

## AQUIFERE CRAYEUX DE HESBAYE

Philippe Orban <sup>(1)</sup>, Serge Brouyère <sup>(1)</sup>, Jean-Michel Compère <sup>(2)</sup>, Simon Six <sup>(3)</sup>, Vincent Hallet <sup>(4)</sup>, Pascal Goderniaux <sup>(5)</sup>, Alain Dassargues <sup>(1)</sup>

(1) Université de Liège, Département ArGENCo, GEO<sup>3</sup>, Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement, Chemin des Chevreuils, 1, B52/3 Sart-Tilman, B-4000 Liège.

(2) Département de la Protection des captages, Compagnie Intercommunale Liégeoise des Eaux, Rue du Canal de l'Ourthe, 8, B-4031 Angleur.

(3) De Watergroep, afdeling Winning en Leefmilieu, Vooruitgangstraat, 189, B-1030 Brussel.

(4) Université de Namur, Département de Géologie, Rue de Bruxelles, 61, B-5000 Namur.

(5) Université de Mons, Faculté Polytechnique, Géologie Fondamentale et Appliquée, Rue de Houdain, 9, B-7000 Mons.

[p.orban@ulg.ac.be](mailto:p.orban@ulg.ac.be), [serge.brouyere@ulg.ac.be](mailto:serge.brouyere@ulg.ac.be), [jean-michel.compere@cile.be](mailto:jean-michel.compere@cile.be), [simon.six@watergroep.be](mailto:simon.six@watergroep.be), [vincent.hallet@unamur.be](mailto:vincent.hallet@unamur.be), [pascal.goderniaux@umons.ac.be](mailto:pascal.goderniaux@umons.ac.be), [alain.dassargues@ulg.ac.be](mailto:alain.dassargues@ulg.ac.be).

### INTRODUCTION

L'aquifère crayeux de Hesbaye est un aquifère transrégional exploité tant en Région wallonne (masse d'eau souterraine RWM040) que flamande (masse d'eau souterraine BLKS\_1100\_GWL\_1M)

(Fig. 1). L'aquifère décrit dans ce chapitre est principalement étudié et connu dans sa partie libre située au sud du bassin du Geer. Néanmoins, quelques informations seront également données sur la partie captive de l'aquifère située principalement en Région flamande.

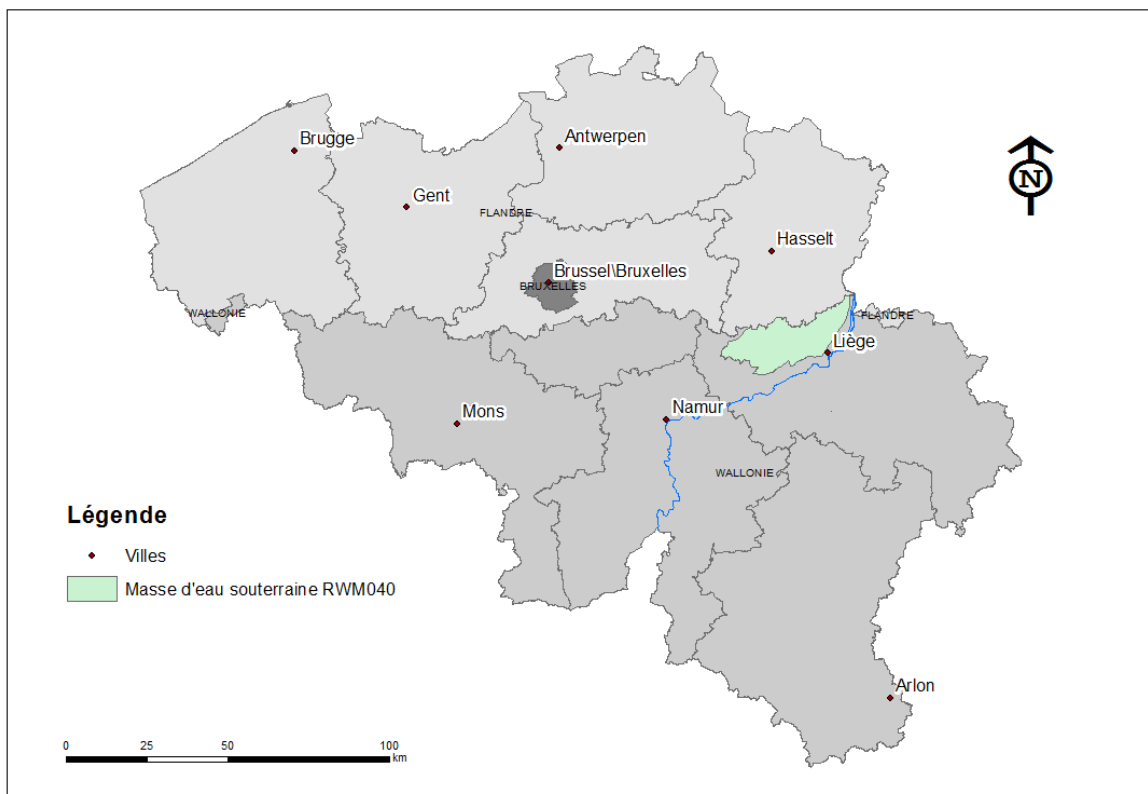


Figure 1 – Localisation de la masse d'eau souterraine RWM040 « Craies du bassin du Geer ».

## CADRE GEOGRAPHIQUE

L'aquifère crayeux de Hesbaye est situé au nord-ouest de la ville de Liège (Fig. 2). La partie libre de l'aquifère couvre la partie orientale du plateau hesbignon sur une superficie d'environ 350 km<sup>2</sup>. Cette partie libre de l'aquifère est limitée par la vallée de la Meuse au sud et à l'est, par le bassin de la Meuse au sud et à l'est, par le bassin de la Meuse à l'ouest et par le Geer au nord. Au nord du Geer, l'aquifère se prolonge mais devient captif sous les formations du Cénozoïque (Tertiaire). Le plateau hesbignon présente une surface topographique en pente douce vers le NNO dont l'altitude est comprise entre 206 m au SO et 80 m au NE.

Le réseau hydrographique actif en interaction avec la nappe aquifère de Hesbaye est très peu dense (Fig. 2) et est principalement composé du Geer, du Roua et de la Yerne. Cette faible densité du réseau de drainage actif justifie le nom de Hesbaye sèche. Par contre un important réseau fossile de vallées aujourd'hui sèches de directions générales S-N, SO-NE et SE-NO, conduit à un relief très typique, constitué d'une succession de crêtes et de dépressions largement arrondies (Hallet, 1998).

Les activités agricoles occupent 68,5 % de la superficie de la masse d'eau, réparties respectivement entre cultures pour 86 % et prairies pour 14 % (SPW-DGO 3, 2010). L'habitat, essentiellement rural, représente seulement 9 % de la superficie du territoire (Photo 1).

## CADRE GEOLOGIQUE

La géologie de Hesbaye (Fig. 3) est caractérisée par des terrains du Mésozoïque et du Cénozoïque, faiblement inclinés de quelques degrés vers le nord et reposant en discordance sur le socle autochtone du Paléozoïque. Ce dernier, plissé lors de l'orogénèse varisque, a ensuite été pénéplané. Par la suite, la mer crétacée a transgressé rapidement, depuis le NE en direction du SO, déposant des formations argilo-marneuses à la base, carbonatées ensuite.

Sous le plateau de Hesbaye, le socle paléozoïque pénéplané (pénéplaine post-varisque) est affecté de failles de rejets d'importances diverses. La plus importante est la faille d'Horion-Hozémont dont la localisation est reprise à la figure 3.

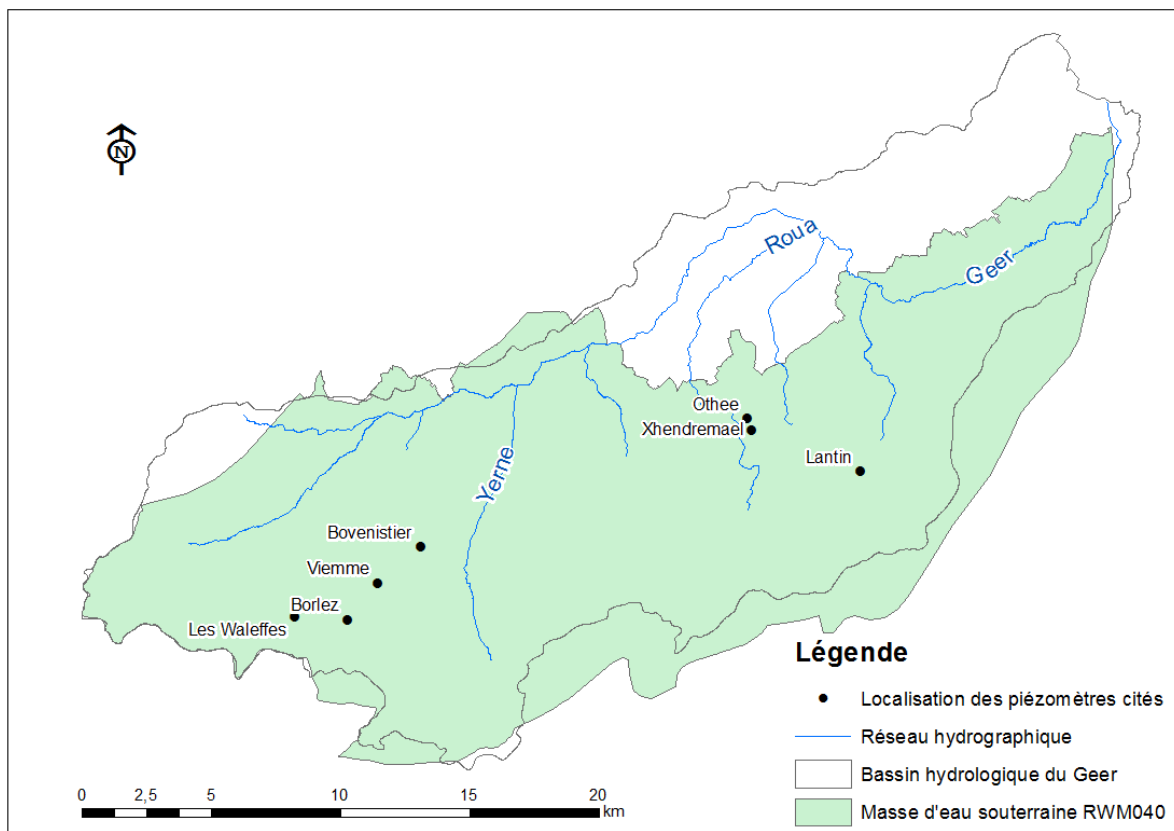


Figure 2 – Réseau hydrographique, bassin versant et localisation des ouvrages dans ce chapitre.



Photo 1 – Vue du plateau de Hesbaye à proximité de Waremme.

