère, S. (2016), *Nitrate dynamic and pathways in fractured limestone aquifers : From soil leaching to groundwater discharge in surface water*. Paper presented at 9th IAHS Conference on Groundwater Quality, Shenzhen, China, http://hdl.handle.net/2268/201192
- Briers, P., Sohier, C., Schmit, F., Hallet, V., Descy, J.-P., Orban, P., Degré, A., & Brouyère, S. (2014). *Characterization of stream - aquifer interaction in carbonate rocks*. Poster session presented at 1st TERENO International Conference 2014, Bonn, Allemagne. http://hdl.handle.net/2268/182935
- Brouyère, S., Briers, P. & Orban, P. (2016*), Stream-aquifer interactions: a combined field and methodology assessment in fractured carbonate catchments*, invited Talk à l'AGU Fall Meeting à San Francisco, 16 décembre 2016, http://hdl.handle.net/2268/205695

5.1.5.6 Journées de terrain, stages et mémoires réalisés en liaison avec le projet

Dans le cadre du projet ESO-ESU, plusieurs étudiants ont eu l'opportunité d'effectuer des activités de terrain et des stages, voire même leur mémoire en liaison avec les thématiques du projet (Tableau 5-2). De cette manière, la convention a également contribué à fournir des premières expériences pratiques et professionnelles à de futur(e)s jeunes diplômé(e)s qui pourraient ultérieurement se trouver confrontés à des études similaires dans leur parcours professionnel. Des journées de terrain ont également été régulièrement organisées dans le cadre de cours dispensés à l'Université de Liège.

Nom	Année	Intitulé	Type
Benjamin Louis	2015	Etude des interactions nappe rivière dans le sous bassin du Biron	TFE
Caroline Thomas	2016	Caractérisation des conditions hydrogéologiques et des sources de pollution au nitrate dans le bassin de Tailfer	TFE
Clémentine Dor	2016	Etude de la vulnérabilité au nitrate de la zone d'alimentation des captages du Néblon	TFE
Maud Libert	2014	Etude des interactions entre eaux de surface et eaux souterraines dans le bassin du Triffoy	TFE
Marie-Laure Saur	2014	Etude des interactions entre eaux de surface et eaux souterraines dans le bassin du Triffoy	Stage
GEOL0277	Chaque année	Cours « Qualité et protection des eaux souterraines » : journées de terrain dans le Triffoy	JTT

GEOL1031	Chaque année	Cours « Gestion quantitative et qualitative des eaux souterraines » : journée de terrain dans le Triffoy	JTT
GEOL1028	2014/2015	Cours « Site Investigation » projet et journées de terrain dans le Triffoy	JTT

Tableau 5-2. Principaux travaux d'étudiants réalisés en liaison avec le projet.

5.2 Mise en place d'un bassin pilote sur le Triffoy (= D4.5)

La dernière tâche qui était programmée dans le projet (Activité et Délivrable 4.5) consistait à pérenniser les réseaux de monitoring du projet pour pouvoir y mettre en place des observatoires de l'environnement, dans une optique d'amélioration des connaissances à moyen et à long terme. Cette tâche doit être réalisée en étroite collaboration avec la DGARNE, le rôle du contractant étant d'appuyer scientifiquement la mise en place du ou des bassin(s) pilote(s).

Sur base des données et des connaissances acquises durant le projet, il ressort que le bassin du Triffoy constitue un bassin très représentatif des interactions entre les eaux souterraines et de surface, avec le Triffoy qui entre dans la catégorie des cours d'eau de type alcalin, au sens de la classification retenue par le GT Groundwater de la Commission Européenne dans la note 'GWAEE'. A la suite, nous proposons donc un réseau de suivi « minimum » susceptible de permettre un suivi sur ce bassin en vue d'acquérir des données pertinentes et d'affiner les connaissances relatives à cette typologie ESO-ESU à moyen et à long terme.

Il est primordial d'obtenir les informations concernant les quantités d'eau entrant dans le bassin. Pour ce faire, la station météo doit être maintenue en place. Sa situation actuelle semble optimale, elle est localisée au centre du bassin dans un endroit dégagé et n'est pas à proximité directe de la route, ce qui limite les risques de vandalisme.

Ensuite, le suivi des débits de la rivière est bien évident essentiel. Un suivi sur 4 stations le long du cours d'eau ne semble toutefois pas être absolument nécessaire. En effet, les données ont montré qu'il existe très peu de variation de débit entre les stations de State et l'exutoire. Le maintien de la station à l'exutoire du bassin semble donc suffisant. En parallèle à cette station, le maintien de la station à Jamagne, qui correspond au début du secteur drainant, semble opportun. En effet, un suivi temporel à long terme des fluctuations du niveau d'eau à cette station permettrait de suivre les oscillations entre l'assèchement de la rivière et une réalimentation par la nappe.

