



**Geo<sup>3</sup>- Hydrogéologie - Département ArGEnCo**

(Architecture, Géologie, Environnement et Constructions)

Université de Liège



**Département de**



**Département de Géologie**

Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix à Namur



**Cellule d'Hydrogéologie - Département GFA**

(Géologie Fondamentale et Appliquée)

Faculté Polytechnique de Mons

### **Convention RW et SPGE – AQUAPOLE**

#### **Caractérisation hydrogéologique et support à la mise en œuvre de la Directive Européenne 2000/60 sur les masses d'eau souterraine en Région Wallonne**

Rapport D3.12 - partie MESO RWM012

Bilans historiques, bilans hydrogéologiques, estimation des ressources, caractérisation hydraulique des unités hydrogéologiques, piézométrie, sens d'écoulement des eaux souterraines et hydrodynamique pour la masse d'eau RWM012

## TABLE DES MATIERES

|                 |                                                                                     |                  |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| <b><u>1</u></b> | <b><u>INTRODUCTION.....</u></b>                                                     | <b><u>4</u></b>  |
| <b><u>2</u></b> | <b><u>DONNEES ET METHODES.....</u></b>                                              | <b><u>5</u></b>  |
| 2.1             | DONNEES DISPONIBLES ET ACQUISES.....                                                | 5                |
| 2.2             | RAPPEL THEORIQUE RELATIF AUX BILANS HYDROLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES.....          | 7                |
| 2.2.1           | PRINCIPE GENERAL.....                                                               | 7                |
| 2.2.2           | CALCUL DE L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE .....                                         | 8                |
|                 | Equation et algorithme .....                                                        | 8                |
| 2.2.3           | IMPORTS/ EXPORTS : $Q_{IN}$ ET $Q_{OUT}$ .....                                      | 9                |
| 2.3             | ESTIMATION GLOBALE DES RESSOURCES RENOUVELABLES PAR LES COEFFICIENTS D'INFILTRATION |                  |
|                 | 10                                                                                  |                  |
|                 | Détermination des coefficients $CI_i$ .....                                         | 10               |
| <b><u>3</u></b> | <b><u>BILANS HYDROLOGIQUES.....</u></b>                                             | <b><u>12</u></b> |
| 3.1             | BILAN HYDROLOGIQUE POUR LE BASSIN DE REUMONT (STATION SYNCLIN'EAU).....             | 12               |
| 3.2             | BILAN HYDROLOGIQUE POUR LE BASSIN DU SAMSON.....                                    | 14               |
| 3.2.1           | DESCRIPTION GENERALE DU BASSIN DU SAMSON.....                                       | 14               |
| 3.2.2           | INVENTAIRE DES VOLUMES D'EAU IMPORTES ET EXPORTES .....                             | 16               |
| 3.2.3           | STATION SYNCLIN'EAU S3_WANET.....                                                   | 16               |
| 3.2.4           | STATION AQUALIM_MOZET.....                                                          | 17               |
| 3.2.5           | STATION SYNCLIN'EAU S4_CONFLUENCE .....                                             | 21               |
| 3.2.6           | CONCLUSIONS GENERALES RELATIVES AU BASSIN DU SAMSON.....                            | 22               |
| 3.3             | CONCLUSIONS GENERALES .....                                                         | 22               |
| <b><u>4</u></b> | <b><u>ESTIMATION DES RESSOURCES RENOUVELABLES DE LA RMW012.....</u></b>             | <b><u>23</u></b> |
| 4.1             | INTRODUCTION .....                                                                  | 23               |
| 4.2             | DETERMINATION DES COEFFICIENTS D'INFILTRATION .....                                 | 23               |
| 4.2.1           | DÉTERMINATION DES COEFFICIENTS D'INFILTRATION PAR LA MÉTHODE MATHÉMATIQUE .....     | 26               |
| 4.2.2           | DISCUSSION SUR LA VALIDITE DES COEFFICIENTS D'INFILTRATION .....                    | 27               |
| 4.2.3           | ESTIMATION DES RESSOURCES RENOUVELABLES POUR LA MESO RWM012.....                    | 29               |
| 4.2.4           | RÉPARTITION DES RESSOURCES RENOUVELABLES AU SEIN DE LA MASSE D'EAU RWM012 .....     | 31               |
| 4.2.5           | COMPARAISON DES RESSOURCES PRÉLEVÉES AUX RESSOURCES RENOUVELABLES .....             | 32               |

|            |                                                                                                 |           |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.2.6      | RESSOURCES RENOUVELABLES ET RESSOURCES EXPLOITABLES .....                                       | 35        |
| <b>5</b>   | <b><u>CARACTERISTIQUES HYDRAULIQUES – ECOULEMENT .....</u></b>                                  | <b>36</b> |
| <b>5.1</b> | <b>PARAMÈTRES HYDRAULIQUES .....</b>                                                            | <b>36</b> |
| 5.1.1      | RAPPELS THÉORIQUES .....                                                                        | 36        |
| 5.1.2      | MÉTHODOLOGIE .....                                                                              | 37        |
| 5.1.3      | VARIABILITÉ DES CONDUCTIVITÉS HYDRAULIQUES DE LA RWM012 .....                                   | 38        |
| <b>5.2</b> | <b>PIEZOMETRIE DE LA MASSE D’EAU.....</b>                                                       | <b>40</b> |
| 5.2.1      | BASSIN VERSANT DE LA SAMBRE EN AMONT DU CONFLUENT AVEC L’EAU D’HEURE .....                      | 40        |
| 5.2.2      | BASSIN VERSANT DE L’EAU D’HEURE .....                                                           | 44        |
| 5.2.3      | BASSIN VERSANT DE LA SAMBRE DU CONFLUENT AVEC L’EAU D’HEURE AU CONFLUENT AVEC LA<br>BIESME..... | 45        |
| 5.2.4      | BASSIN VERSANT DE LA SAMBRE EN AVAL DU CONFLUENT AVEC LA BIESME .....                           | 47        |
| 5.2.5      | BASSIN VERSANT DE LA MEUSE, ZONE DE WEPION .....                                                | 49        |
| 5.2.6      | RIVE DROITE DE LA MEUSE, ENTRE NAMUR ET HUY .....                                               | 51        |
| <b>6</b>   | <b><u>CONCLUSIONS : FONCTIONNEMENT HYDRODYNAMIQUE DE LA MASSE D’EAU .....</u></b>               | <b>54</b> |
| <b>6.1</b> | <b>BILANS HYDROLOGIQUES.....</b>                                                                | <b>55</b> |
| <b>6.2</b> | <b>ESTIMATION DES RESSOURCES RENOUVELABLES .....</b>                                            | <b>55</b> |
| <b>6.3</b> | <b>CARACTERISTIQUES HYDRAULIQUES DES UNITES HYDROGEOLOGIQUES .....</b>                          | <b>56</b> |
| <b>6.4</b> | <b>PIEZOMETRIE DE LA MASSE D ‘EAU.....</b>                                                      | <b>56</b> |
| <b>6.5</b> | <b>FONCTIONNEMENT HYDRODYNAMIQUE DE LA MASSE D’EAU. ....</b>                                    | <b>57</b> |

## 1 Introduction

Un des objectifs principaux du projet Synclin'EAU est de contribuer à une meilleure connaissance de l'état et du fonctionnement hydrogéologiques, tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif, des masses d'eau souterraine RWM011, RWM012 et RWM021, sur base de données existantes collectées principalement au début du projet, que de données acquises dans le cadre-même du projet, à l'occasion de campagnes de mesures et d'essais réalisés sur le terrain. Ce rapport se réfère à la masse d'eau souterraine **RWM012**. D'un point de vue qualitatif, les apports du projet sont essentiellement décrits dans le rapport *D4.1 Rapport relatif aux échantillonnages complémentaires des éléments majeurs*.

D'un point de vue quantitatif, la caractérisation vise à (cf. note méthodologique D3.11):

1. Fournir une meilleure connaissance du contexte hydrogéologique global à l'échelle de la masse d'eau souterraine, de l'extension des formations aquifères, aquitards et aquicludes...
2. Fournir une estimation, la plus précise possible, des ressources en eau souterraine au sein de chaque masse d'eau, et donc des différents termes du bilan hydrogéologique (recharge de la nappe, volume des réserves en eau souterraine, prélèvements, débit de base...)
3. Fournir une connaissance meilleure des caractéristiques hydrauliques et des conditions d'écoulement régnant au sein de la masse d'eau souterraine, dans le but de mieux comprendre les mécanismes d'écoulement propres aux différents types d'aquifère rencontrés dans la région étudiée (milieu poreux – milieu fracturé), les directions principales d'écoulement, la piézométrie et dynamique des niveaux piézométriques (dans la mesure du possible), les directions d'écoulements, la cinétique de la recharge et les zones de recharges / décharge. Dans la zone saturée, les paramètres hydrauliques moyens (conductivité hydraulique, coefficient d'emménagement, porosité efficace) font l'objet d'estimations.

Le point 1 est décrit dans les rapports de synthèse relatifs à la caractérisation des trois masses d'eau souterraine (Délivrable D2.22 Rapport final de caractérisation de la masse d'eau souterraine RWM012) Ce rapport traite essentiellement des points deux et trois, donc sur l'estimation des ressources en eau souterraine (Chapitre 3 et 4) et sur la caractérisation hydraulique des aquifères (Chapitre 5).

Avant de décrire les résultats de ces travaux de caractérisation, le Chapitre 2 fournit un descriptif des données et des méthodes utilisées dans le cadre de ce travail.

## **2 Données et méthodes**

### **2.1 Données disponibles et acquises**

Les principales données sont :

- a. Des données climatiques, fournies par le MET-SETHY et l'IRM et servant au calcul de l'eau utile, à partir des données de pluie et du calcul de l'évapotranspiration potentielle et réelle.
- b. Des données des débits sur les cours d'eau: ces données ainsi que les bassins versants associées ont été fournies par le MET-SETHY et Aqualim avec des historiques assez longs. Ces données ont été complétées par la mise en place d'un réseau de stations limnimétriques installées à des endroits clés (principalement des seuils hydrogéologiques) et suivies dans le cadre et pendant la durée de l'étude.
- c. Les données des captages : Les données des volumes captés proviennent d'informations collectées chez les différents producteurs d'eau (S.W.D.E., I.N.A.S.E.P., VIVAQUA,...), tenant compte, pour le calcul des bilans des imports et exports d'eau entre bassins (rejet de l'eau utilisée dans la bassin même ou pas).
- d. Les paramètres hydrauliques : ces données proviennent d'essais de pompage réalisés par les producteurs ou lors d'études particulières.
- e. La piézométrie : l'inventaire des piézomètres et points d'eau divers (puits, source, ...) résulte de l'utilisation de banques de données (cartes hydrogéologiques, BDHydro) et de recherches sur le terrain. Faisant suite à cet inventaire, un réseau de suivi piézométrique a été mis en place et des campagnes de mesures ont été organisées sur base mensuelle.
- f. Les cartes hydrogéologiques de Wallonie réalisées ou en cours de réalisation ont également fourni de nombreuses données : unités hydrogéologiques, sens d'écoulement, ...

La localisation de ces données est présentée à la **Figure 2.1-1**.