En Hesbaye, les formations géologiques reposant sur le socle paléozoïque sont inclinées de quelques pourcent vers le NNE. Elles sont généralement décrites de la manière suivante, de bas en haut (parmi d'autres, Hallet, 1998 ; Ruthy & Dassargues, 2010) (Fig. 4) :

- La Smectite de Herve (Cp2 Campanien inférieur, actuellement Formation de Vaals) consistant en un matériau marneux glauconieux renfermant 20 à 35 % de  $\text{CaCO}_3$  ou une argile schistoïde, de teinte verte, gris vert ou gris foncé. La base est fréquemment soulignée par un fin conglomérat à cailloux arrondis de quartz, quartzite, grès, schistes ou encore de calcaires.
- L'Horizon de Loën (Cp3a) composé de craie glauconifère, d'épaisseur généralement métrique ;
- La craie blanche du Campanien supérieur (Cp3b-c, actuellement Formation de Gulpen) définie comme craie blanche ou craie inférieure, elle se présente en bancs réguliers, et totalise en moyenne une vingtaine de mètres d'épaisseur, soit, dans l'ensemble, les deux tiers de la puissance globale des craies dans la région.
- Le Hardground dit Horizon de Froidmont est un niveau induré d'extension régionale qui souligne une lacune sédimentaire importante entre le Campanien et le Maastrichtien (Calembert, 1953, 1958).
- Les craies grises et tigrées, dites craies supérieures (Maastrichtien), craies marneuses soulignées par des bancs subcontinus de silex totalisant en moyenne, dans la partie centrale de la nappe, dix à quinze mètres d'épaisseur. Elles sont affectées par des phénomènes de détente et d'altération engendrant des fissures et des diaclases ouvertes qui correspondront à des zones de grande perméabilité.
- Les tuffeaux ou calcarénites à gros bancs de silex qui ont subi d'intenses phénomènes d'altération superficielle, conduisant à leur dissolution et, corollairement, à la formation de ravines et d'entonnoirs karstiques, de niveaux phosphatés,

autrefois localement exploités et d'un conglomérat résiduel à silex, recouvrant les dépôts crétacés.

- Les formations du Paléogène datent de l'Oligocène et sont constituées par des dépôts tongriens (Tg1) et des dépôts supérieurs continentaux. Les premiers sont formés de sables fins micacés et localement de lits d'argile verte. Les seconds sont constitués de sables graveleux feldspathiques avec des amas de cailloux, de grès blanc et de glaises plastiques.
- Les limons éoliens (loess) recouvrant la totalité du plateau de Hesbaye, d'épaisseur comprise entre deux mètres et une vingtaine de mètres. Ce loess, d'origine nivéo-éolienne (glaciation Würm) joue le rôle de filtre pour l'alimentation de la nappe sous-jacente.

## CADRE HYDROGEOLOGIQUE

L'aquifère de Hesbaye est logé dans les formations crayeuses du Campanien supérieur, du Maastrichtien et le conglomérat à silex. Cet aquifère est limité à sa base par la smectite de Herve. Au niveau du Plateau de Hesbaye, dans la partie sud du bassin du Geer, l'aquifère est libre. Près du Geer, l'aquifère devient semi-confiné sous les dépôts limoneux et argileux. Au nord, l'aquifère est captif sous les formations du Cénozoïque.

Le hardground, niveau induré d'extension régionale, intervient dans la dynamique de l'écoulement (Dassargues & Monjoie, 1993). Sa faible conductivité hydraulique (de l'ordre de  $2 \cdot 10^{-5}$  m/s) peut générer une discontinuité entre la nappe qui est logée dans la craie inférieure d'âge campanien et celle de la craie supérieure d'âge maastrichtien. Par contre, les fracturations qui l'affectent conduisent, localement, à des circulations de l'eau entre ces deux niveaux de craie.

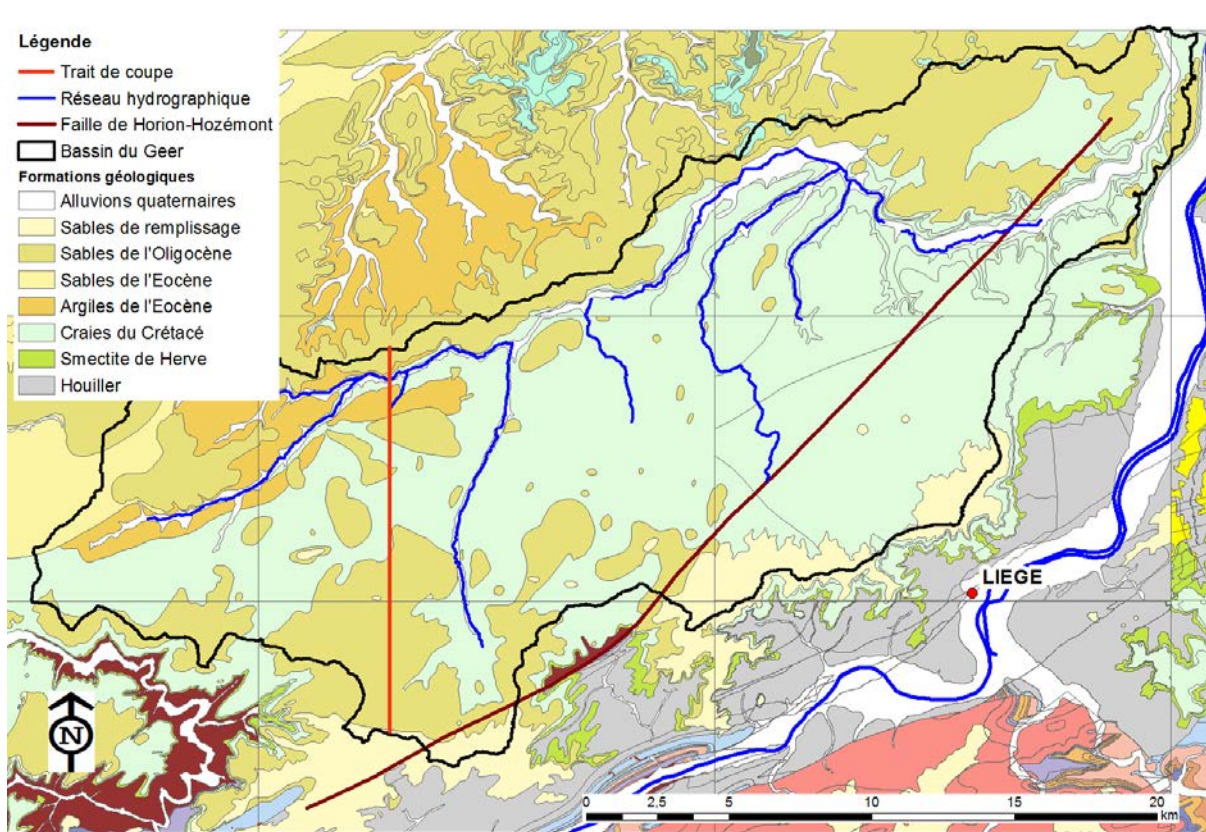


Figure 3 – Carte géologique de la zone des craies de Hesbaye. Comme dans la plupart des cartes géologiques, les loess ne sont pas représentés. Pour plus de lisibilité, seules les formations affleurant dans ou sur le pourtour du bassin sont reprises dans la légende (source : Carte hydrogéologique de Wallonie).

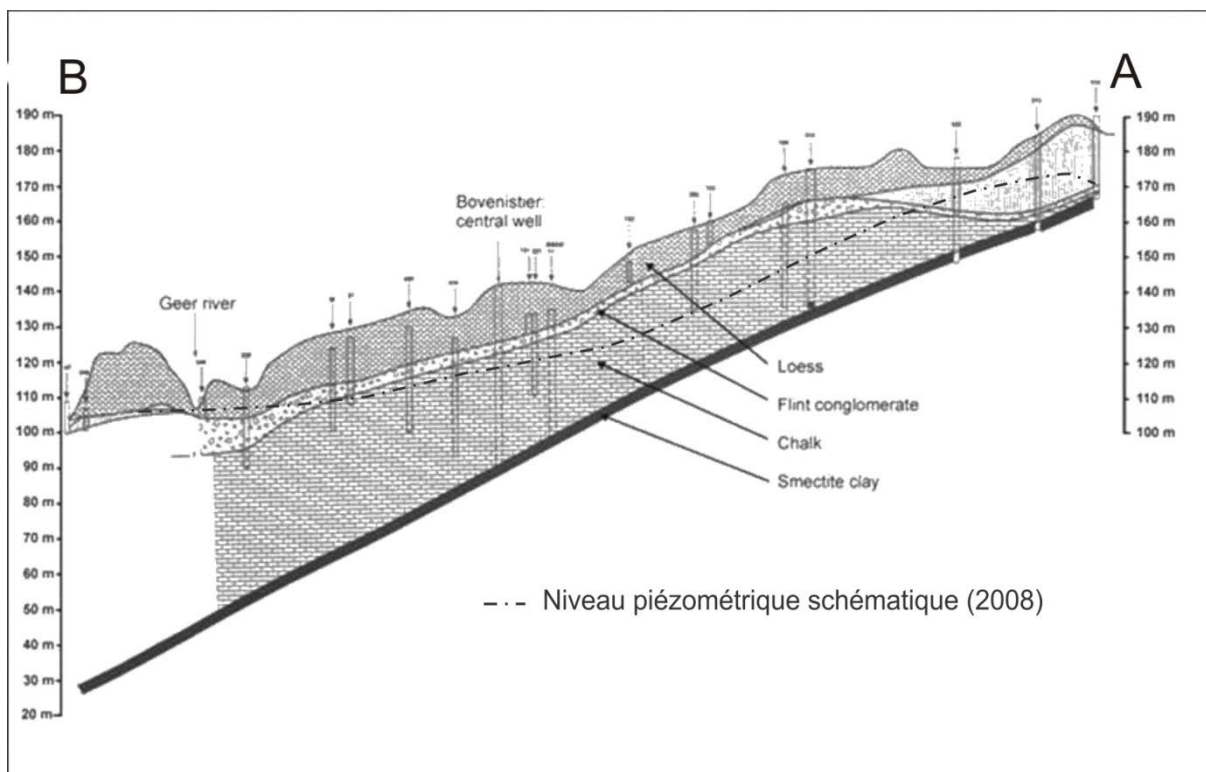


Figure 4 – Coupe schématique du bassin du Geer (modifiée d'après Dassargues *et al.*, 1989 ; Brouyère *et al.*, 2004).

La couverture limoneuse, dont l'épaisseur peut atteindre une vingtaine de mètres, joue un rôle de filtre pour les aquifères sous-jacents. Pour l'aquifère des craies de Hesbaye, une vitesse moyenne d'infiltration, dans la zone partiellement saturée de l'ordre de un mètre par an a été observée (Hallet, 1998). Par contre, la nappe aquifère réagit aux précipitations, par transfert de pression, avec un délai de l'ordre de 6 à 18 mois.

**Données quantitatives**

**Exploitation de l'aquifère** L'aquifère de Hesbaye est de première importance pour l'approvisionnement en eau, notamment de la région liégeoise. Trois compagnies de distribution d'eau y captent de l'eau souterraine, la Compagnie Intercommunale Liégeoise des Eaux (CILE) et la Société Wallonne des Eaux (SWDE) en Wallonie et De Watergroep en Flandre.