Les résultats du projet ont toutefois clairement montré l'importance d'intégrer un monitoring de la conductivité électrique (au minimum) des eaux de la rivière dans le cadre du suivi des interactions nappe-rivière. Ce paramètre reflète directement la minéralisation de l'eau acquise durant son trajet dans le sous-sol et donc aussi les mélanges entre les composantes ESO et ESU dans la rivière. L'installation d'une sonde pressiométrique + conductivité électrique (de type CTD) est donc une nécessité pour le suivi des débits. A l'exutoire, un suivi de la qualité chimique des eaux souterraines apporterait également des informations précieuses à moyen et à long termes (substances exportées, évolutions de tendances relatives à la qualité ESO et ESU) …

En parallèle au suivi des débits de la rivière, le niveau des eaux souterraines doit également faire l'objet d'un monitoring. Le bassin du Triffoy fait déjà l'objet d'un monitoring piézométrique au niveau du Pz Evelette (suivi SPW par sonde pressiométrique) dans la partie amont du bassin et du piézomètre F1 CILE (suivi bi-mensuel par la CILE) à l'aval du bassin. Compléter ces informations par un suivi au centre du bassin du Triffoy sur le site expérimental d'Hodoumont semble donc opportun. Le piézomètre P1 est l'ouvrage qui présente la plus grande hauteur de crépine et semble donc le plus à même de faire l'objet d'un suivi du niveau d'eau. Il serait également intéressant de suivre sur le plus long terme la piézométrie au niveau de l'un ou l'autre micropiézomètre implanté en bordure du Triffoy. A côté de cela, il est nécessaire de pérenniser, voire même de compléter le site expérimental de Hodoumont qui fournit un dispositif unique pour mener de nouvelles investigations sur les eaux souterraines des calcaires carbonifères. Ce site pourrait également faire l'objet d'un suivi régulier de la qualité des eaux souterraines, en particulier grâce au piézomètre double crépine (P2) qui a déjà permis de mettre en évidence des évolutions contrastées de concentration en nitrate en fonction de la profondeur dans la nappe. Les autres piézomètres pourraient également faire l'objet de suivi plus poussés de la qualité chimique des eaux souterraines (y compris recherche de nouvelles substances).

La Figure 5-1 reprend l'essentiel du réseau de suivi qui est proposé pour le bassin du Triffoy.

Figure 5-1. Localisation des points de mesures du réseau de suivi proposé pour le monitoring à moyen et long terme dans le cadre de la mise en place d'un observatoire de l'environnement sur le bassin du Triffoy

5.3 Perspectives pour la transposition des résultats sur d'autres bassins

Partant des résultats et conclusions de la convention qui se termine, les perspectives proposées visent à identifier des priorités et à établir un premier canevas pour répliquer et généraliser les travaux sur d'autres masses d'eau ESO/ESU en Wallonie, tant dans l'optique de généraliser les méthodologies proposées (ex : dans le cas de bassins plus ruisselant, voire de cours d'eau partiellement perdant) que de consolider les liaisons amorcées entre l'état quantitatif et qualitatif des eaux souterraines et l'état quantitatif, qualitatif et biologique du cours d'eau. Ces perspectives sont décrites d'abord de manière générale tant sur le volet hydrologique / hydrogéologique que sur le volet qualité biologique, puis déclinées en 3 grandes activités qui portent à la fois sur un volet étude hydrogéologique / hydrologique de l'interaction nappe-rivière et sur la qualité biologique du cours d'eau.

De manière générale, l'objectif est de mener ces investigations sur au moins deux cycles hydrologiques, la convention en cours ayant montré que la variabilité interannuelle est loin d'être négligeable sur le bilan des flux d'eau et de matières et sur la distribution de ces flux entre les compartiments ESO-ESU. Sur cette même période, il pourra également être envisagé de reprendre les travaux de modélisation hydrogéologique et couplage hydro – agro en vue de finaliser le travail qui a été entamé mais pas finalisé pour les raisons évoquées au point 5.1.4.