## Localisation des données (RWM012)

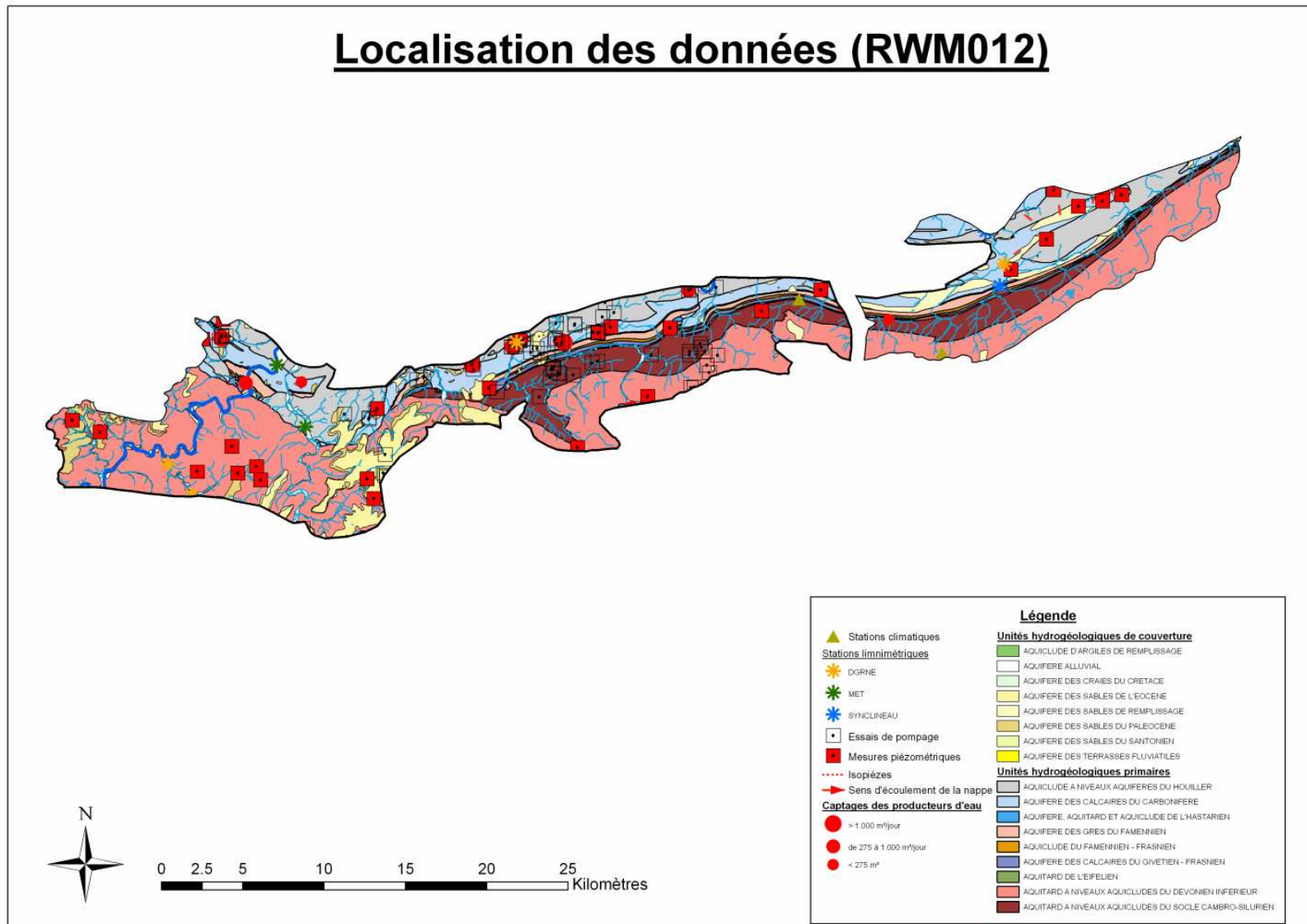


Figure 2.1-1: Localisation des données disponibles

## 2.2 Rappel théorique relatif aux bilans hydrologiques et hydrogéologiques

### 2.2.1 *Principe général*

Le bilan en eau d'un bassin hydrologique est la balance comptable des débits d'entrées et des débits de sorties et peut s'écrire :

$$P - ETR + Q_{in} = Q_{capt} + Q_{out} + Q_{Ruis} + Q_w + \Delta Res + \Delta Stock + \varepsilon_{Fermeture} \quad (1)$$

avec :

P : Précipitations

ETR : Evapotranspiration réelle

$Q_{Ruis}$  : Ruissellement

$Q_{capt}$  : Débits pompés

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

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

$Q_w$  : Débit d'écoulement souterrain dans l'aquifère appelé aussi débit de base

$\Delta Res$  : Variation de la réserve d'eau souterraine (zone saturée)

$\Delta Stock$  : Variation de stock d'eau du sol (zone non saturée)

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

$Q_T$  : Ecoulement total à l'exutoire (=  $Q_w + Q_{Ruis}$ )

EU : Eau utile (=  $P - ETR$ )

Les termes **P** et **ETR** sont calculés sur la surface du bassin en fonction des données disponibles des stations climatiques (cf. § 2.2.2 ). Les débits captés  $Q_{capt}$  sont fournis par les producteurs d'eau concernés. L'écoulement total ( $Q_w + Q_{Ruis}$ ) est une donnée provenant du MET-SETHY, d'Aqualim ou des stations limnimétriques placées dans le cadre du projet. Dans le cadre de cette étude,  **$\Delta Res$**  n'est calculé que pour les bilans effectués sur base d'années hydrologiques. La méthode de Maillet est utilisée afin de déterminer un coefficient de récession sur base des hydrogrammes à l'exutoire. Ce coefficient de récession est ensuite utilisé dans le calcul de  **$\Delta Res$**  pour l'année hydrologique du bilan. Toutefois, si le niveau d'eau de la nappe est stable dans le temps, la valeur moyenne sur un nombre suffisant d'années est voisine de zéro.  **$\Delta Stock$**  représente la variation de la quantité d'eau dans le sol qui peut soit s'infiltrer pour recharger la nappe soit retourner à l'atmosphère en période sèche. Ce terme n'est calculé que pour les bilans établis sur base d'années hydrologiques.  **$Q_{in}$  et  $Q_{out}$**  sont à priori inconnus et sont des termes à discuter à la lumière du terme de bouclage du bilan en fonction des conditions hydrogéologiques (gradients piézométriques, conductivités hydrauliques) dans les zones frontières du bassin hydrographique (écart de fermeture, cf. ci-après). L'écart de fermeture  **$\varepsilon_{Fermeture}$**

donne une fourchette d'imprécision et est fonction des erreurs de mesures et de la précision des calculs et estimations. Un écart de fermeture inférieur à 10% peut dans certains cas (imprécisions sur les données, ...) signifier que le bilan est globalement admissible. Néanmoins, pour certains bassins étudiés en détail, un terme de fermeture inférieur à 10% sera interprété comme étant significatif d'échanges non pris en compte dans le bilan. Si l'écart de fermeture est négatif et inférieur à -10%, le bilan présente un caractère excédentaire (une « entrée d'eau » ou un stockage temporaire ( $\Delta Res$ ) n'a pas été prise en compte). La logique est similaire dans le cas où le terme est positif et supérieur à 10% (caractère déficitaire).

Différentes méthodes de calcul ont été utilisées afin d'évaluer la valeur des différents termes du bilan. Le traitement et l'extrapolation des données climatiques à l'ensemble de la zone s'effectuent grâce à la méthode des polygones de Thiessen, l'évapotranspiration potentielle et la recharge sont calculées sur base de la formule de Thorntwaite.

Le terme « eau utile » sera utilisé de nombreuses fois dans ce rapport. Il désigne en réalité la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration réelle ( $EU = P - ETR$ ). L'eau utile représente donc théoriquement la quantité d'eau disponible pour le ruissellement et l'infiltration.

### 2.2.2 Calcul de l'évapotranspiration réelle

L'ULg a adapté un programme de calcul de l'évapotranspiration réelle et donc de l'eau utile appelé WaterBudget à partir de plusieurs sous-routines écrites par I.C. Popescu et S. Brouyère. Ce programme calcule l'évapotranspiration réelle, l'eau utile mensuelle et le stock d'eau du sol par bassin versant, au départ de données de températures et de précipitations. Ces données sont distribuées spatialement, suivant un canevas définit par l'utilisateur (ex. : répartition en polygones de Thiessen). La répartition peut être différente pour les précipitations et les températures, et peut varier au cours du temps selon que des stations météorologiques sont mises en place ou démantelées dans la zone d'étude (données disponibles ou pas).

#### Equation et algorithme

L'application WaterBudget.exe utilise l'**équation de Thorntwaite** pour la détermination de l'évapotranspiration potentielle mensuelle. Pour le calcul des valeurs mensuelles d'eau utile, l'utilisateur peut librement choisir entre le **modèle hydrologique "classique" de Thornthwaite** (variation linéaire du stock en eau du sol en fonction du temps) et le **modèle hydrologique "modifié" de Thornthwaite** (variation exponentielle du stock d'eau du sol en fonction du temps).



Les algorithmes classique et modifié du bilan hydrique de Thornthwaite permettent de déterminer de manière simple l'évapotranspiration réelle, le stock d'eau contenu dans les couches superficielles du sol, et l'eau utile disponible pour le ruissellement et l'infiltration.

Les algorithmes distinguent deux cas sur base des valeurs mensuelles :

Si les précipitations sont supérieures à l'évapotranspiration potentielle, celle-ci est totalement satisfaite. L'évapotranspiration réelle égale l'évapotranspiration potentielle. Le surplus d'eau ré-humidifie les couches superficielles du sol jusque leur capacité maximale (fixée par l'utilisateur). L'excédent éventuel est disponible pour le ruissellement et l'infiltration.

Si les précipitations sont inférieures à l'évapotranspiration potentielle, l'eau utile est nulle. L'évapotranspiration réelle est égale aux précipitations augmentées d'une certaine quantité d'eau cédée par les couches superficielles de sol. Dans le cas de la **méthode "classique" de Thornthwaite**, l'entièreté de l'eau contenue dans le sol est directement disponible pour l'évapotranspiration. Le stock se vide "à la demande" jusqu'à s'assécher complètement. Dans le cas de la **méthode "modifiée" de Thornthwaite**, seul une partie du stock sollicité par l'évapotranspiration est réellement disponible. La quantité d'eau effectivement cédée est proportionnelle à la teneur en eau du sol. Dans le cas de la méthode modifiée, le stock d'eau contenu dans le sol décroît de manière exponentielle : rapidement lorsque le stock est proche de sa capacité maximale, très lentement lorsqu'il est presque sec. Théoriquement, la valeur du stock n'est donc jamais nulle.

### 2.2.3 Imports/ Exports : $Q_{in}$ et $Q_{out}$

Ces termes regroupent les échanges naturels et artificiels vers le bassin ( $Q_{in}$ ) ou hors du bassin ( $Q_{out}$ ). Les échanges naturels sont délicats à déterminer et doivent être discutés au cas par cas sur base des conditions hydrogéologiques dans les zones frontières du bassin.