La CILE exploite un réseau de galeries drainantes d'environ 45 km creusées dans la craie qui permettent de produire entre  $15.10^6$  et  $20.10^6$  m<sup>3</sup> par an. Ces galeries sont organisées en deux réseaux, la galerie sud d'une profondeur d'approximativement 30 m et la galerie nord d'une profondeur d'approximativement 60 m qui drainent respectivement la partie superficielle et la partie profonde de l'aquifère (Hodiaumont *et al.*, 1999). La SWDE et de Watergroep exploitent différents puits situés principalement dans le nord du bassin ou dans la partie captive de la nappe.

En 2003, environ  $24.10^6$  m<sup>3</sup> ont été extraits de l'aquifère crayeux du bassin du Geer (Fig. 5). Environ  $5.10^6$  m<sup>3</sup> sont également prélevés dans la partie captive de l'aquifère chaque année. Selon le SPW-DGO 3 (2010), l'eau souterraine prélevée dans la masse d'eau souterraine RWM040 est principalement utilisée pour l'approvisionnement en eau potable ( $\pm 87\%$ ), le secteur industriel ( $\pm 7\%$ ) et le secteur agro-alimentaire ( $\pm 4\%$ ) (Fig. 6).

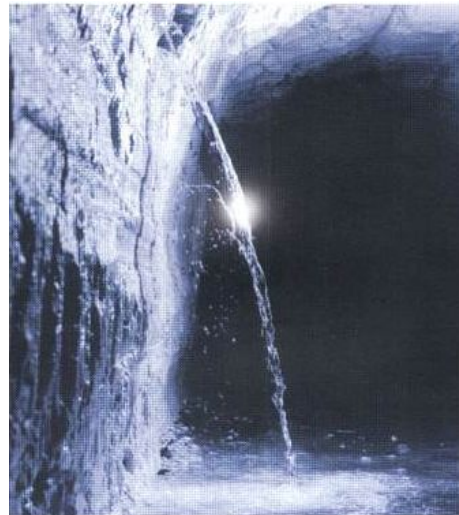


Photo 2 – Ecoulement dans une galerie de captage de la CILE en Hesbaye.

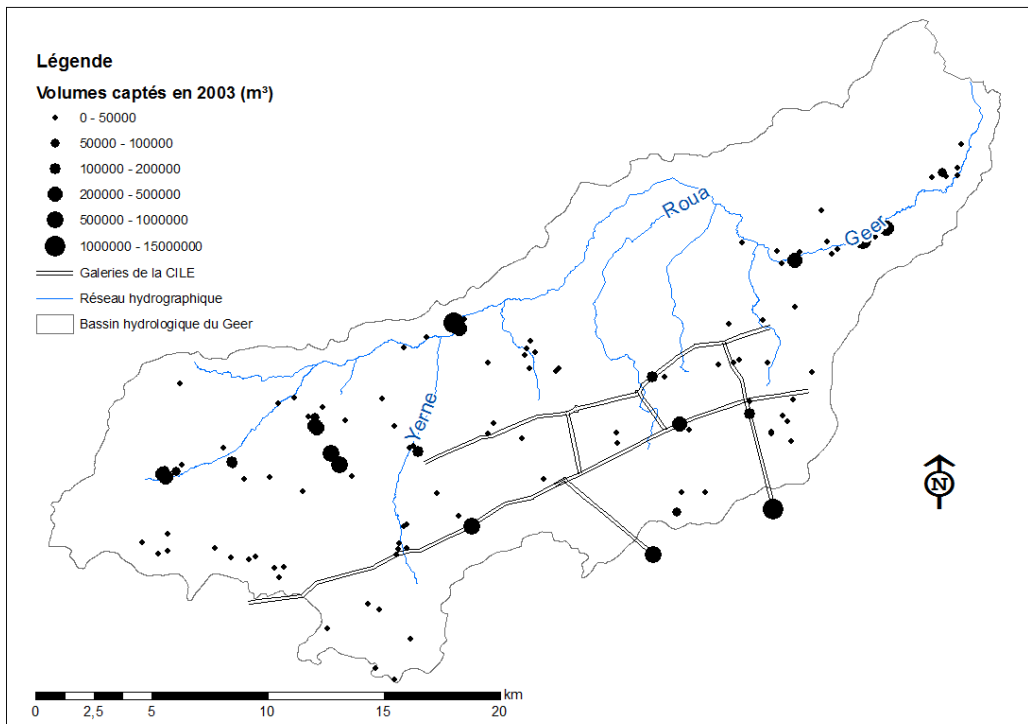


Figure 5 – Volumes prélevés en 2003 dans l'aquifère des craies du bassin du Geer. Les deux points situés en dehors du bassin représentent les volumes captés dans les galeries et exportés dans les réservoirs de Ans et Hollogne.

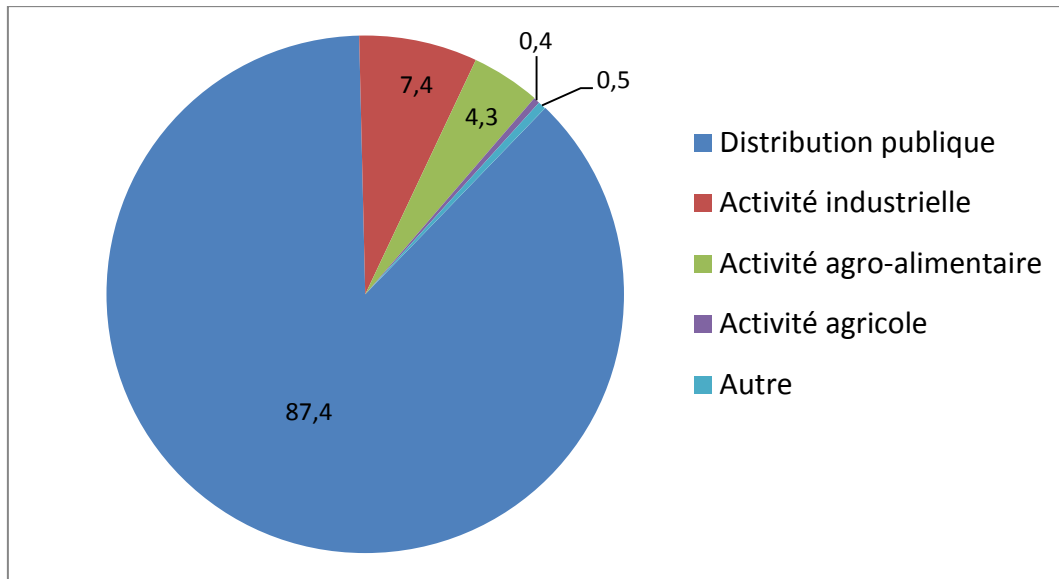


Figure 6 – Répartition des usages de l'eau prélevée dans la masse d'eau souterraine RWM040 en 2004 (SPW-DGO 3, 2010).

**Piézométrie – Allure piézométrique de la nappe** En raison de l'allure géométrique des couches de craies (bancs réguliers d'orientation est-ouest, à légère pente vers le nord) et de la disposition des limites du bassin (Meuse, Meuse, Meuse, Geer), la nappe du Crétacé de Hesbaye s'écoule globalement du sud vers le nord en direction du Geer, exutoire principal de la nappe.

Le nombre important d'ouvrages existants crépinés dans l'aquifère de Hesbaye a permis de dresser différentes cartes piézométriques. La dernière carte régionale a été dressée sur base de mesures effectuées entre janvier et avril 2008 (Fig. 7) (Orban, 2008 ; Ruthy & Dassargues, 2009).

Les cartes piézométriques ont permis de mettre en évidence différentes anomalies dans la piézométrie traduisant l'effet drainant de la faille d'Horion-Hozémont ou la présence de zones d'écoulements préférentiels au droit des vallées sèches. La surface piézométrique présente un gradient piézométrique élevé de l'ordre de 1 % en amont des galeries de captage exploitées par la CILE. A l'aval, le gradient est d'environ 0,5 %. En ce qui concerne les interactions avec les eaux de surface, on constate que la surface piézométrique est relativement peu influencée par le tracé du Geer et de la Yerne, sauf en aval pour le Geer et plutôt en amont pour la Yerne, zones où ils sont drainants.

Au nord-est, la carte piézométrique de 2008 met en évidence la présence d'un dôme

piézométrique dans la zone située à l'est de Tongres. Au sud de ce dôme, localement, les eaux souterraines s'écoulent donc du nord vers le sud pour alimenter le Geer. L'incurvation des isopièzes autour du Geer met en évidence l'importance du drainage de la nappe par le Geer dans cette zone. Les isopièzes 65 et 70 m, esquissées à proximité de l'exutoire du bassin versant sembleraient indiquer que le Geer ne resterait pas drainant jusqu'à son extrémité aval.

A l'échelle de la Hesbaye, les limites du bassin hydrogéologique au sud, à l'ouest et à l'est sont proches des limites du bassin hydrologique du Geer. Par contre, la frontière nord du bassin hydrologique du bassin du Geer ne correspond pas à une frontière hydrogéologique. Des flux importants d'eau souterraine quittent le bassin hydrographique du Geer au travers de cette frontière. Les fluctuations piézométriques associées au pendage des couches de craies de quelques pourcents vers le nord et à la topographie (Fig. 8) ont pour effet de modifier la limite hydrogéologique dans la partie sud de la Hesbaye. En période « normale » de tarissement, la crête hydrogéologique méridionale a tendance à se déplacer, dans un premier temps, vers le nord. En période de sécheresse prolongée (comme en 1951), le niveau piézométrique baissant fortement, la craie est pratiquement désaturée dans cette zone. Le gradient piézométrique dans cette zone finit par s'inverser et la limite d'affleurement de la smectite de Herve devient la limite hydrogéologique du bassin (Fig. 8).