5.3.1 Perspectives « Hydrogéologiques » suite à ESO-ESU

La présente convention a permis de mettre en œuvre et tester toute une panoplie d'outils et de méthodes d'investigations et de quantification des interactions ESO-ESU sur le terrain et de développer des moyens d'interprétation et de quantification de l'importance des interactions sur l'état quantitatif et qualitatif des ESO et des ESU. Les applications et illustrations qui ont pu être proposées se sont focalisées sur les bassins du Hoyoux amont et du Triffoy qui sont tous deux essentiellement caractéristiques de cours d'eau drainant de type alcalin. De manière quasi systématique, les résultats obtenus ont fait l'objet de tentatives de généralisation à d'autres contextes d'interactions nappe – rivière, en particulier dans le délivrable ***D3.5 Quantification des échanges nappe-rivière pour les bassins tests*** où le chapitre 6.3 revient sur les perspectives proposées pour élargir le champ d'application des études nappe-rivière à d'autres contextes et le délivrable ***D4.1 Développement d'indicateurs des interactions entre eaux souterraines et eau de surface*** où le chapitre 7.1 propose une approche théorique de typologie des bassins versants sur base de la combinaison des indicateurs proposés pour caractériser les interactions ESO-ESU. Sur ces aspects, les perspectives sont essentiellement de généraliser ces travaux et tester les outils développés sur des contextes différents, à savoir des bassins plus ruisselants et des cours d'eau moins drainants. L'idée de ne sera pas de répliquer l'intégralité du travail réalisé ici mais de cibler les éléments essentiels à l'image de ce qui est proposé au point 5.2 pour la continuation du monitoring sur le bassin du Triffoy.

5.3.2 Perspectives « Bio » suite à ESO-ESU

Sur le volet qualité biologique, le délivrable ***D3.1 Acquisition des données pour l'interprétation de la pression associée des prélèvements d'eau souterraine sur l'état et le fonctionnement écologique des cours d'eau*** propose également des pistes pour établir la liaison entre la qualité biologique et l'état quantitatif ou qualitatif du cours d'eau en liaison avec son interaction avec l'eau souterraine qui l'alimente. L'étude a révélé, comme on le soupçonnait au départ, que les bioindicateurs classiques de qualité de l'eau ne sont pas adaptés à la détection et à l'évaluation de perturbations liées à des altérations des cours d'eau dues à des interactions entre eaux souterraines et eaux de surface. Dans les systèmes étudiés dans ESO-ESU, ces interactions se traduisent par une modification de la qualité physico-chimique (principalement au niveau des concentrations en nitrate) et de la qualité hydro-morphologique (diminution de débit due à des pertes et/ou à des captages). Il apparaît qu'on ne dispose pas actuellement d'indicateurs de l'impact du nitrate sur les communautés aquatiques, du fait que les études sur l'impact de l'eutrophisation se sont focalisées sur le phosphore. Par contre, ESO-ESU a démontré la potentialité des traits biologiques et écologiques des macroinvertébrés benthiques pour révéler des changements de conditions hydro-morphologiques conduisant à des altérations de l'écoulement et de l'habitat.

Une perspective basée sur ces résultats est d'exploiter les données de monitoring de l'état écologique des cours d'eau engrangées dans les bases de données du SPW dans le cadre du RCS (réseau de contrôle de surveillance), destiné au suivi de l'évolution de l'état des masses d'eau. On pourrait, d'une part, rechercher une éventuelle relation entre la composition des assemblages de diatomées et la concentration en nitrate et d'autre part, identifier des situations où les communautés de macro-invertébrés présentent des anomalies (par exemple une faible diversité, induisant des valeurs faibles de l'indice biotique) alors que les qualités physico-chimique et chimique sont bonnes. L'objectif de cette dernière approche est de mettre en évidence des situations où c'est une hydro-morphologie perturbée – se traduisant par une modification des habitats, du débit et de l'écoulement - qui a un impact majeur sur les communautés benthiques. Une fois ces situations identifiées, il serait possible d'examiner dans quelle mesure les traits fonctionnels de ces communautés répondent aux altérations.

Il est à noter qu'une étude de l'impact des altérations hydro-morphologiques contribuerait à la détermination des « débits écologiques », qui devient cruciale suite aux prélèvements dans les nappes, au développement des petites unités hydro-électriques (micro-centrales) sur les cours d'eau, voire à la régulation du fonctionnement de barrages existants.

5.3.3 Principales activités proposées pour cette « suite ESO-ESU »

5.3.3.1 Activité 1 : valorisation des données et connaissances disponibles en Wallonie

L'objectif de cette tâche visera essentiellement à passer en revue les données hydrologiques, hydrogéologiques et qualité biologique disponibles au SPW (débits de cours d'eau, contextes géologiques et hydrogéologiques …) en vue de :

- identifier des bassins avec des comportements contrastés d'un point de vue régime hydrologique (bassins +/- infiltrant, +/- ruisselant, avec ou sans écoulement de base ou retour au cours d'eau…) et d'y dégager des premières tendances et une première classification typologique sur base des données disponibles et des outils qui viennent d'être développés ;
- réexaminer les données macroinvertébrés SPW sur base des traits biologiques et autres en vue de dégager des premières tendances quant à l'impact potentiel de l'interaction ESO-ESU sur cet état biologique ;
- sélectionner à l'issue de ce travail préparatoire quelques sous-bassins représentatifs de typologies contrastées ESO-ESU en vue d'y mettre en place des investigations complémentaires visant à mieux caractériser ces interactions.