Les transferts artificiels sont le fait des producteurs et distributeurs d'eau qui importent ou exportent vers ou hors bassin une certaine quantité d'eau pompée. Les informations concernant les volumes captés mensuellement sont fournies par les producteurs d'eau. Les échanges d'eau entre les bassins peuvent être fournis par les producteurs d'eau. Dans le cas contraire les échanges inter bassins sont estimés sur base des résultats de l'étude des LGIH (Monjoie, 1998) portant sur la période 1985 – 1996 et extrapolés pour les périodes non couvertes par l'étude (1997 – 2007) en s'appuyant sur les volumes effectivement captés au cours de cette période.

### 2.3 Estimation globale des ressources renouvelables par les coefficients d'infiltration

L'évaluation des ressources renouvelables est en général difficile à réaliser et relativement subjective. Cela demande en effet de calculer non pas l'eau utile mais la composante de l'eau utile qui recharge effectivement la nappe ( $R_{\text{nappe}} = P - \text{ETR} - \text{Ruissellement}$ ). Dans le cadre du projet Synclin'Eau, l'estimation globale des ressources renouvelables d'un aquifère est basée sur l'hypothèse qu'à chaque type de terrain peut être attribué un Coefficient d'Infiltration CI.

Sur un territoire considéré comme homogène, le coefficient d'infiltration est défini par :

$$CI = \frac{I}{P - \text{ETR}} \quad (2)$$

Avec P : Précipitations

ETR : Evapotranspiration réelle

I : Infiltration

Un tel coefficient ne peut être considéré que pour une estimation globale, sur de longues périodes et pour des domaines étendus, faisant l'hypothèse que les variations spatiales et temporelles des paramètres qui régissent l'infiltration réelle sont totalement lissées.

Dans un domaine de surface totale S, où i zones homogènes de surface  $S_i$  peuvent être définies, l'équation (2) devient :

$$I \cdot S = (\sum CI_i \cdot S_i) \cdot (P - \text{ETR}) \quad (3)$$

où

$$1 = \frac{(\sum CI_i \cdot S_i) \cdot (P - \text{ETR})}{I \cdot S} \quad (4)$$

La valeur de  $P - \text{ETR}$  est supposée identique dans tout le domaine S. Si ce n'est pas le cas, un découpage supplémentaire par station climatique est nécessaire.

#### Détermination des coefficients $CI_i$

La détermination des coefficients d'infiltration nécessite de s'assurer de la validité des données des bassins utilisés ( $Q_w$ ,  $Q_{in}$ ,  $Q_{out}$ , P, ETR) en établissant leur bilan hydrologique avec une erreur de fermeture minime.

L'hydrogramme de l'écoulement total  $Q_T$  à l'exutoire du bassin peut être analysé pour en extraire le terme représentant le débit de base de l'aquifère sous-jacent  $Q_w$ . Cette opération est effectuée grâce au code de calcul VCN3.

L'estimation prend pour hypothèse l'assimilation du débit de base  $Q_w$  au produit I·S, premier terme de l'équation (3), c'est-à-dire que le système est supposé en régime permanent.

L'équation (4) devient :

$$1 = \frac{(\sum CI_i \cdot S_i) \cdot (P - ETR)}{Q_w} \quad (5)$$

Remarques :

1. Cette hypothèse garde un sens si la période d'hydrogramme considérée est suffisamment longue (minimum 1 an)
2. Si une partie d'eau souterraine est captée et exportée ( $Q_{out}$ ) en dehors du bassin, le volume exporté doit être ajouté au terme I·S.

L'équation (3) devient :

$$1 = \frac{(\sum CI_i \cdot S_i) \cdot (P - ETR)}{Q_w + Q_{out}} \quad (6)$$

Par exemple, si le bassin comporte des surfaces définies par l'extension des calcaires, des grès et des schistes, l'équation (3) s'écrit :

$$1 = \frac{(CI_{calcaires} \cdot S_{calcaires} + CI_{grès} \cdot S_{grès} + CI_{schistes} \cdot S_{schistes}) \cdot (P - ETR)}{Q_w + Q_{out}} \quad (7)$$

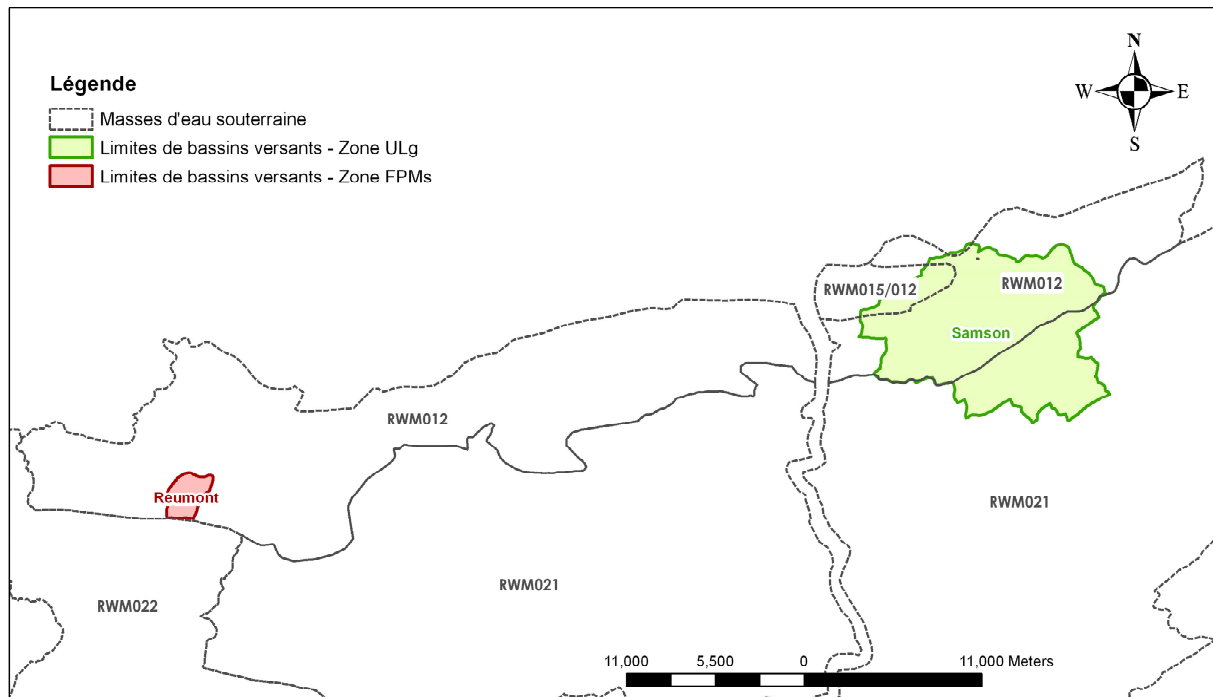
Enfin, les termes de variation de stock d'eau dans le sol et dans la nappe doivent être pris en compte dans le calcul de cette équation car ils représentent une part de l'eau utile ou du débit total ruisselé. L'équation (4) s'écrit alors :

$$1 = \frac{(CI_{calcaires} \cdot S_{calcaires} + CI_{grès} \cdot S_{grès} + CI_{schistes} \cdot S_{schistes}) \cdot (P - ETR)}{Q_w + Q_{out} \pm \Delta res \pm \Delta stock} \quad (8)$$

La détermination des inconnues  $CI_i$  nécessite d'écrire  $i$  équations établies pour au minimum  $i$  bassins différents présentant des terrains similaires afin de résoudre le système d'équations. Toutefois, deux problèmes numériques peuvent se poser : (1) le système d'équation peut être mathématiquement « mal conditionné » (coefficients multipliant les inconnues sont d'ordres de grandeur différents dans les équations à résoudre) ce qui induit des problèmes numériques dans la résolution du système ; (2) le système d'équation peut compter plus d'équations que d'inconnues impliquant alors une procédure itérative pour converger vers une solution optimisée (résidu minimum pour l'ensemble des équations).

### 3 Bilans hydrologiques

La masse d'eau souterraine RWM012 désignée « Calcaires du bassin de la Meuse bord Sud » s'étend de Huy à Lobbes en longeant la Meuse et la Sambre. Deux bassins et quatre sous bassins ont été étudiés et sont repris ci après, avec une localisation du bassin et une discussion des résultats obtenus.

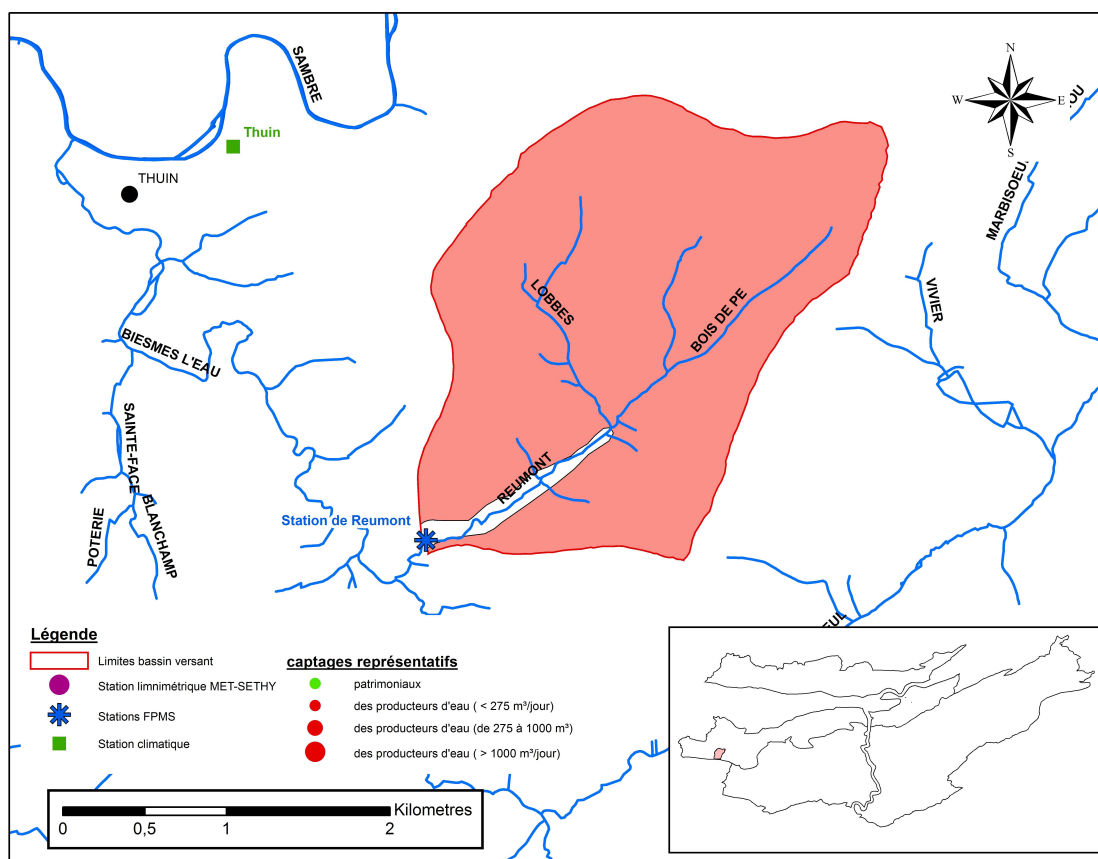


**Figure 2.3-1: Localisation des bassins versants étudiés dans la RWM012**

#### 3.1 Bilan hydrologique pour le bassin de Reumont (station Synclin'eau)

Le bassin versant de Reumont est un petit bassin d'une superficie de 5,5 km<sup>2</sup> (Figure 3.1-1), et appartient au bassin versant de la Sambre. Le ruisseau de Reumont est un affluent direct de la Biesmes et est situé au Sud-Ouest de la masse d'eau souterraine RWM012. Géologiquement, il possède la particularité de n'être composé exclusivement que de terrains silto-gréseux du Dévonien inférieur. Ces terrains appartiennent à l'unité hydrogéologique « aquiclude du Dévonien inférieur ». Ils présentent donc une conductivité hydraulique faible. Les écoulements souterrains, s'ils ont lieu, seraient alors restreints.