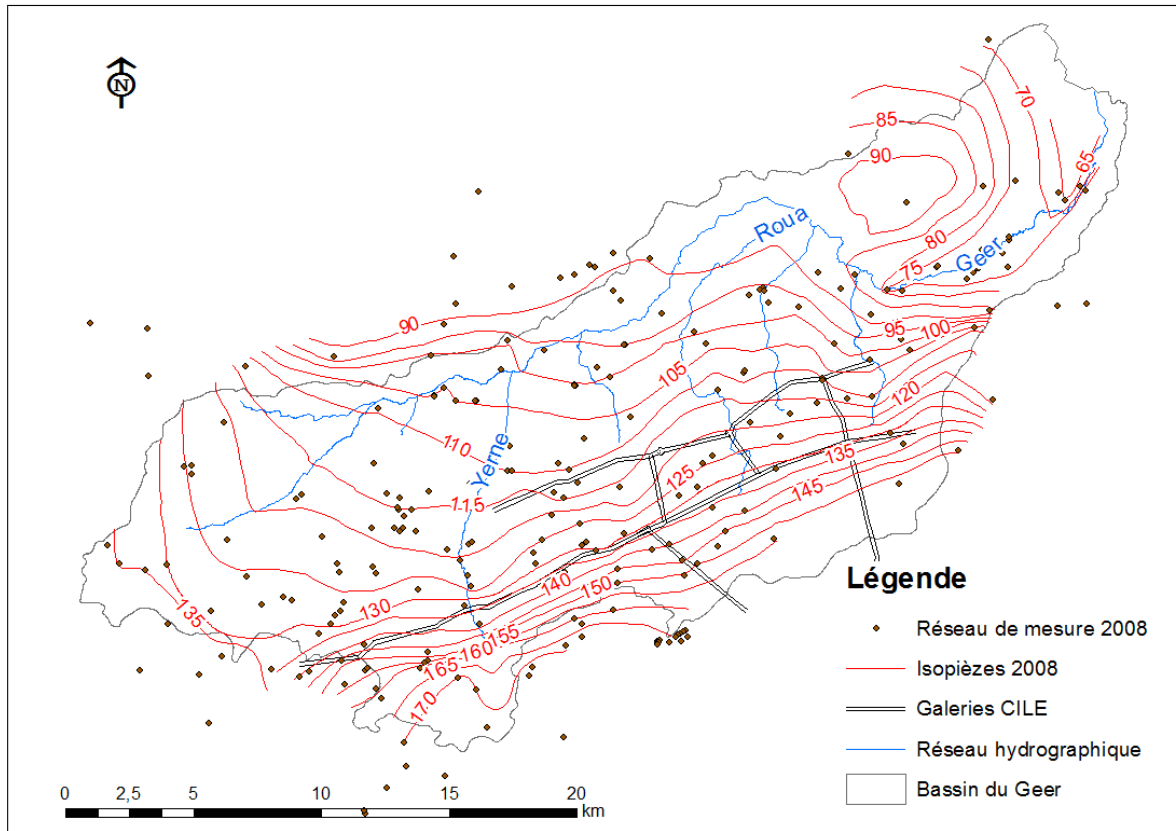


Figure 7 – Carte piézométrique de l'aquifère de Hesbaye dressée sur base des mesures effectuées de janvier à avril 2008 (Orban et al., 2008 ; Ruthy et Dassargues, 2009).

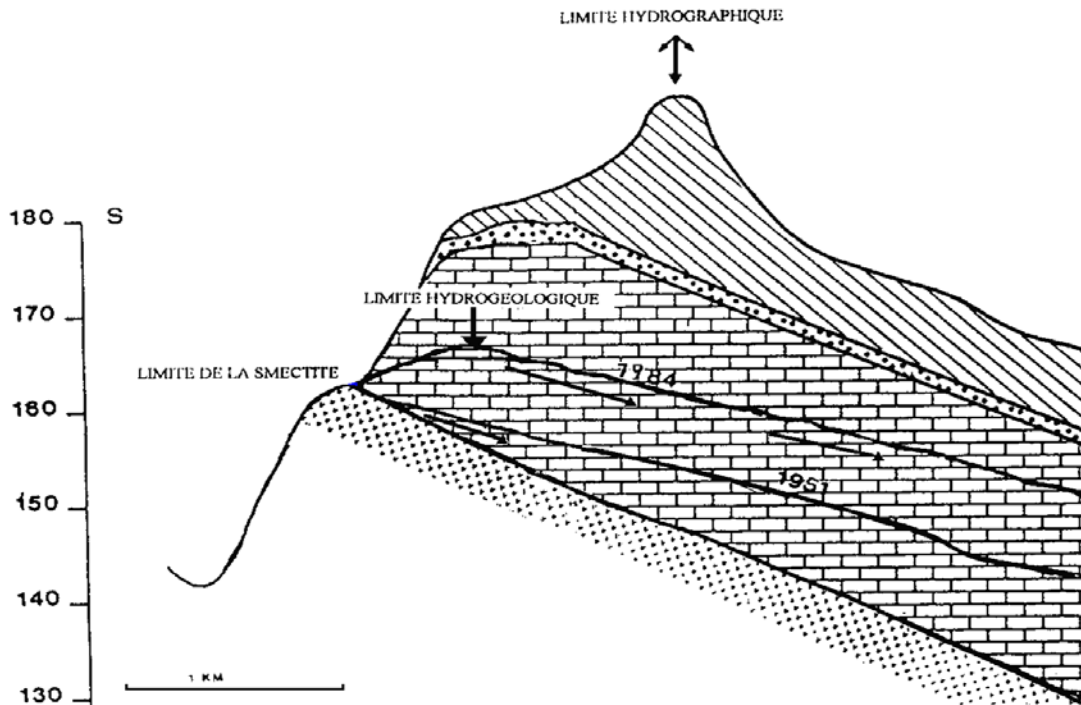


Figure 8 – Limite hydrographique et limite hydrogéologique de la nappe des craies de Hesbaye (Hallet, 1998).

### Piézométrie – Evolution temporelle de la piézométrie

L'évolution temporelle de la piézométrie est suivie dans différents piézomètres parfois depuis 1951 (Fig. 9). Dans certains ouvrages, l'amplitude des variations multi-annuelles piézométriques peut atteindre plus de 15 m. Cependant, sur base des de l'examen des données piézométriques, Hallet (1998) a montré que, sauf au droit des galeries et à proximité du Geer, la forme de la surface piézométrique restait relativement constante au cours du temps. Toute la surface piézométrique a tendance à se déplacer verticalement, sensiblement parallèlement à elle-même avec un gradient vers le Nord assez constant dans le temps. Hallet (1998) a également constaté et que l'amplitude des variations piézométriques était plus faible au nord du bassin où le Geer tend à réguler les niveaux piézométriques. Un délai de quelques semaines à une année et demie est observé entre les précipitations et leurs impacts sur les niveaux piézométriques. Même si les fluctuations des niveaux piézométriques sont importantes, aucune preuve d'une tendance temporelle à la hausse ou à la baisse de ces niveaux n'a pu être mise en évidence dans les chroniques de mesure.

**Bilan hydrogéologique** Deux bilans hydrogéologiques ont été calculés pour le bassin du Geer, respectivement pour les périodes 1951-1965 (Monjoie, 1967) et 1975-1995 (Hallet, 1998). Le bilan hydrogéologique pour la nappe des craies de Hesbaye à l'échelle du bassin du Geer peut s'écrire comme suit :

$$P = ETR + Q_{Geer} + Q_{captages} + \Delta R\acute{e}serves + Pertes$$

où  $P$  = précipitation moyenne annuelle,  $ETR$  = évapotranspiration réelle moyenne annuelle,  $Q_{Geer}$  = débit moyen annuel du Geer à l'exutoire,  $Q_{captages}$  = débits moyens annuels captés en Hesbaye,  $\Delta R\acute{e}serves$  = accumulation ou perte d'eau souterraine liée aux fluctuations du niveau de la nappe et  $Pertes$  = écoulement souterrain net s'écoulant en dehors du bassin.

Les précipitations et températures moyennes de l'air sont mesurées par l'IRM pour le bassin du Geer. Les débits journaliers du Geer sont mesurés à la station de Kanne située à l'exutoire du bassin (Dienst Hydrologisch Onderzoek) et les débits captés sont fournis par les sociétés de distribution d'eau (CILE, SWDE et De Watergroep). L'évapotranspiration réelle a été calculée par la méthode de Thornthwaite au pas de temps mensuel.

Le bilan hydrogéologique calculé pour la période comprise entre 1951 à 1965 donne les valeurs moyennes annuelles suivantes :

$$\text{en mm, } 740 = 525 + 120 + 65 + 15 + 15$$

$$\text{en \% , } 100 \% = 75 \% + 16 \% + 9 \% + 2 \% + 2 \%$$

Le bilan hydrogéologique calculé de janvier 1975 à décembre 1994 donne les valeurs moyennes annuelles suivantes (Hallet, 1998) :

$$\text{en mm, } 810 = 508 + 145 + 88 + 7,5 + 61,5$$

$$\text{en \% , } 100 \% = 63 \% + 18 \% + 11 \% + 1 \% + 7 \%$$

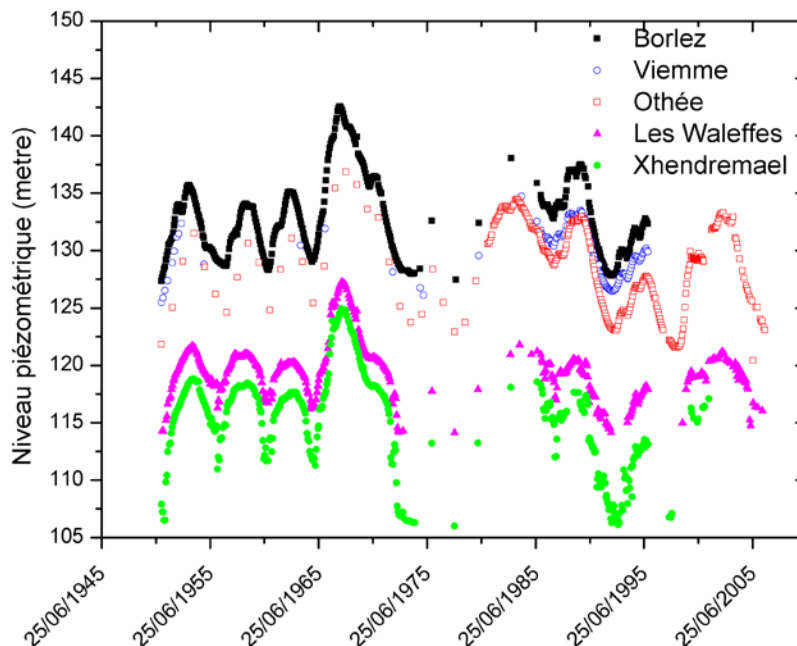


Figure 9 – Evolution temporelle de la piézométrie.



Pour la période de 1975 à 1994, les précipitations moyennes en Hesbaye sont de l'ordre de 810 mm. Les quantités d'eau évapotranspirées s'élèvent à 63 % des précipitations; il reste 37 % d'eau utile, généralement disponible de novembre à mars. Le volume d'eau s'écoulant par le Geer, exutoire de la nappe, représente 18 % des précipitations. Le débit des captages est de l'ordre de 11 %. Entre 1975 et 1995, le niveau de la nappe remonte en moyenne de 3 m soit, pour une porosité effective moyenne de 5 %, une accumulation annuelle de 7,5 mm pour la période étudiée. Les pertes, principalement constituées des écoulements d'eau souterraines quittant le bassin du Geer au travers de sa frontière nord, sont estimées à 7 %.

Une comparaison de ces deux bilans permet notamment de constater que les volumes captés ont augmenté de plus de 35 % et que les pertes sont également en forte hausse entre les deux périodes considérées. Cette augmentation des pertes peut être, au moins partiellement, expliquée par le développement des pompages d'eau souterraine dans le Limbourg situé au nord du bassin du Geer. Cette augmentation des débits captés a pour impact d'augmenter les transferts d'eau souterraine au travers de la frontière nord du bassin du Geer.

Sur base d'une analyse statistique des données climatiques annuelles moyennes et des hydrogrammes à la sortie du bassin, Hallet (1998) a particularisé au bassin du Geer une formule

empirique pour estimer l'infiltration moyenne annuelle sur le bassin :

$$I = 0,845 P - 422$$

où  $I$  = infiltration annuelle moyenne en mm et  $P$  = précipitation annuelle moyenne en mm.