5.3.3.2 Activité 2 : Monitoring des sous-bassins sélectionnés à l'issue de l'Activité 1

L'objectif de cette tâche sera d'acquérir des données plus précises sur les bassins sélectionnés au terme de l'Activité 1 par :

- La mise en place et suivi d'un réseau de monitoring hydrologique / hydrogéologique/ qualité (à l'image de ce qu'on propose au point 5.2).
- Des investigations complémentaires sur le volet qualité biologique visant à consolider / confirmer les résultats des réinterprétations menées durant l'Activité 1.

5.3.3.3 Activité 3 : Analyse et interprétation des données et reporting

L'objectif sera ici de répliquer les développements menés dans la présente convention et de tester / améliorer les méthodes et outils d'interprétation à ces nouveaux contextes d'interactions ESO-ESU.

Bibliographie

Brouyère, S. (2001). Etude et modélisation du transport et du piégeage des solutés en milieu souterrain variablement saturé. Evaluation des paramètres hydrodispersifs par la réalisation et l'interprétation d'essais de traçage in situ. Unpublished doctoral thesis, Université de Liège, Sart Tilman, Belgique. http://hdl.handle.net/2268/40804

Brouyère, S., Dassargues, A., & Hallet, V. (2004). Migration of contaminants through the unsaturated zone overlying the Hesbaye chalky aquifer in Belgium: a field investigation. Journal of Contaminant Hydrology, 72(1-4), 135-164. http://hdl.handle.net/2268/2335

Brouyère, S., Orban, P., Lorenzini, G., & Dassargues, A. (2007). Caractérisation hydrogéologique et support à la mise en oeuvre de la Directive Européenne 2000/60 sur les masses d'eau souterraine en Région Wallonne - Délivrable 6.0 - Note méthodologique relative à la modélisation hydrogéologique des masses d'eau souterraine RWM011, RWM012 et RWM021 (aspects quantitatifs et qualitatifs). Service Public de Wallonie. http://hdl.handle.net/2268/151391

Orban, P., Brouyère, S., Lorenzini, G., & Dassargues, A. (2008). Caractérisation hydrogéologique et support à la mise en oeuvre de la Directive Européenne 2000/60 sur les masses d'eau souterraine en Région Wallonne - Delivrable 6.1 - Description du modèle conceptuel des trois masses d'eau souterraine RWM011, RWM012 et RWM021 concernées par les activités du WP6. Service public de Wallonie. http://hdl.handle.net/2268/151392

Brouyère, S., Orban, P., Wildemeersch, S., Couturier, J., Gardin, N., & Dassargues, A. (2009). The Hybrid Finite Element Mixing Cell Method: A New Flexible Method for Modelling Mine Ground Water Problems. Mine Water & the Environment, 28(2), 102-114. http://hdl.handle.net/2268/10014

Orban, P., Brouyère, S., Batlle-Aguilar, J., Couturier, J., Goderniaux, P., Leroy, M., Maloszewski, P., & Dassargues, A. (2010b). Regional transport modelling for nitrate trend assessment and forecasting in a chalk aquifer. Journal of Contaminant Hydrology, 118, 79-93. http://hdl.handle.net/2268/72330

Orban, P., Brouyère, S., Leroy, M., Couturier, J., & Dassargues, A. (2010b). Caractérisation hydrogéologique et support à la mise en oeuvre de la Directive Européenne 2000/60 sur les masses d'eau souterraine en Région Wallonne - Deliverable 6.2 - Travaux de calibration et validation des modèles d'écoulement et de transport de solutés développés pour les trois masses d'eau souterraine RWM011, RWM012 et RWM021. Service Public de Wallonie. http://hdl.handle.net/2268/151393

Brouyère, S., Orban, P., Leroy, M., Couturier, J., & Dassargues, A. (2011). Caractérisation hydrogéologique et support à la mise en oeuvre de la Directive Européenne 2000/60 sur les masses d'eau souterraine en Région Wallonne - Delivrable 6.3 - Travaux de valorisation

complémentaire des modèles d'écoulement et de transport de solutés développés pour les masses d'eau souterraine RWM011, RWM012 et RWM021. Service Public de Wallonie. http://hdl.handle.net/2268/151397

Sohier, C., 2011, Développement d'un modèle hydrologique sol et zone vadose afin d'évaluer l'impact des pollutions diffuses et des mesures d'atténuation sur la qualité des eaux en Région wallonne (thèse de doctorat). Université de Liège – Gembloux Agro-Bio Tech, 338 p., 30 tabl., 146 fig. http://hdl.handle.net/2268/86912

Thomas, C., 2016, Caractérisation des conditions hydrogéologiques et des sources de pollution au nitrate dans le bassin de Tailfer, Mémoire pour l'obtention du Master en Sciences Géologiques, Université de Liège, Faculté des Sciences, 61p.