Le bassin versant investigué est limité à la station limnigraphique « Reumont » mise en place au cours de cette étude. Les données sont disponibles de juillet 2007 à septembre 2008. Aucun captage n'est présent dans ce bassin.



**Figure 3.1-1 : Bassin du Reumont avec indication des captages et des différentes stations météorologiques et limnimétriques utilisées dans le cadre du calcul du bilan.**

Le bilan hydrologique calculé pour la période d'août 2007 à août 2008 en négligeant les variations des réserves ( $\Delta R = \Delta S = 0$ ) donne les valeurs annuelles moyennes suivantes :

$$\begin{aligned}
 P &= ETR + Q_{\text{Reumont}} + \epsilon_{\text{fermeture}} \\
 1087,3 \text{ mm} &= 718,5 \text{ mm} + 254,6 \text{ mm} + 114,1 \text{ mm} \\
 100 \% &= 66 \% + 24 \% + 10 \%
 \end{aligned}$$

Les précipitations moyennes annuelles dans le bassin du Reumont sont d'environ 1080 mm. L'évapotranspiration réelle atteint 66 % des précipitations. Les 34 % restants correspondent à l'eau utile soit la quantité d'eau disponible pour le ruissellement et l'infiltration. Celle-ci est généralement positive entre novembre et mars. La lame d'eau écoulee à l'exutoire du bassin représente 24 % des précipitations. Aucun captage n'est présent dans ce bassin. Le terme de bouclage représente 10,5 % du volume des précipitations. Ce bilan présente donc un caractère légèrement déficitaire. Ce déficit est en toute vraisemblance lié aux incertitudes inhérentes au calcul des différents termes du bilan (généralement égal à 10 %), plutôt qu'à une perte d'eau réelle vers les bassins adjacents. En effet, étant

donnée le substrat géologique à caractère imperméable du bassin, les écoulements souterrains devraient être faibles et ne peuvent pas à eux seuls représenter 10 % des précipitations annuelles.

### 3.2 Bilan hydrologique pour le bassin du Samson

#### 3.2.1 *Description générale du bassin du Samson*

Le bassin hydrographique du Samson, d'orientation SE-NW, occupe une surface de 117 km<sup>2</sup>. Il est limité à la station Synclin'EAU S4\_Confluence située à environ 300 mètres de la confluence avec la Meuse. Le bassin du Samson s'étend à la fois sur les masses d'eau souterraines RWM021 et RWM012.

Le bassin du Samson s'étend sur les synclinoria de Dinant et de Namur, constitués principalement de formations calcaires et schisto-gréseuses. Ces deux grands ensembles sont séparés par les formations schisto-gréseuses du Dévonien inférieur et du Cambro-Silurien correspondant à la bande calédonienne. La limite entre les masses d'eau souterraine RWM012 et RWM021 traverse les formations du Dévonien inférieur en suivant la ligne de crête topographique (voir Figure 3.2-1). Le bassin versant du Samson draine :

- Au Sud, l'alternance d'aquifères calcaires carbonifères et d'aquifères gréseux du Famennien caractéristique du Condroz ;
- Au centre, l'aquitard de grès du Dévonien inférieur et l'aquitard schisto-gréseux du socle Cambro-Silurien. ;
- Au Nord, l'aquifère des calcaires carbonifères partiellement dissimulé sous une couverture de terrains schisto-gréseux houillers.

Dans le cadre de ce projet, quatre stations limnimétriques ont été installées sur le Samson. Elles portent les numéros S1 à S4, d'amont en aval et définissent ainsi des bassins versants gigognes. Ce bassin inclut également la station limnimétrique de Mozet (DGRNE - réseau Aqualim), qui a servi de base pour le calcul des bilans historiques. Les trois dernières stations S3\_Wanet, Aqualim\_Mozet et S4\_Confluence se situent dans la masse d'eau souterraine RWM012. Toutefois, les bassins versants délimités par ces trois stations débordent dans la masse d'eau RWM021.

Les bassins versants délimités par les stations S1\_Vaux et S2\_Gramptinne sont inclus dans la masse d'eau souterraine RWM021 et sont repris dans le livrable D3.12 relatif RWM021 et non dans le présent livrable.

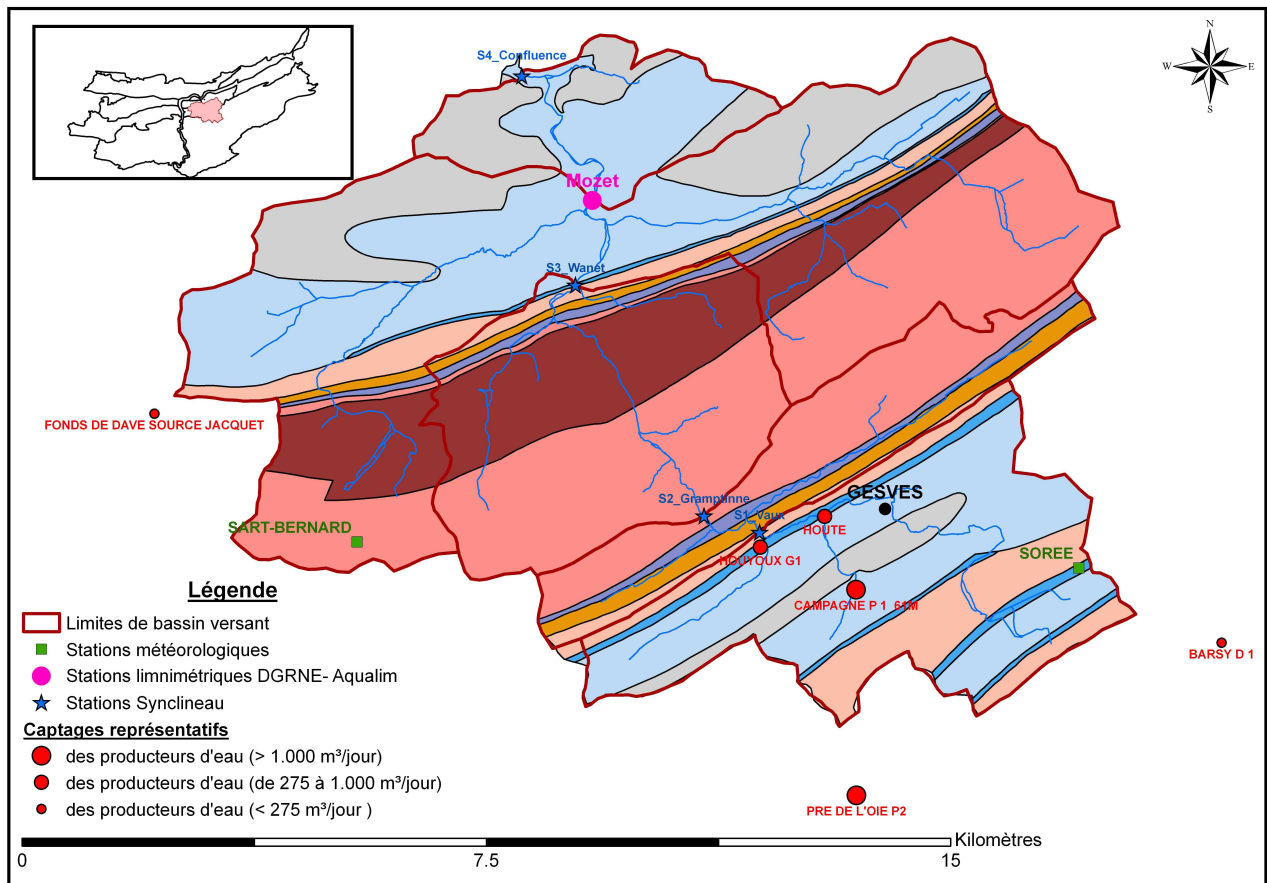


Figure 3.2-1 : Bassin hydrographique du Samson avec indication des captages et des différentes stations météorologiques et limnimétriques utilisées dans le cadre du calcul du bilan.

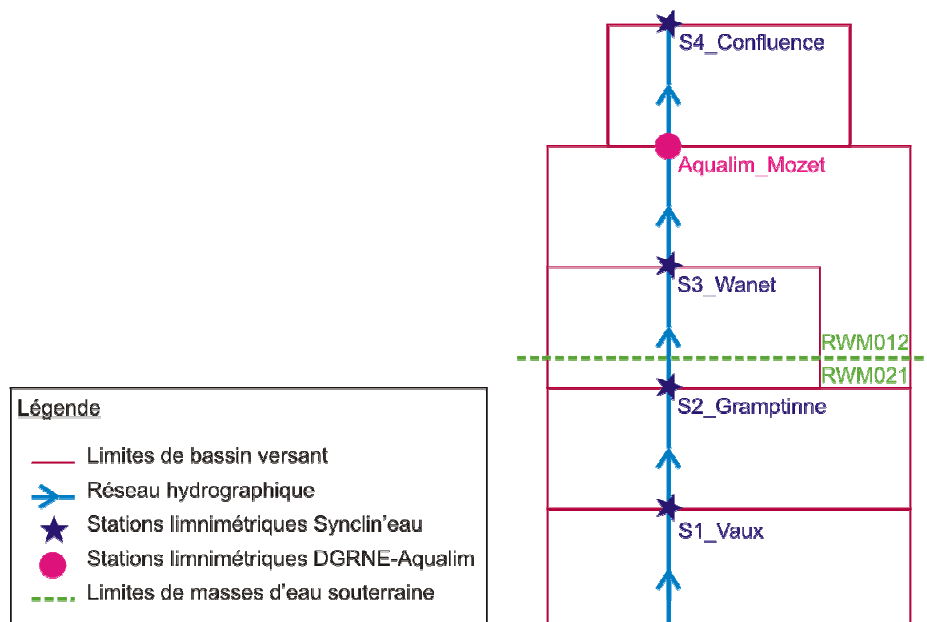


Figure 3.2-2 : Schéma synoptique des sous-bassins appartenant au bassin du Samson, avec limites des masses d'eau souterraine.