En comparant les valeurs d'infiltration calculée à l'aide de cette formule avec les volumes captés au sein du bassin, on constate que, durant certaines années sèches (1975, 1976, 1985, 1989 à 1991), les débits captés et le débit du Geer excèdent l'infiltration efficace (Fig. 10), accentuant ainsi le rabattement de la nappe (jusqu'à plus de 10 m) observé 1 à 2 ans après (Hallet, 1998).

**Données qualitatives**

**Hydrogéochimie** Les eaux souterraines de l'aquifère de Hesbaye ont majoritairement un faciès bicarbonaté calcique (Fig. 11) avec une dureté comprise entre 35 et 45 °F. Ce type de minéralisation est lié à la dissolution de la calcite (principal constituant des craies) qui provoque l'augmentation des teneurs en ions calcium ( $Ca^{2+}$ ) et bicarbonates ( $HCO_3^-$ ) dans l'eau. La contamination par les nitrates des eaux souterraines du bassin du Geer est clairement mise en évidence dans le triangle des anions du diagramme de Piper présenté ci-dessous. En effet, les points représentant les eaux les plus contaminées situées au sud du bassin (cfr. paragraphe ci-dessous) se rapprochent du pôle  $Cl^- + NO_3^-$  du triangle des anions.

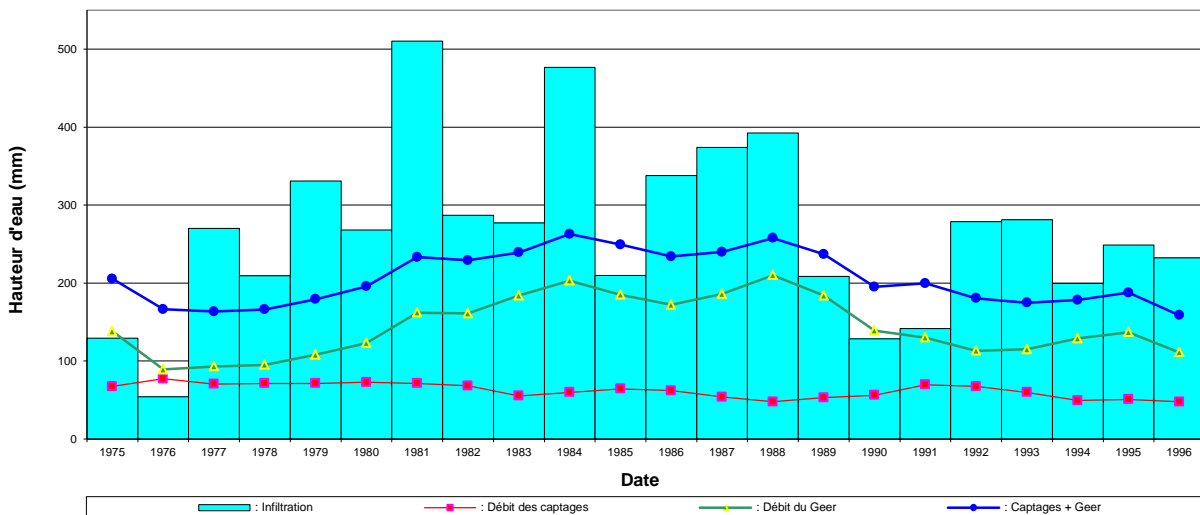


Figure 10 – Relation « Débit du Geer – Infiltration – Débit des captages » (Hallet, 1998).

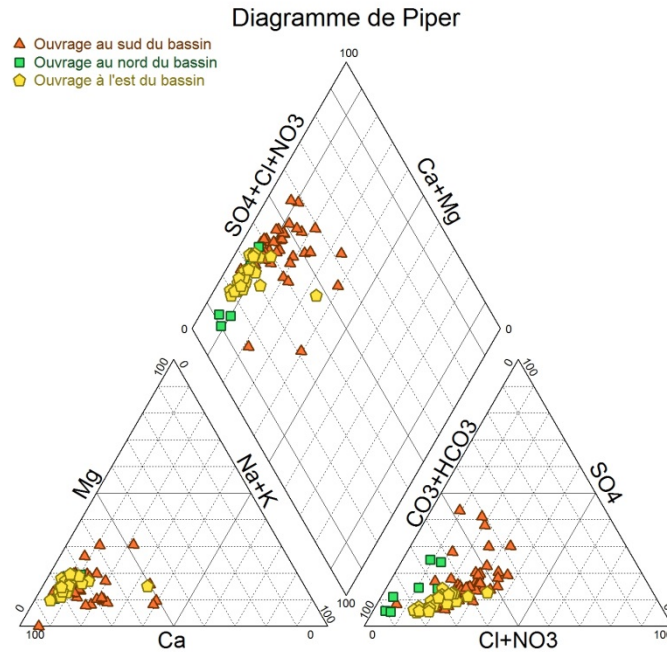


Figure 11 – Diagramme de Piper construit sur base des analyses chimiques réalisées sur des échantillons d'eau souterraine prélevés au printemps 2005 (Orban, 2008) et pendant l'été 2006 (Ménager, 2007).

### Problématique des nitrates – Généralités

L'aquifère de Hesbaye est identifié comme l'une des masses d'eau souterraine les plus affectées par les pressions d'origine agricole en Région wallonne (DGRNE, 2005). L'aquifère de Hesbaye a ainsi été désigné comme zone vulnérable aux nitrates au sens de la Directive Européenne Nitrate (91/676/CEE). Suite à cette désignation, un programme d'action a dû être mis en place conformément au code de « bonne pratique agricole »<sup>1</sup>.

Les recherches pour comprendre et simuler le transport des nitrates dans ce milieu à double porosité ont commencé au début des années 1990 (Biver & Dassargues, 1994). De nombreuses études ont ensuite été menées pour identifier la répartition spatiale des concentrations en nitrate et leur évolution temporelle (Hallet, 1998 ; Batlle Aguilar *et al.*, 2007 ; Orban, 2008 par exemple). Cependant, une des difficultés de ces études est liée au fait qu'un grand nombre de puits et piézomètres sont crépinés sur la hauteur totale de l'aquifère ou que la position de leur crépine est mal connue. Il est donc compliqué voire impossible d'étudier dans ce bassin la répartition verticale des concentrations en nitrate ou d'identifier une zonation rédox permettant de

mettre par exemple en évidence des phénomènes de réduction des nitrates.

**Problématique des nitrates – Distribution spatiale** La répartition spatiale des concentrations en nitrate observées dans l'aquifère crayeux de Hesbaye est fortement liée aux conditions hydrogéologiques. Hallet (1998) et Orban (2008) distinguent ainsi trois zones (Fig. 12) :

- Le sud du bassin, correspondant à la partie libre de l'aquifère, en zone agricole où de fortes concentrations en nitrates (proches ou même supérieures à la limite de potabilité de 50 mg/L) sont observées ;
- L'est du bassin et le long du Geer, où la nappe est semi-captive et où des concentrations proches de 25 mg/L sont observées ;
- Le nord-ouest du bassin où l'aquifère est confiné et les concentrations en nitrates sont faibles voire inférieures à la limite de détection.

Des ouvrages avec de fortes concentrations en nitrate (jusqu'à 99 mg/L lors de la campagne de 2005) sont mesurées dans la partie libre de l'aquifère. Hallet (1998) a montré que ces fortes concentrations étaient associées à des puits peu profonds et des sources locales de contamination.

<sup>1</sup> Pour plus d'information à ce sujet, le lecteur est invité à consulter le site de l'ASBL Nitrawal (<http://www.nitrawal.be>).

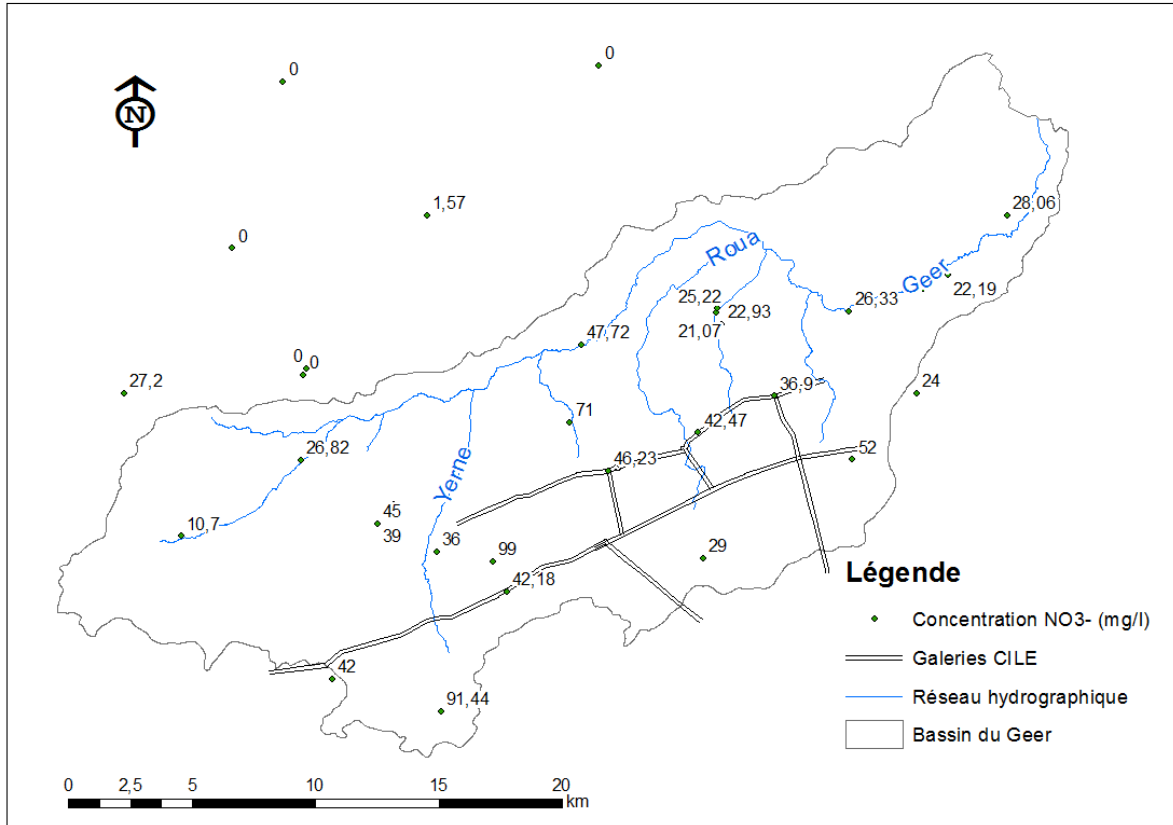


Figure 12 – Concentrations en nitrate (mg/L) observées dans divers ouvrages de l'aquifère crayeux de Hesbaye en 2005.

Des échantillons prélevés dans des piézomètres crépinés à des profondeurs différentes sur le site de Bovenistier ont permis de détecter une diminution des concentrations avec la profondeur. Cependant, comme un grand nombre d'ouvrages sont crépinés sur la hauteur totale de l'aquifère, il est difficile d'établir une relation générale entre profondeur d'échantillonnage et concentrations en nitrate.

**Problématique des nitrates – Evolution temporelle** Les chroniques temporelles montrent de nettes variations périodiques de concentrations en nitrate liées aux fluctuations de la surface piézométrique (Fig. 13). Selon Brouyère *et al.* (2004), quand le niveau piézométrique descend, le front de contamination en nitrate est déconnecté de la zone saturée et les concentrations en nitrate diminuent dans la nappe grâce aux processus de dispersions et de mélange. Quand le niveau piézométrique remonte, ce front de contamination au sein duquel les concentrations en nitrate sont plus élevées que dans la zone saturée, est rapidement atteint et lessivé, la source est réactivée et les concentrations en nitrate augmentent globalement dans la nappe.

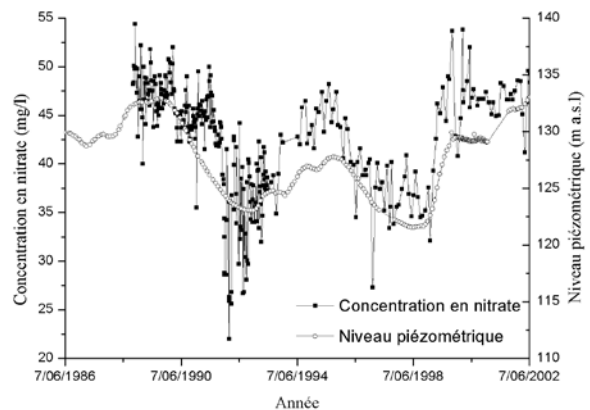


Figure 13 – Comparaison des concentrations en nitrate observées dans le puits de Lantin et des niveaux piézométriques mesurés dans le piézomètre de Viemme (source : Banque de données SPW).

Depuis des années, une augmentation globale des concentrations en nitrate est observée. En 2007, une approche statistique a été appliquée sur les chroniques temporelles des concentrations en nitrate afin de détecter et quantifier les tendances temporelles existants dans ces jeux de données (Batlle Aguilar *et al.*, 2007). Cette analyse confirme d'un point de vue statistique qu'une

tendance générale à la hausse est observée dans les chroniques des concentrations en nitrate dans le bassin du Geer. La pente de cette tendance est de l'ordre de 0,25 à 0,30 mg/L/an pour les points échantillonnés dans la partie orientale du bassin. De plus fortes valeurs (entre 0,4 et 0,8 mg/L/an) sont calculées pour les points échantillonnés dans le sud (Fig. 14).

**Autres paramètres dégradant la qualité de l'eau** Afin de répondre aux obligations de la Directive Cadre sur l'EAU, la DGARNE organise la surveillance de la qualité de la masse d'eau souterraine des craies du Bassin du Geer. Suite à cette surveillance et après application de l'outil SEQ-ESO<sup>2</sup>, il apparaît que, après les nitrates, les pesticides sont le second paramètre déclassant la qualité de cette masse d'eau. Comme le suivi des pesticides ne se fait de manière régulière que depuis quelques années, il est impossible de réaliser une étude statistique de tendance temporelle rigoureuse. Cependant, il a été constaté que les concentrations en atrazine et son métabolite, la déséthylatrazine, semblent diminuer suite à l'interdiction de son utilisation. Par contre, les concentrations en certains produits de substitution, comme la bentazone, semblent augmenter (SPW-DGO 3, 2010).

## PARAMETRES HYDROGEOLOGIQUES

### Paramètres hydrodynamiques

L'aquifère des craies présente une double porosité (matrice et fissures). La perméabilité et la porosité de la craie varient fortement selon l'échelle d'observation (Dassargues & Monjoie, 1993) :

- A l'échelle microscopique (quelques centimètres), la craie est un matériau légèrement compact mais poreux (porosité totale de l'ordre de 40 %) qui ne permet qu'une faible et lente circulation de l'eau (conductivité hydraulique de l'ordre de  $1.10^{-9}$  m/s). L'eau contenue dans une telle roche n'est que très difficilement libérée, sauf au travers de microfissures qui augmentent localement la perméabilité de la craie. Cette porosité de pores favorise principalement le stockage de l'eau qui peut ensuite s'écouler via les fissures.
- A l'échelle macroscopique (quelques dizaines de mètres), des réseaux de fissures plus ou moins denses sont observés. Ils élèvent de façon significative la conductivité hydraulique de la craie, de l'ordre de  $1.10^{-4}$  m/s. La porosité efficace (de drainage) liée aux fissures représente environ 1 % d'eau facilement mobilisable.

<sup>2</sup> Le système SEQ-ESO, utilisé par le SPW dans le cadre de la surveillance des masses d'eau souterraine, permet, moyennant une agrégation adéquate des données, d'évaluer l'état chimique d'une masse d'eau souterraine à partir des analyses réalisées sur chacun des ouvrages constituant le réseau de surveillance de cette masse d'eau (Rentier *et al.*, 2004)

- A l'échelle mégascopique (souvent utilisée pour les modèles numériques) de la nappe de Hesbaye, des accidents tectoniques ont fissuré la roche. Au droit des zones faillées, souvent observées à l'aplomb des vallées sèches, la craie peut présenter une conductivité hydraulique élevée ( $1.10^{-3}$  m/s) et une porosité efficace de fissures de 1 à 5 %. D'autre part, lors du creusement des galeries captantes de Hesbaye, des conduits karstiques d'ouverture centimétrique ont été recoupés. Les fortes perméabilités peuvent également être mesurées au sommet des craies, du fait de la forte altération par dissolution.

Des valeurs de conductivités hydrauliques peuvent être trouvées dans différentes études (Dassargues & Monjoie, 1993 ; Dautrebande *et al.*, 1996 ; Hallet, 1998 ; Brouyère, 2001). Ces valeurs sont comprises entre  $1.10^{-9}$  et  $1.10^{-7}$  m/s pour les loess,  $1.10^{-4}$  et  $5.10^{-3}$  m/s pour la craie supérieure du Maastrichien et  $1.10^{-5}$  et  $5.10^{-4}$  m/s pour la craie inférieure du Campanien. Les craies supérieures du Maastrichtien présentent donc une conductivité hydraulique d'ensemble supérieure et souvent plus homogène et isotrope que celle de la craie blanche campanienne inférieure.

### Paramètres hydrodispersifs

Des études ont été initiées en 1993 pour mettre au point les méthodologies à appliquer pour déterminer les futures zones de prévention (Dassargues *et al.*, 1995). Différents essais de traçage (Photo 3) ont été réalisés dans la craie saturée principalement pour déterminer les zones de prévention autour des captages (Hallet & Dassargues, 1998 ; Brouyère *et al.*, 2000 ; Hallet *et al.*, 2000). Orban (2008) propose une synthèse des différents paramètres (porosité d'eau mobile, porosité d'eau immobile, coefficient de dispersion, coefficient de transfert entre l'eau mobile et eau immobile) qui ont pu être déterminés lors de l'interprétation de ces essais. La porosité d'eau mobile ainsi déterminée varie de quelques centièmes à quelques pourcents. La porosité d'eau immobile peut quant à elle atteindre 30 %.



Photo 3 – Réalisation d'un essai de traçage sur le site de Bovenistier.

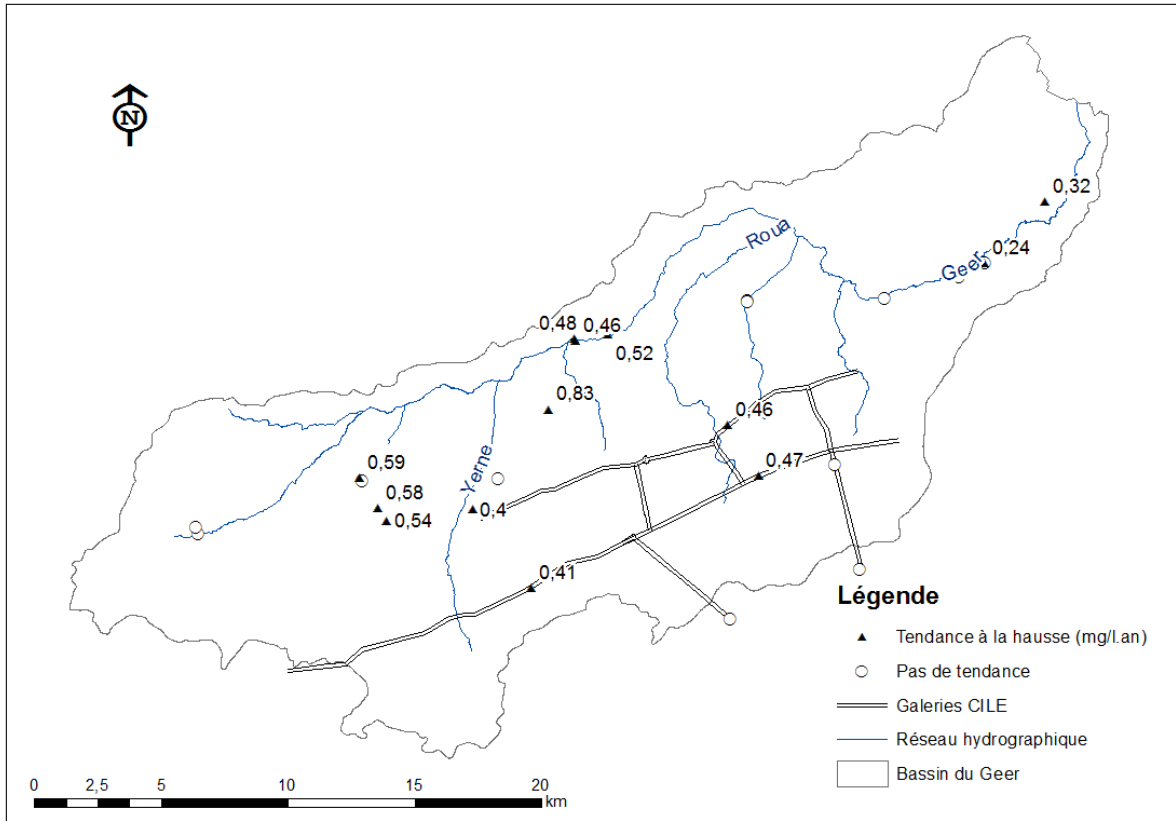


Figure 14 - Valeurs de la pente de la tendance des concentrations en nitrate calculée par Batlle-Aguilar et al. (2007).

**Données sur la zone non saturée**

Entre 1998 et 2001, différentes investigations, financées par la Région wallonne ont été menées sur un site-pilote à Bovenistier afin d'étudier les mécanismes de recharge d'eau et de nitrate au travers de la zone non saturée de la nappe aquifère de Hesbaye. Différentes mesures de laboratoires ont été effectuées sur des carottes collectées durant le forage des piézomètres du site expérimental. Sur le terrain, les essais ont consisté en la réalisation de diagraphies, de tests d'infiltration dans la zone saturée, d'essais de pompage dans la zone saturée et d'essais de traçage dans les zones non saturées et saturées (Brouyère, 2001 ; Brouyère et al., 2004).