### 3.2.2 Inventaire des volumes d'eau importés et exportés

Les calcaires carbonifères sont exploités dans le synclinal de Gesves, au Sud du bassin, par trois captages de la SWDE : les captages de Gesves – Hoûte, de Gesves – Houyoux et d'Assesse – Campagne. Les volumes prélevés à ces trois prises d'eau atteignent pour l'année 2007 respectivement 289 000, 98 000 et 567 000 m<sup>3</sup>

Les transferts entre le bassin du Samson et les bassins extérieurs ont été déterminés sur base des résultats de l'étude des LGIH (Monjoie, 1998) portant sur la période 1985 – 1996. Les volumes échangés considérés dans les bilans suivants ont été extrapolés pour les périodes non couvertes par l'étude (1997 – 2007) en s'appuyant sur les volumes effectivement captés au cours de cette période.

Les transferts sont les suivants :

- Importations : transfert du Bocq vers le Samson au départ du captage d'Assesse – Pré de l'Oie (environ 86 000 m<sup>3</sup>/an) ;
- Exportations : transfert du Samson vers la Meuse (environ 169 000 m<sup>3</sup>/an)<sup>1</sup> au départ des trois captages de la SWDE et du Samson vers le Hoyoux au départ du captage d'Assesse – Campagne (environ 165 000 m<sup>3</sup>/an).

Les volumes exportés sont donc supérieurs aux quantités importées dans le bassin.

### 3.2.3 Station Synclin'EAU S3\_Wanet

Le bassin hydrographique que délimite la sonde S3\_Wanet a une superficie de 56,4 km<sup>2</sup>. Il est constitué au Nord d'une bande de sédiments détritiques gréseux du Devonien inférieur et de schistes du socle cambro-silurien correspondant à la bande calédonienne ; et au Sud des bassins délimités par les sondes S1\_Vaux et S2\_Gramptinne inclus dans la masse d'eau souterraine RWM021 et constitués de l'alternance de calcaires carbonifères et de grès du Famennien caractéristique du Condroz.



Le bilan calculé pour l'année hydrologique allant d'octobre 2006 à septembre 2007 donne les valeurs suivantes :

|       |         |                  |                   |                 |                 |                                         |
|-------|---------|------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------------------------------|
| P     | = ETR   | + $\Delta$ Stock | + $Q_{S3\_Wanet}$ | - $Q_{importé}$ | + $Q_{exporté}$ | + $\Delta$ Res + $\epsilon_{fermeture}$ |
| 952,6 | = 600,9 | + 56,0           | + 255,0           | - 0,8           | + 11,5          | + 26,0 -3,9[mm]                         |
| 100 % | = 63 %  | + 6 %            | + 27 %            | - < 1%          | + 1 %           | + 3 % - < 1%                            |

L'évapotranspiration réelle atteint 63 % des précipitations. Les 37 % restants correspondent à l'eau utile soit la quantité d'eau disponible pour le ruissellement et l'infiltration. La lame d'eau écoulée à l'exutoire du bassin représente 27 % des précipitations. L'erreur finale est inférieure au pourcent ce qui indique qu'à priori, peu ou aucun transfert d'eau souterraine ne se produit entre ce bassin et les bassins adjacents. Les éventuels transferts à partir du bassin du Hoyoux vers le bassin du Bocq supposés grâce au bilan effectué sur la station S2\_Gramptinne (cf. livrable D3.12 RWM021) n'auraient alors que peu d'influence car ils seraient englobés dans un bassin de superficie plus étendue.

### 3.2.4 Station Aqualim\_Mozet

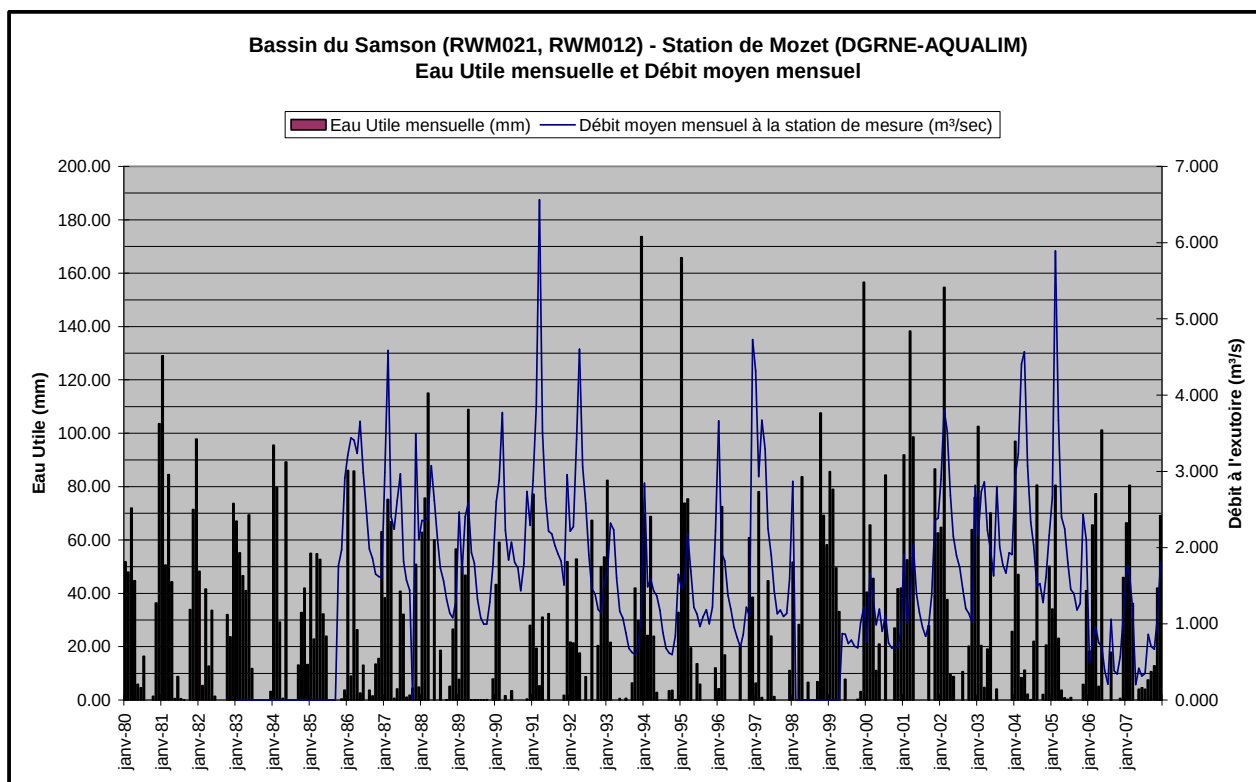
Le bassin hydrographique que délimite la sonde Aqualim de Mozet a une superficie de 107,3 km<sup>2</sup>. Il englobe les bassins amont précédemment décrits ainsi que deux des plus importants affluents du Samson soit le ruisseau de Tronquoi à l'Ouest et le ruisseau de Strouvia à l'Est. Ces affluents prennent leurs sources dans la bande calédonienne avant de s'écouler sur des calcaires carbonifères.

Le bilan hydrologique calculé pour la période de 1983 à 2007 en négligeant les variations de réserves ( $\Delta R = \Delta S = 0$ ) donne les valeurs annuelles moyennes suivantes :

|          |            |               |                 |                          |
|----------|------------|---------------|-----------------|--------------------------|
| P        | = ETR      | + $Q_{Mozet}$ | + $Q_{exporté}$ | + $\epsilon_{fermeture}$ |
| 852,1 mm | = 520,5 mm | + 264,1 mm    | + 2,8 mm        | + 66,1 mm                |
| 100 %    | = 61 %     | + 31 %        | + < 1%          | + 8 %                    |

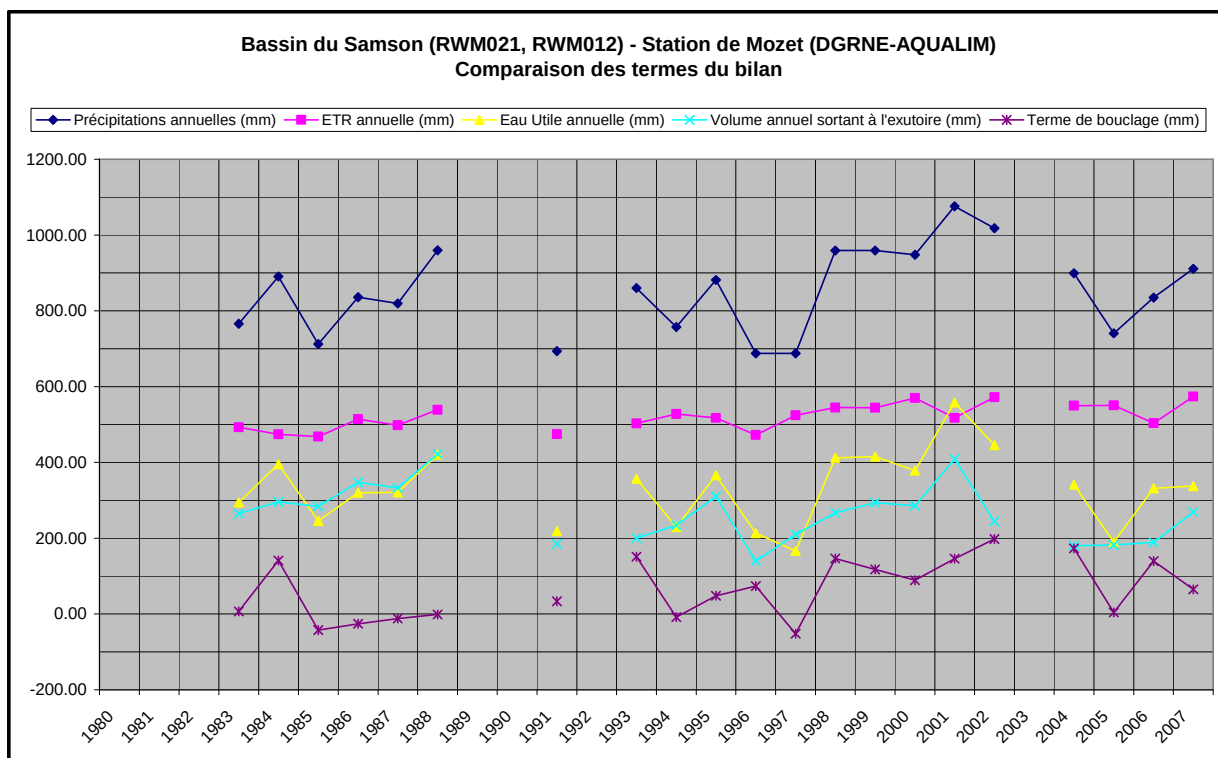
Les précipitations moyennes annuelles dans le bassin Aqualim\_Mozet sont d'environ 850 mm. L'évapotranspiration réelle atteint 61 % des précipitations. Les 39 % restants correspondent à l'eau utile soit la quantité d'eau disponible pour le ruissellement et l'infiltration. Celle-ci est généralement non nulle entre novembre et mars (voir Figure 3.2-3). La lame d'eau écoulée à l'exutoire du bassin représente 31 % des précipitations. Concernant les captages, la résultante des échanges entre le bassin du Samson et les bassins adjacents devient négligeable (< 1%). L'erreur de fermeture représente 8 %

du volume des précipitations. Ce bilan présente donc un caractère légèrement déficitaire avec une erreur de fermeture traduisant une quantité d'eau quittant le bassin.