Dans les loess, les mécanismes de recharge sont dominés par le flux gravitationnel, sans écoulement préférentiel. La vitesse moyenne de migration des solutés est faible, estimée à 1 m/an (Dautrebande et al., 1999). Grâce à la présence des loess, le taux d'infiltration au sommet de la craie non saturée est atténué et non suffisant pour garder les fractures totalement saturées. L'eau s'infiltré donc lentement au travers de la matrice crayeuse et les solutés migrent également à une vitesse de l'ordre de 1 m/an, due à la faible

conductivité hydraulique et la forte porosité de la matrice crayeuse (Brouyère et al, 2004).

**GESTION DES EAUX SOUTERRAINES**

**Modèle conceptuel de fonctionnement de l'aquifère**

Dans le but de mieux comprendre le fonctionnement de l'aquifère et la répartition spatiale des nitrates, divers échantillons prélevés en 2005 ont été analysés afin de mesurer leur contenu en tritium (Orban, 2008). La distribution spatiale des concentrations en tritium (Fig. 15) est en concordance avec la distribution spatiale des nitrates. Cette étude a permis de définir un schéma conceptuel de fonctionnement de l'aquifère crayeux de Hesbaye (Fig. 16) avec trois zones correspondant à des contextes hydrogéologiques différents (Orban et al., 2010) :

- La zone de recharge de l'aquifère située au sud du bassin du Geer. Les concentrations en tritium sont importantes (de 5 à 14 UT en 2005) caractéristiques d'une eau infiltrée après les années 1960. Dans cette zone, les concentrations en nitrate sont également élevées (entre 30 et 90 mg/L) et sont caractéristiques d'une contamination agricole récente.
- La zone captive de l'aquifère située au nord du bassin du Geer. Les concentrations en tritium y sont très

faibles (proche de 1 UT en 2005), caractéristiques d'eau infiltrée avant les années 1960. Dans cette zone, les concentrations en nitrate sont proches de zéro ou très faibles.

- La zone de décharge de l'aquifère vers le Geer, située à l'est du bassin. Les concentrations en tritium sont intermédiaires, comprises entre 2 à 6 UT, caractéristiques d'un mélange d'eau infiltrée avant et après les années 1960. Dans cette zone, les concentrations en nitrate sont de l'ordre de 25 mg/L.

### Outils de gestion

Différents modèles numériques de la masse d'eau souterraine du bassin du Geer ont été développés afin de mieux appréhender son fonctionnement et prédire l'évolution de la ressource et de sa qualité. Un modèle numérique 3D en régime transitoire et utilisant la méthode des éléments finis avait été réalisé dès 1987 (Dassargues *et al.*, 1988, 1989). Ce premier modèle a permis de comprendre, de manière intégrée, les grandes tendances de cet aquifère. D'autre part, ce modèle était innovant de par la technique utilisée pour simuler la variation de la nappe libre en régime transitoire par une non-linéarité du coefficient d'emmagasinement et donc sans adaptation du maillage (Dassargues, 1991, 1993). Ensuite ce modèle a été recalibré en 1993-1994, et des scénarios transitoires ont été simulés

pour des recharges variables durant les périodes hivernales.

Un modèle numérique tridimensionnel physiquement basé a été développé par Orban *et al.* (2010) pour étudier et prédire les tendances temporelles des concentrations en nitrates dans le bassin. Ce modèle qui permet de simuler les écoulements et le transport de soluté a été développé à l'aide du code SUFT3D (Brouyère, 2001 ; Brouyère *et al.*, 2009) et calibré grâce aux données piézométriques existantes et au jeu de données sur le tritium. Ce modèle a permis de mettre en évidence l'importante inertie du système aquifère. Cette inertie est liée d'une part à l'importante zone non saturée surmontant l'aquifère au sein de laquelle les nitrates migrent lentement et, d'autre part à la double porosité de la craie permettant un stockage important des nitrates. Ce modèle a également permis de prouver que l'inversion des tendances à la hausse des concentrations en nitrate ne se produira pas avant la limite de 2015 fixée par la Directive-cadre sur l'eau. En effet, même considérant des scénarios extrêmes de réduction des concentrations en nitrate, le modèle montre que les temps nécessaires pour engendrer des inversions de tendance sont compris entre quelques années et plusieurs dizaines d'années en fonction du point considéré dans le bassin.

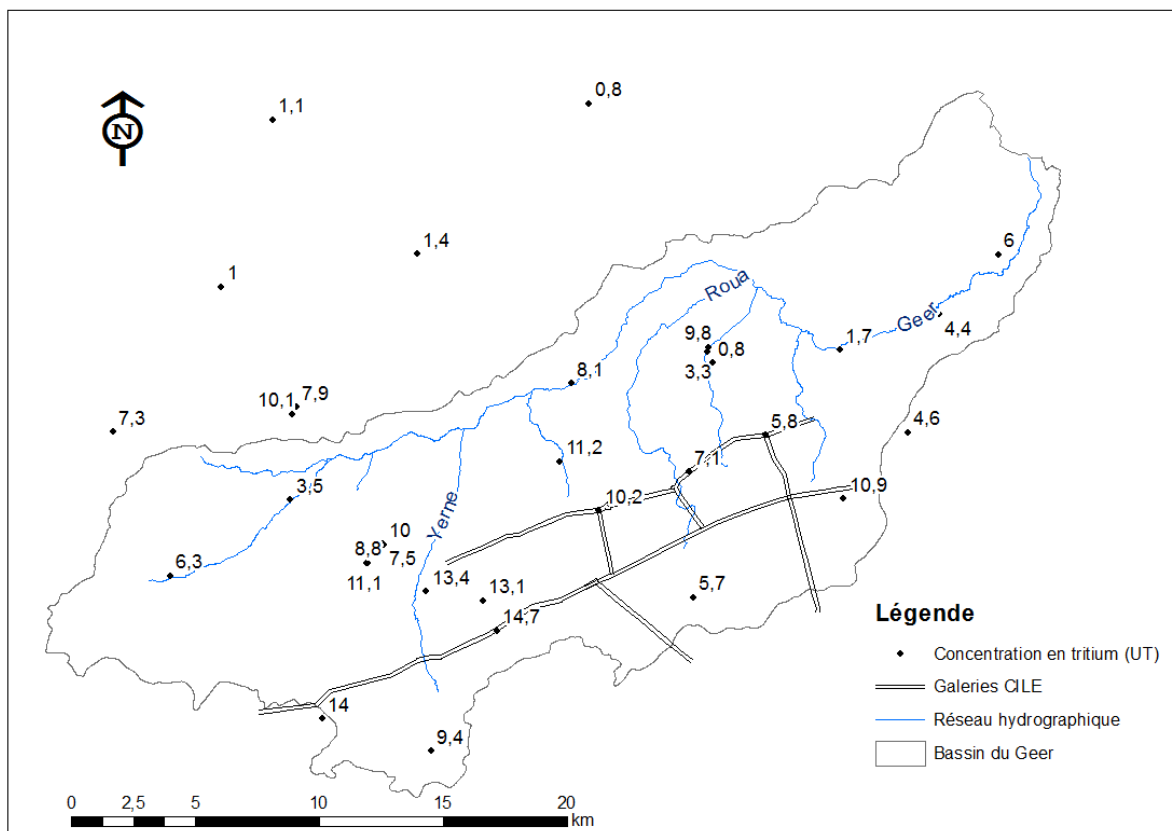


Figure 15 – Concentrations en tritium (UT) observées dans divers ouvrages de l'aquifère crayeux de Hesbaye en 2005.

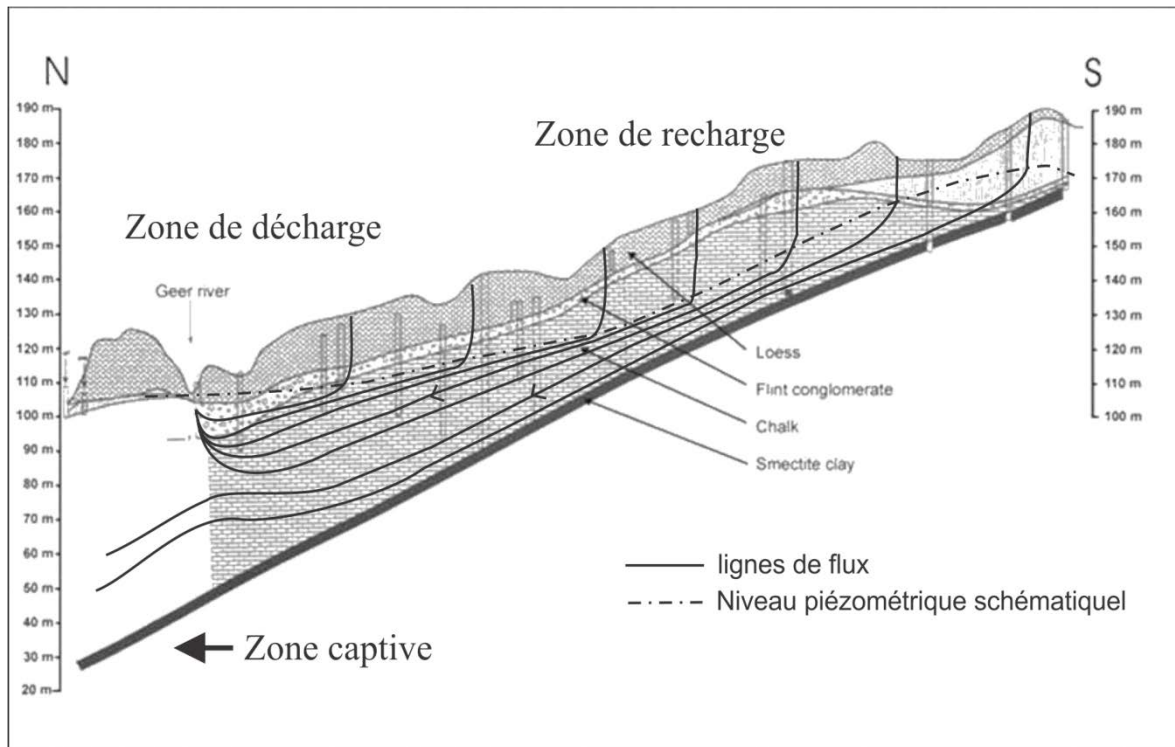


Figure 16 – Coupe N-S de l'aquifère crayeux de Hesbaye et représentation schématique de l'écoulement des eaux souterraines à l'échelle régionale.

Un modèle hydro-économique se basant sur ces résultats a été développé afin de définir le programme de mesures agro-environnementales le plus efficace maximisant le bénéfice net pour la société à l'échelle de la masse d'eau (Hérivaux *et al.*, 2013). Les résultats montrent que les mesures agro-environnementales prises actuellement ne seront pas suffisantes pour atteindre le bon état requis par la Directive-cadre européenne. Atteindre le bon état pour 2027 au plus tard, nécessiterait de modifier profondément ces mesures ce qui engendrerait des coûts qui ne seraient pas contrebalancés par des bénéfices économiques suffisants.