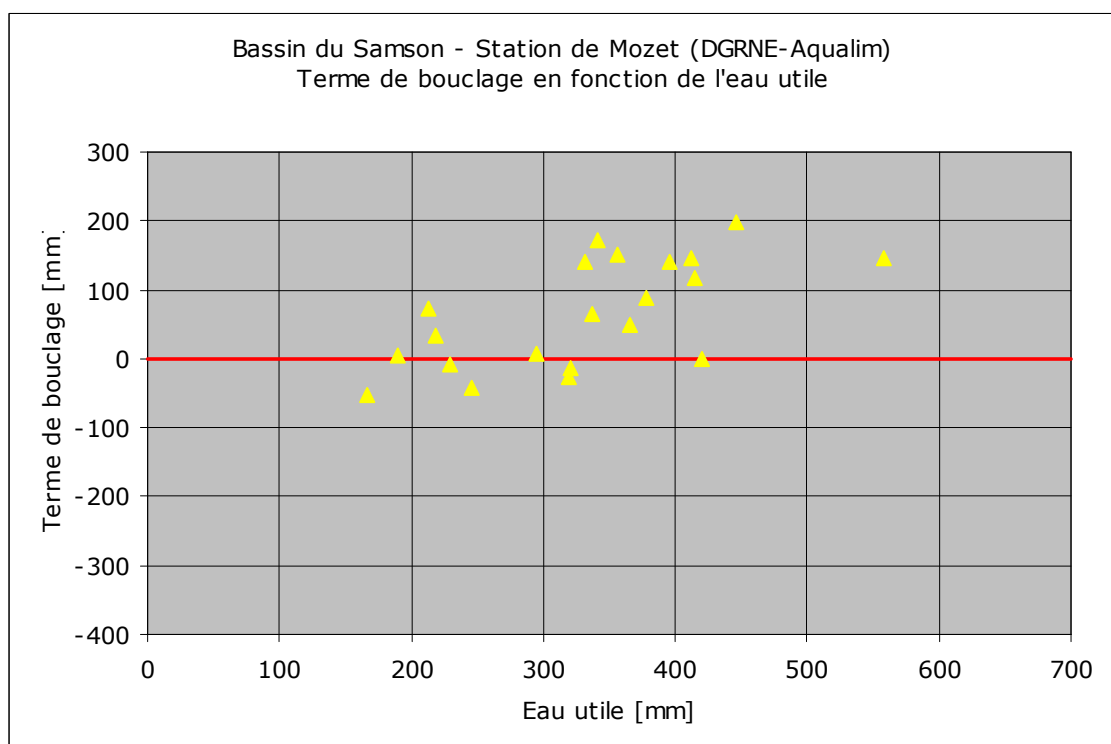


**Figure 3.2-3 : Débit moyen mensuel à l'exutoire du bassin et eau utile calculée sur base de l'algorithme modifié de Thornthwaite.**

L'analyse des bilans annuels (voir Tableau 3-1 et) indique que ceux-ci sont généralement déficitaires à l'exception des années 1985 à 1989, 1994 et 1997 où des bilans excédentaires sont observés. Les déficits d'écoulements les plus importants sont observés lors des années à pluviométrie moyenne à élevée (1984, 1993, 1998 à 2004). Ils prennent vraisemblablement leur source dans l'absence de prise en compte des variations des réserves du sol et du sous-sol. Un léger flux sortant devrait toutefois être considéré comme le suggère l'examen des termes de bouclage en fonction de l'eau utile. En effet le bilan est majoritairement déficitaire quelque soient les valeurs d'eau utile.



**Figure 3.2-4 : Comparaison des termes de bouclage du bilan pour e bassin du Samson, station Aqualim de Mozet.**



**Figure 3.2-5 : Terme de bouclage en fonction de l'eau utile pour la station DGRNE-Aqualim de Mozet.**

| <u>ANNEE</u> | <u>Pluies (mm)</u> | <u>ETR annuelle (mm)</u> | <u>Eau Utile annuelle (mm)</u> | <u>Volume annuel sortant à l'exutoire (mm)</u> | <u>Export par captage (mm)</u> | <u>Delta (mm)</u> | <u>% Delta (fonction des pluies)</u> |
|--------------|--------------------|--------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------|--------------------------------------|
| 1980         |                    |                          |                                |                                                |                                |                   |                                      |
| 1981         |                    |                          |                                |                                                |                                |                   |                                      |
| 1982         |                    |                          |                                |                                                |                                |                   |                                      |
| 1983         | 765.7              | 492.9                    | 294.2                          | 264.7                                          | 1.4                            | 6.6               | 0.9%                                 |
| 1984         | 890.5              | 473.8                    | 395.3                          | 296.0                                          | 1.4                            | 140.8             | 15.8%                                |
| 1985         | 712.1              | 468.2                    | 245.5                          | 283.8                                          | 1.4                            | -42.8             | -6.0%                                |
| 1986         | 835.9              | 514.4                    | 319.9                          | 347.4                                          | 1.5                            | -25.8             | -3.1%                                |
| 1987         | 819.1              | 498.4                    | 320.8                          | 332.9                                          | 0.1                            | -12.2             | -1.5%                                |
| 1988         | 959.6              | 539.0                    | 420.5                          | 421.9                                          | 0.2                            | -1.6              | -0.2%                                |
| 1989         |                    |                          |                                |                                                |                                |                   |                                      |
| 1990         |                    |                          |                                |                                                |                                |                   |                                      |
| 1991         | 693.3              | 474.5                    | 218.8                          | 185.2                                          | 0.2                            | 33.4              | 4.8%                                 |
| 1992         |                    |                          |                                |                                                |                                |                   |                                      |
| 1993         | 860.0              | 503.2                    | 356.8                          | 200.1                                          | 5.5                            | 151.1             | 17.6%                                |
| 1994         | 757.1              | 527.7                    | 229.5                          | 234.2                                          | 3.7                            | -8.5              | -1.1%                                |
| 1995         | 881.3              | 517.4                    | 365.8                          | 310.3                                          | 3.6                            | 48.1              | 5.5%                                 |
| 1996         | 687.7              | 472.4                    | 213.4                          | 140.2                                          | 3.6                            | 73.3              | 10.7%                                |
| 1997         | 687.9              | 524.3                    | 166.2                          | 209.6                                          | 3.7                            | -52.2             | -7.6%                                |
| 1998         | 959.0              | 544.5                    | 411.9                          | 267.0                                          | 3.7                            | 146.4             | 15.3%                                |
| 1999         | 958.8              | 543.9                    | 414.9                          | 293.7                                          | 3.7                            | 117.6             | 12.3%                                |
| 2000         | 947.9              | 569.7                    | 378.3                          | 285.7                                          | 3.7                            | 88.9              | 9.4%                                 |
| 2001         | 1075.7             | 517.6                    | 558.1                          | 408.8                                          | 3.7                            | 145.6             | 13.5%                                |
| 2002         | 1017.8             | 571.8                    | 445.9                          | 244.4                                          | 3.7                            | 197.8             | 19.4%                                |
| 2003         |                    |                          |                                |                                                |                                |                   |                                      |
| 2004         | 898.9              | 549.8                    | 341.1                          | 180.4                                          | 3.7                            | 173.2             | 19.3%                                |
| 2005         | 740.6              | 550.6                    | 190.0                          | 182.2                                          | 3.7                            | 4.2               | 0.6%                                 |
| 2006         | 835.0              | 503.3                    | 331.7                          | 188.8                                          | 3.5                            | 139.4             | 16.7%                                |
| 2007         | 911.1              | 573.6                    | 337.6                          | 268.8                                          | 3.5                            | 65.3              | 7.2%                                 |
| MOYENNE      | 852.2              | 520.5                    | 331.2                          | 264.1                                          | 2.8                            | 66.1              | 7.1%                                 |

**Tableau 3-1 : Bilans hydrologiques annuels calculés pour le bassin du Samson**

Le bilan calculé pour l'année hydrologique allant d'octobre 2006 à septembre 2007 donne les valeurs suivantes :

|       |         |          |                      |                        |                        |                                |
|-------|---------|----------|----------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------|
| P     | = ETR   | + ΔStock | + Q <sub>Mozet</sub> | - Q <sub>importé</sub> | + Q <sub>exporté</sub> | +ΔRes + ε <sub>fermeture</sub> |
| 928,6 | = 610,5 | + 58,7   | + 230,9              | - 0,7                  | + 3,5                  | + 53,2 -27,5[mm]               |
| 100 % | = 66 %  | + 6 %    | + 25 %               | - < 1%                 | + < 1 %                | + 6 % - 3%                     |

L'évapotranspiration réelle atteint pour ce bassin 66 % des précipitations. Les 34 % restants correspondent à l'eau utile soit la quantité d'eau disponible pour le ruissellement et l'infiltration. La lame d'eau écoulee à l'exutoire du bassin représente 25 % des précipitations. L'intégration des valeurs de variation de stock du sol et de réserves dans l'aquifère permet de limiter l'erreur finale à un léger excédent de 3 %. La comparaison de ce bilan avec le bilan historique montre que les variations de stock et de réserves représentent des volumes non négligeables dans l'établissement d'un bilan hydrologique. Des échanges restreints d'eau souterraine auraient lieu entre le bassin du Samson et les bassins adjacents, vraisemblablement via les calcaires carbonifères du synclinorium de Namur en direction de la Meuse vers l'Ouest. Le fait que le bilan historique soit déficitaire et que le bilan Synclin'EAU annuel soit excédentaire ne permet pas à ce jour de préciser le sens de ces écoulements.

### 3.2.5 Station Synclin'EAU S4\_Confluence

Le bassin hydrographique que délimite la station S4\_Confluence a une superficie de 117 km<sup>2</sup>. Il reprend la quasi-totalité du bassin du Samson à l'exception de quelques centaines de mètres carrés à l'extrémité aval.

Le bilan calculé pour l'année hydrologique allant d'octobre 2006 à septembre 2007 donne les valeurs suivantes :

|       |        |          |                              |                        |                        |                                |
|-------|--------|----------|------------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------|
| P     | = ETR  | + ΔStock | + Q <sub>S4_Confluence</sub> | - Q <sub>importé</sub> | + Q <sub>exporté</sub> | +ΔRes + ε <sub>fermeture</sub> |
| 922,6 | = 612  | + 59,3   | + 213,5                      | - 0,7                  | + 3                    | + 18,5 -17,2[mm]               |
| 100 % | = 66 % | + 6 %    | + 23 %                       | - < 1%                 | + < 1 %                | + 2 % - 2 %                    |

L'évapotranspiration réelle atteint 66 % des précipitations. Les 34 % restants correspondent à l'eau utile soit la quantité d'eau disponible pour le ruissellement et l'infiltration. La lame d'eau écoulee à l'exutoire du bassin représente 27 % des précipitations. Alors qu'un flux sortant vers la Meuse via les calcaires carbonifères de l'extrémité nord du bassin avait été suspecté, l'erreur finale du bilan est de 2 %. Les flux d'eau souterrains semblent donc être inexistants ou éventuellement équilibrés entre volumes entrants et sortants.

### 3.2.6 Conclusions générales relatives au bassin du Samson

Le bilan établi sur base d'années calendrier grâce aux données historiques présente un caractère moyen légèrement déficitaire. Le bilan effectué sur une année hydrologique est quant à lui faiblement excédentaire. Les termes de bouclage ont cependant des valeurs assez faibles ne laissant présager que des échanges restreints d'eau souterraine avec les bassins adjacents. De tels échanges avaient été suspectés vers la plaine alluviale de la Meuse par le biais de la masse de calcaires carbonifère située au Nord du bassin. Cette hypothèse n'a pas pu être confirmée de manière évidente par les bilans hydrologiques et le sens de ces échanges reste incertain.

Par contre il semble qu'une quantité d'eau transite par les synclinaux calcaires du sous bassin S1\_Vaux (cf. livrable D3.12 RWM021) à partir du bassin du Hoyoux et vers le bassin du Bocq. Selon toute vraisemblance, les flux sortant du bassin du Samson vers le bassin du Bocq seraient compensés par des flux entrants provenant du bassin du Hoyoux.

Les termes de bouclage des différents bilans ne dépassent jamais les 3 %. Ceci signifie que les transferts d'eau via l'écoulement souterrain, à l'exception de celui en provenance du Hoyoux et vers le Bocq, ne concernent annuellement que de faibles volumes, ceci tant entre le bassin du Samson et les bassins adjacents qu'entre les sous bassins délimités par les stations de mesure mises en place pour cette étude.

### 3.3 Conclusions générales

Le calcul de bilans hydrogéologiques sur les bassins hydrographiques de la masse d'eau souterraine RWM012 a permis de caractériser relativement précisément les quantités d'eau en jeu dans leurs cycles hydriques. Les précipitations annuelles sur l'ensemble de la masse d'eau RWM012 varient entre 950 et 1050 mm. L'évapotranspiration est le terme le plus important du bilan car elle retourne plus de 60% de l'eau à l'atmosphère, laissant au bassin 40% pour le ruissellement et l'infiltration. Le ruissellement représente 20 à 30% des précipitations annuelles. Les variations de stock d'eau du sol se situent au alentour des 6% alors que les variations de réserves sont de 3%.

Il est bien sûr malaisé de tirer des conclusions générales à l'échelle d'une masse d'eau souterraine sur base de bilans hydrologiques établis sur deux bassins éloignés. Toutefois il est raisonnable d'affirmer que le transfert d'eau souterraine entre bassin hydrographique s'effectue préférentiellement via les calcaires du Carbonifère. Ceci ayant été mis en évidence dans les extrémités amont et aval du bassin versant du Samson.

## 4 Estimation des ressources renouvelables de la RMW012

### 4.1 Introduction

Les ressources renouvelables en eau souterraine représentent le flux moyen (et non un stock) d'eau qui s'infiltré annuellement dans le sol pour atteindre la zone saturée des terrains. Ces ressources doivent être estimées sur de longues périodes. L'évaluation des ressources renouvelables est en général délicate à réaliser. Cela demande en effet de calculer non pas l'eau utile mais la composante de l'eau utile qui recharge effectivement la nappe ( $R_{nappe} = P - ETR - \text{Ruissellement}$ ).

Afin d'estimer les ressources renouvelables à l'échelle des masses d'eau, une méthode « exploratrice » a été développée lors du projet. Cette méthode prend pour hypothèse l'assimilation du débit de base à l'infiltration, et, via un raisonnement mathématique, tente de répondre à deux difficultés engendrées par le manque de disponibilité de données en tout point de la masse d'eau et par l'ampleur de la région étudiée. La méthode développée est une tentative d'estimation, sur des bassins de référence, de coefficients d'infiltration moyens propres aux différentes unités hydrogéologiques qui peuvent ensuite être extrapolés à l'ensemble de la masse d'eau. Ces coefficients permettent alors d'estimer les ressources renouvelables.

Les ressources renouvelables ne doivent pas être confondues avec les ressources exploitables. Une partie seulement de ces ressources renouvelables est exploitable du fait de différentes contraintes hydrogéologiques, hydrologiques, écologiques, environnementales, technico-économiques, politiques et sociales, et notamment le soutien du débit d'étiage des rivières. De plus, d'un point de vue hydrogéologique, les caractéristiques hydrogéologiques, telle que la conductivité hydraulique des roches, ne permettent pas d'exploiter économiquement toutes les formations pour la production d'eau.

### 4.2 Détermination des coefficients d'infiltration

Une méthode d'estimation globale des ressources renouvelables par les coefficients d'infiltration est exposée au point 2.3 de ce rapport. Elle nécessite la détermination d'autant de coefficients d'infiltration moyens  $CI_i$  que de grande catégorie de terrains distingués pour cette estimation. L'équation utilisée est celle du bilan, exprimée de manière à identifier la recharge comme le produit d'un coefficient d'infiltration par la surface concernée. Elle est reprise ci-dessous (Point 2.3, Equation 6) :

$$\sum (CI_i \cdot S_i) \cdot (P - ETR) / (Q_w + Q_{out}) = 1$$

Les masses d'eau RWM021, RWM012 et RWM011 et RWM023 présentent des terrains de natures lithologiques similaires. Pour ces masses d'eau, 5 coefficients  $CI_i$  peuvent être définis, regroupant certaines formations aux propriétés hydrodynamiques semblables :

- $CI_{cc+hast}$  : coefficient d'infiltration pour l'aquifère des calcaires du Carbonifère et pour l'aquifère à niveaux aquicludes de l'Hastarien ;
- $CI_g$  : coefficient d'infiltration pour l'aquifère des grès du Famennien ;
- $CI_{cgf}$  : coefficient d'infiltration pour l'aquifère des calcaires du Givetien – Frasnien ;
- $CI_{h+a}$  : coefficient d'infiltration pour l'aquiclude à niveaux aquifères du Houiller et pour l'aquiclude du Famennien – Frasnien ;
- $CI_{ats+at}$  : coefficient d'infiltration pour l'aquitard à niveaux aquicludes du socle cambro-silurien et pour l'aquitard à niveaux aquicludes du Dévonien inférieur.

La détermination de ces coefficients nécessite d'écrire au minimum autant d'équations que d'inconnues  $CI_i$ , soit cinq équations.

Dans les masses d'eau concernées, 15 bassins ont été retenus, considérant que la connaissance et les données acquises sur ceux-ci étaient suffisamment fiables. Il s'agit, d'une part, des bassins sur lesquels les données couvrent des périodes suffisamment longues (point 3 du rapport) pour lisser les variations temporelles et spatiales, et d'autre part de bassins pour lesquels les données ont été acquises dans le cadre de l'étude et dont les résultats sont propices à l'expression d'une équation fiable. Il s'agit d'une sélection de bassins pour lesquels les résultats des bilans hydrogéologiques traduisent un certain équilibre de la nappe. Cet équilibre est indiqué par un terme de fermeture proche de 0 (à +/- 10%). La nappe du système n'est ni dans une phase de vidange (excès d'écoulement) ni dans une phase de recharge (déficit d'écoulement). On peut alors considérer que le débit de base à l'exutoire du bassin est fort proche de la quantité d'eau infiltrée.

Il s'agit des bassins suivants (cfr Point3):

1. Bassins dont l'historique des données (données MET-SETHY et Aqualim) est suffisamment long :
  - Samson
  - Yves
  - Bocq
  - Molignée
  - Hoyoux aval
  - Néblon
  - Brouffe (bassin situé dans la masse d'eau RWM023)
2. Bassins suivis dans le cadre de l'étude :
  - Reumont
  - S3 Wanet



- H1 PetitAvin
- L5990-Hoyoux
- S1-Vaux
- 01-Comblain
- 03-Haze
- 06-Oxhe

L'équation (6) est écrite pour chaque bassin sélectionné. Le Tableau 4.2-1 reprend l'ensemble de ces équations.

$$\sum (C_{li} \cdot S_i) \cdot (P - ETR) / (Q_w + Q_{out}) = 1$$

Pour chaque bassin, chacun des coefficients d'infiltration est multiplié par un terme multiplicateur qui reprend :

- $S_i$ , la surface à l'affleurement de l'unité hydrogéologique relative au coefficient d'infiltration ;
- $(P-ETR)$ ,  $Q_w$  et  $Q_{out}$ , relatifs à l'ensemble du bassin.

| MESO   | Nom du bassin | Type de bilan |                      |       |   |       |              |       |   |       |                  |       |   |       |                  |   |   |       |                     |   |
|--------|---------------|---------------|----------------------|-------|---|-------|--------------|-------|---|-------|------------------|-------|---|-------|------------------|---|---|-------|---------------------|---|
| RWM012 | Samson        | Historique    |                      | 0,647 |   | 0,234 |              | 0,062 |   | 0,33  |                  | 1,019 |   |       |                  |   |   |       |                     |   |
|        | Reumont       | Synclin'eau   |                      | 0     |   | 0     |              | 0     |   | 0     |                  | 5,153 |   |       |                  |   |   |       |                     |   |
|        | S3 Wanet      | Synclin'eau   |                      | 0,293 |   | 0,151 |              | 0,042 |   | 0,107 |                  | 0,512 |   |       |                  |   |   |       |                     |   |
| RWM021 | Yves          | Historique    | $Cl_{CC+hast} \cdot$ | 0,744 | + | 0,266 | $Cl_g \cdot$ | 0     | + | 0,68  | $Cl_{cgf} \cdot$ | 0     | + | 0,107 | $Cl_{h+a} \cdot$ | 0 | + | 0,004 | $Cl_{ats+at} \cdot$ | 0 |
|        | Bocq          | Historique    |                      | 0,635 |   | 0,647 |              | 0,02  |   | 0,107 |                  | 0     |   |       |                  |   |   |       |                     |   |
|        | Molignée      | Historique    |                      | 0,871 |   | 0,581 |              | 0     |   | 0,292 |                  | 0     |   |       |                  |   |   |       |                     |   |
|        | Hoyoux Aval   | Historique    |                      | 0,644 |   | 0,272 |              | 0,025 |   | 0,061 |                  | 0,056 |   |       |                  |   |   |       |                     |   |
|        | Néblon        | Historique    |                      | 0,735 |   | 0,292 |              | 0     |   | 0,21  |                  | 0     |   |       |                  |   |   |       |                     |   |
|        | H1 PetitAvin  | Synclin'eau   |                      | 0,761 |   | 0,233 |              | 0     |   | 0,031 |                  | 0     |   |       |                  |   |   |       |                     |   |
|        | L5990 -Hoyoux | Synclin'eau   |                      | 0,627 |   | 0,265 |              | 0,025 |   | 0,06  |                  | 0,055 |   |       |                  |   |   |       |                     |   |
|        | S1-Vaux       | Synclin'eau   |                      | 0,67  |   | 0,286 |              | 0     |   | 0,102 |                  | 0     |   |       |                  |   |   |       |                     |   |
|        | 01-Comblain   | Synclin'eau   |                      | 0,593 |   | 0,326 |              | 0     |   | 0     |                  | 0     |   |       |                  |   |   |       |                     |   |
|        | 03-Haze       | Synclin'eau   |                      | 0,008 |   | 0,733 |              | 0     |   | 0,429 |                  | 0,03  |   |       |                  |   |   |       |                     |   |
|        | 06-Oxhe       | Synclin'eau   |                      | 0,249 |   | 0,451 |              | 0,045 |   | 0,103 |                  | 0,11  |   |       |                  |   |   |       |                     |   |
| RWM023 | Brouffe       | Synclin'eau   |                      | 0     |   | 0     |              | 0     |   | 4,99  |                  | 0     |   |       |                  |   |   |       |                     |   |

**Tableau 4.2-1: Equations des bassins retenus.**

h : aquiclude à niveaux aquifères du Houiller ;  
cc : aquifère des calcaires carbonifères ;  
hast : aquifère, aquitard et aquiclude de l'Hastarien ;  
g : aquifère des grès du Famennien ;  
a : aquiclude du Famennien-Frasnien ;  
gf : aquifère des calcaires givetien-frasnien ;  
at : aquitard à niveaux aquicludes du Dévonien inférieur ;

ats : aquitard à niveaux aquicludes du socle cambro-silurien.