Un modèle numérique a également été développé afin d'évaluer l'impact des changements climatiques futurs sur les réserves en eau souterraine dans les craies de Hesbaye et les incertitudes qui y sont liées (Goderniaux *et al.*, 2009, 2011 ; Blenkinsop *et al.*, 2013). Ce modèle numérique, développé avec le code « HydroGeoSphere » (Therrien *et al.*, 2010), intègre totalement le calcul des écoulements en surface et en souterrain, en régime partiellement saturé. Cela permet une représentation plus réaliste des échanges d'eau entre les différents domaines, ce qui est crucial pour examiner l'impact de changements climatiques sur les eaux souterraines. Les scénarios climatiques utilisés sont issus de 6 RCM (Regional Climate Models) et

2 GCM (General Circulation Models) différents, et relatifs aux scénarios d'émission en gaz à effet de serre A2 (medium-high). Ils correspondent à des changements de température compris entre +3,5 °C et +5,6 °C, et des changements de précipitations annuelles entre -1,9 % et +15,3 %, pour la fin du XXI<sup>ème</sup> siècle. Les méthodes stochastiques de « downscaling » vers des scénarios climatiques représentatifs du bassin du Geer tiennent compte de changements de température, précipitations et de la fréquence des événements météorologiques. Les résultats montrent qu'une diminution significative des niveaux d'eau souterraine de cet aquifère est attendue pour la fin du XXI<sup>ème</sup> siècle. Bien que les incertitudes restent importantes, de telle façon qu'il reste difficile de quantifier précisément l'intensité de la diminution des ressources, le signal lié au changement climatique est supérieur à la marge d'incertitude. L'étude réalisée inclut les incertitudes liées aux modèles climatiques, à la calibration du modèle hydrogéologique et à la variabilité naturelle des conditions météorologiques.

## CONCLUSION

L'aquifère crayeux de Hesbaye est un aquifère de première importance pour l'approvisionnement en eau potable de la ville de Liège, sa périphérie et la Hesbaye. Il est donc fondamental de protéger

cette ressource en eau souterraine, tant du point de vue quantitatif que qualitatif.

Les données présentées dans ce chapitre indiquent, à l'heure actuelle, un bon état quantitatif général de la ressource. Cependant les modèles développés pour étudier l'impact des changements climatiques sur cet aquifère montrent une diminution future des niveaux d'eau souterraine.

Du point de vue qualitatif, une dégradation quasi-généralisée des eaux souterraines par les nitrates est constatée. Les modèles numériques simulant le transport de nitrates au sein du bassin du Geer montrent que les tendances à la hausse observées pour les concentrations en nitrates ne s'inverseront que dans plusieurs années malgré les efforts déjà consentis pour réduire les quantités de nitrates atteignant la nappe aquifère.

## REFERENCES

- Batlle-Aguilar, J., Orban, Ph., Dassargues, A., Brouyère, S., 2007. Identification of groundwater quality trends in a chalk aquifer threatened by intensive agriculture in Belgium, *Hydrogeology Journal*, 15(8), pp. 1615-1628.
- Biver, P., Dassargues, A., 1994. Using a numerical model of transport based on a deterministic theory to infer well protection zones in a chalky aquifer, *Computational Methods in Water Resources X*, vol.1, Kluwer Academic Publishers, pp. 183-190.
- Blenkinsop, S., Harpham, C., Burton, A., Goderniaux, P., Brouyère, S., Fowler, H.J., 2013. Downscaling transient climate change with a stochastic weather generator for the Geer catchment, Belgium, *Climate Research*, 57(2), pp. 95-109.
- Brouyère, S., 2001. Etude et modélisation du transport et du piégeage des solutés en milieu souterrain variablement saturé, Thèse de Doctorat, Université de Liège.
- Brouyère, S., Dassargues, A., Therrien, R., Sudicky, E., 2000. Modelling of dual porosity media: comparisons of different techniques and evaluation of the impact on plume transport simulations, Proc. of ModelCARE'99, F. Stauffer, W. Kinzelbach, K. Kovar & E. Hoehn (Eds.), IAHS Publication, 265, pp. 22-27.
- Brouyère, S., Carabin, G., Dassargues, A., 2004. Climate change impacts on groundwater resources: modelled deficits in a chalky aquifer, Geer basin, Belgium, *Hydrogeology Journal*, 12, pp. 123-134.
- 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), pp. 135-164.
- Brouyère, S., Orban, Ph., Wildemeersch, S., Couturier, J., Gardin, N., Dassargues, A., 2009. The hybrid finite element mixing cell method: a new flexible method for modelling mine water problems, *Mine Water and the Environment*, 28, pp. 102-114.
- Calembert, L., 1953. Sur l'extension régionale d'un hard-ground et d'une lacune stratigraphique dans le Crétacé supérieur du Nord-Est de la Belgique, Bulletin de l'Académie Royale des Sciences de Belgique, Classes des Sciences, 5<sup>e</sup> série, XXXIX, pp. 724-733.
- Calembert, L., 1958. Le Crétacé supérieur de Glons. *Annales de la Société Géologique de Belgique*, T.81, pp. 459-464.
- Dassargues, A., 1991. Water table aquifers and finite element method: analysis and presentation of a case study, in « Computational Modelling of Free and Moving Boundary Problems », vol. 1, Fluid Flow, Computational Mechanics Publications, Southampton, pp. 63-72.
- Dassargues, A., 1993. Transient simulation of water table aquifers using a pressure dependent storage law, Proc. of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Moving Boundaries, Computational Modelling of Free and Moving Boundary Problems, pp. 3-10, Milan.
- Dassargues, A., Monjoie, A., 1993. Hydrogeology of the Chalk of North-west Europe, Chapter 8, Chalk as an aquifer in Belgium, Oxford University Press, pp. 153-169.
- Dassargues, A., Radu, J.-P., Charlier, R., 1988. Finite elements modelling of a large water table aquifer in transient conditions, *Advances in Water Resources*, 11(2), pp. 58-66.
- Dassargues, A., Monjoie, A., Lambert, J.-M., Pierlot, A., 1989. Modèle mathématique de la nappe aquifère de Hesbaye, *Tribune de l'Eau*, 41(6), pp. 12-23.
- Dassargues, A., Derouane, J., Hallet, V., 1995. Modelling groundwater flow and contaminant transport to a threatened collecting gallery: first assessment of the protection zones and determination of the needed data for better reliability, in « Water Pollution III: Modeling, Measuring and Prediction », pp. 49-56.
- Dautrebande, S., Dewez, A., Hallet, V., Guiot, J., Rouxhet, F., Monjoie, A., 1996. Programme Action Hesbaye, Final report of the EC-Life project, 169 p.
- Dautrebande, S., Dewez, A., Casse, C., Hennebert, P., 1999. Nitrate leaching at the regional scale with EPIC: an implicit example of a hydrotope model concept, European Agriculture Engineering Soil and Water Interest Group, Leuven, pp. 765-774.
- DGRNE, 2005. Analyse des pressions anthropiques sur les eaux souterraines, Etat des lieux du District Hydrographique International de la Meuse, Ministère de la Région Wallonne, Direction générale des Ressources naturelles et de l'Environnement, Observatoire des Eaux de Surface, Direction des Eaux de Surface, Direction des Eaux Souterraines, 47 p.
- Goderniaux, P., Brouyère, S., Fowler, H.J., Therrien, R., Orban, Ph., Dassargues, A., 2009. Large scale surface - subsurface hydrological model to assess climate change impacts on groundwater reserves, *Journal of Hydrology*, 373(1-2), pp. 122-138.
- Goderniaux, P., Brouyère, S., Blenkinsop, A., Burton, A., Fowler, H.J., Orban, Ph., Dassargues, A., 2011. Modeling climate change impacts on groundwater resources using transient stochastic climatic scenarios, *Water Resources Research*, 47(12).
- Hallet, V., 1998. Etude de la contamination de la nappe aquifère de Hesbaye par les nitrates: hydrogéologie, hydrochimie et modélisation mathématique des écoulements et du transport en milieu saturé, Thèse de Doctorat, Université de Liège.
- Hallet, V., Dassargues, A., 1998. Effective porosity values used in calibrated transport simulations in a



- fissured and slightly karstified chalk aquifer, Proc. of Groundwater Quality 1998, M. Herbert & K. Kovar (Eds.), Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten (TGA), C36, pp. 24-126.
- Hallet, V., Nzali, T., Rentier, C., Dassargues, A., 2000. Location of protection zones along production galleries : an example of methodology, Proc. of the TraM'2000 Conference on Tracers and Modelling in Hydrogeology, A. Dassargues (Ed.), IAHS Publication, 262, pp. 141-148.
- Hérivaux, C., Orban, Ph., Brouyère, S., 2013. Is it worth protecting groundwater from diffuse pollution with agri-environmental schemes? A hydro-economic modeling approach, *Journal of Environmental Management*, 128, pp. 62-74.
- Hodiaumont, A., Cantillana R., Compère, J.-M., 1999. « Les eaux souterraines de la CILE : Contexte, captage et qualité », *Tribune de l'eau*, 52(600-601), pp. 31-50.
- Ménager, D., 2007. Etude statistique de la contamination en nitrates dans l'aquifère de Hesbaye, Thèse de Doctorat, Université de Liège.
- Monjoie, A., 1967. Observations nouvelles sur la nappe aquifère de la craie en Hesbaye (Belgique)., Mémoires de l'Association Internationale des Hydrogéologues (IAH).
- Orban, Ph., 2008. Solute transport modelling at the groundwater body scale: nitrate trends assessment in the Geer basin (Belgium), Thèse de Doctorat, Université de Liège.
- Orban, Ph., Brouyère, S., Batlle-Aguilar, J., Couturier, J., Goderniaux, P., Maloszewski, P., Dassargues, A., 2010. Regional transport modelling for nitrate trend assessment and forecasting in a chalk aquifer, *Journal of Contaminant Hydrology*, 118, pp. 79-93.
- Rentier, C., Delloye, F., Dassargues, A., 2004. Mise au point d'un réseau de mesure et de surveillance des eaux souterraines en vue de la mise en œuvre de la Directive cadre et du système d'évaluation de la qualité des eaux (SEQ-Eaux souterraines) en Région wallonne, Convention ULg et Ministère de la Région Wallonne, 215 p.
- Ruthy, I., Dassargues, A., 2009. Carte hydrogéologique de Wallonie, Planchettes Tongeren – Herderen (34/5-6), Edition : Service public de Wallonie, DGO 3 (D GARNE), Belgique, Dépôt légal D/2009/12.796/4 - ISBN 978-2-8056-0066-1.
- Ruthy, I., Dassargues, A., 2010. Carte hydrogéologique de Wallonie, Planchettes Jehay-Bodegnée – Saint-Georges-sur-Meuse (41/7-8), Edition : Service public de Wallonie, DGO 3 (D GARNE), Belgique, Dépôt légal – D/2010/12.796/8 - ISBN 978-2-8056-0076-0.
- SPW-DGO 3, 2010 (version 1.19). Directive-cadre sur l'Eau (2000/60/CD), Avant-projet de plan de gestion – DHI Meuse – Masse d'eau souterraine RWM040 « Craies du Geer ».
- Therrien, R., McLaren, R.G., Sudicky, E.A., Panday, S.M., 2010. HydroGeoSphere. A three-dimensional numerical model describing fully-integrated subsurface and surface flow and solute transport, 443 p.