La résolution du système d'équations à cinq inconnues a été menée suivant une méthode mathématique.

#### 4.2.1 Détermination des coefficients d'infiltration par la méthode mathématique

Le système global à résoudre est un système de 15 équations linéaires à 5 inconnues, qui peut s'écrire sous la forme matricielle  $A.X = B$ , où  $X$  est le vecteur des solutions  $CI_i$ , et  $A$  la matrice des coefficients (voir tableau des équations des bassins retenus). Le nombre d'équations étant supérieur au nombre d'inconnues, le système est surdimensionné et ne possède pas de solution unique.

Dans un premier temps, la résolution directe par inversion de matrice a été tentée en sélectionnant des systèmes où le nombre d'équations était égal au nombre d'inconnues. Cependant cette méthode de résolution conduit à des valeurs non réalistes physiquement (valeurs négatives ou supérieures à 1). Par ailleurs, ces systèmes se trouvent être « mal conditionnés », c'est-à-dire qu'une faible perturbation des coefficients de la matrice  $A$  ou du vecteur  $B$  conduit à une solution tout à fait différente. Cette erreur rend la solution numérique inexploitable.

Dans un second temps, une méthode itérative a donc été employée sur le système global de 15 équations à 5 inconnues,  $A.X=B$  où  $B$  est le vecteur unitaire. Une fonction de Matlab a été utilisée afin de résoudre ce système et optimiser la solution au sens des moindres carrés (minimalisation de la norme euclidienne de  $A.X-B$ ). Cette fonction a l'avantage de permettre la spécification de contraintes, c'est-à-dire dans notre cas, de chercher des coefficients d'infiltration compris dans des fourchettes de valeurs plausibles admises au départ par les experts du groupe d'étude.

Ces fourchettes de valeurs plausibles ont été proposées de commun accord et de façon conventionnelle pour les différentes unités hydrogéologiques:

- Aquifère des calcaires carbonifères  
et aquifère, aquitard et aquiclude de l'Hastarien :  $0.7 \leq CI_{cc+hast} \leq 0.8$
- Aquifère des grès du Famennien:  $0.5 \leq CI_g \leq 0.7$
- Aquifère des calcaires givétiens-frasnien :  $0.7 \leq CI_{caf} \leq 0.9$
- Aquitards à niveaux aquicludes du socle  
Cambro-silurien et du Dévonien inférieur :  $0.1 \leq CI_{ats+as} \leq 0.3$
- Aquiclude à niveaux aquifères du Houiller

et aquiclude du Famennien-Frasnien :

$$0.1 \leq CI_{h+a} \leq 0.3$$

Les résultats obtenus mathématiquement sont les suivants :

| $CI_{cc+hast}$ | $CI_G$ | $CI_{Cgf}$ | $CI_{ats+at}$ | $CI_{h+a}$ |
|----------------|--------|------------|---------------|------------|
| 80 %           | 70 %   | 90 %       | 20.6 %        | 21.6 %     |

**Tableau 4.2-2: Estimation des coefficients d'infiltration par résolution matricielle.**

#### 4.2.2 Discussion sur la validité des coefficients d'infiltration

L'infiltration est un phénomène très complexe, qui dépend d'une série de facteurs variables dans l'espace et dans le temps. Elle dépend de la nature du substratum, mais aussi du taux et du type de couverture végétale, de la topographie, de l'urbanisation, du degré préalable de saturation dans le sol, de l'intensité des précipitations,... Pour une même unité hydrogéologique, le coefficient d'infiltration réel varie (localement) suivant la configuration de ces facteurs de bassin à bassin. On peut dès lors comprendre la difficulté à résoudre un système d'équation qui intègre plusieurs bassins différents.

Les coefficients d'infiltration sont déterminés pour des groupes d'unités hydrogéologiques, c'est-à-dire des regroupements de formations géologiques aux propriétés hydrodynamiques jugées globalement similaires. Cependant, il se trouve que certains des regroupements rassemblent des formations géologiques dans lesquelles la différence d'infiltration peut être marquée. C'est le cas, par exemple, de l'unité aquiclude du Famennien-Frasnien. Cette dernière est constituée de formations silto-gréseuses (formations de Esneux et de Souverain-Pré) considérées comme peu perméables et de formations schisteuses (formations de Neuville et de Famenne) qui le sont encore moins. L'infiltration sera, logiquement, plus importante dans les formations silto-gréseuses. L'infiltration propre à cette unité hydrogéologique sera différente d'un bassin à l'autre suivant la répartition des formations silto-gréseuses et schisteuses.

Comme signalé à la section 2.3, la détermination des coefficients d'infiltration se base sur l'hypothèse que les variations spatiales et temporelles des paramètres qui régissent l'infiltration réelle sont totalement lissées si on les considère sur de grandes surfaces et des périodes suffisamment longues. En réalité, à l'échelle d'une MESO, la variabilité des paramètres qui régissent l'infiltration peut varier significativement. Les coefficients d'infiltration déterminés constituent donc des moyennes pour la masse d'eau, auxquelles il faut idéalement associer un intervalle de confiance. Les valeurs des coefficients d'infiltration calculés, réintroduites dans les équations des bassins (Tableau 4.2-1), laissent penser que les coefficients amènent une marge certaine d'imprécision puisqu'idéalement, les valeurs

recalculées au second membre devraient être égales à 1. Cette imprécision peut être quantifiée en calculant un intervalle de confiance qui dépend de la distribution statistique des valeurs du second membre.

La distribution des valeurs (colonne « Résultat » du tableau 1.2.3) calculées au second membre permet d'estimer une valeur moyenne ainsi que la dispersion autour de cette moyenne, en prenant l'hypothèse d'une distribution gaussienne.

Le poids statistique de chacune de ces valeurs est dépendant de l'importance du bassin associé. Cette importance est principalement liée à la superficie du bassin, ce qui permet de définir une moyenne pondérée des résultats et l'écart type pondéré de la distribution par les relations suivantes :

$$\text{Moyenne pondérée (MP)} = \sum \text{résultat}_i \cdot S_i / \sum S_i$$

$$\text{Ecart type pondéré} = \sqrt{\sum [(\text{résultat}_i - \text{MP})^2 \cdot S_i] / \sum S_i}$$

où -  $\text{résultat}_i$  est la valeur du second membre pour le bassin i,  
-  $S_i$  est la surface du bassin i.

| MESO   | Nom du bassin | Type bilan  | 0,8   |  | 0,7   |  | 0,9   |  | 0,216 |  | 0,206 |  | Résultat |
|--------|---------------|-------------|-------|--|-------|--|-------|--|-------|--|-------|--|----------|
| RWM012 | Samson        | Historique  | 0,647 |  | 0,234 |  | 0,062 |  | 0,33  |  | 1,019 |  | 1,018    |
|        | Reumont       | Synclin'eau | 0     |  | 0     |  | 0     |  | 0     |  | 5,153 |  | 1,062    |
|        | S3 Wanet      | Synclin'eau | 0,293 |  | 0,151 |  | 0,042 |  | 0,107 |  | 0,512 |  | 0,506    |
| RWM021 | Yves          | Historique  | 0,744 |  | 0,266 |  | 0     |  | 0,68  |  | 0     |  | 0,928    |
|        | Bocq          | Historique  | 0,635 |  | 0,647 |  | 0,02  |  | 0,107 |  | 0,004 |  | 1,003    |
|        | Molignée      | Historique  | 0,871 |  | 0,581 |  | 0     |  | 0,292 |  | 0     |  | 1,167    |
|        | Hoyoux Aval   | Historique  | 0,644 |  | 0,272 |  | 0,025 |  | 0,061 |  | 0,056 |  | 0,753    |
|        | Néblon        | Historique  | 0,735 |  | 0,292 |  | 0     |  | 0,21  |  | 0     |  | 0,838    |
|        | H1 PetitAvin  | Synclin'eau | 0,761 |  | 0,233 |  | 0     |  | 0,031 |  | 0     |  | 0,779    |
|        | L5990 -Hoyoux | Synclin'eau | 0,627 |  | 0,265 |  | 0,025 |  | 0,06  |  | 0,055 |  | 0,734    |
|        | S1-Vaux       | Synclin'eau | 0,67  |  | 0,286 |  | 0     |  | 0,102 |  | 0     |  | 0,758    |
|        | 01-Comblain   | Synclin'eau | 0,593 |  | 0,326 |  | 0     |  | 0     |  | 0     |  | 0,703    |
|        | 03-Haze       | Synclin'eau | 0,008 |  | 0,733 |  | 0     |  | 0,429 |  | 0,03  |  | 0,618    |
|        | 06-Oxhe       | Synclin'eau | 0,249 |  | 0,451 |  | 0,045 |  | 0,103 |  | 0,11  |  | 0,600    |
| RWM023 | Brouffe       | Synclin'eau | 0     |  | 0     |  | 0     |  | 4,99  |  | 0     |  | 1,078    |

Ecart-type pondéré: 0,164  
 Moyenne pondéré: 0,889

**Tableau 4.2-3 : Estimation de la marge d'erreur associée au calcul des ressources renouvelables.**

La moyenne pondérée par les surfaces est de 0.889 et l'écart-type pondéré de 0.164 (ou 18,4 %).

L'incertitude liée à la méthode peut alors être exprimée grâce à la valeur de l'écart type pondéré. En prenant deux fois l'écart-type autour de la valeur calculée, la confiance à accorder à l'intervalle est statistiquement de 95 % (en prenant l'hypothèse que les écarts suivent une loi de Gauss). Les différentes estimations réalisées ci-dessous sont alors accompagnées d'une incertitude de +/- 37 %.

#### 4.2.3 Estimation des ressources renouvelables pour la MESO RWM012

A partir des coefficients d'infiltration calculés, on peut estimer la recharge annuelle de la MESO RWM012. La recharge est définie comme étant la quantité d'eau infiltrée à travers le sol pour rejoindre la nappe, c'est la composante de l'« eau utile » qui recharge effectivement la nappe. On peut l'écrire de différentes manières:

$$\text{Recharge} = P - \text{ETR} - \text{Ruissellement}$$

$$\text{Recharge} = \text{EU} - \text{Ruissellement}$$

$$\text{Recharge} = \text{CI.EU}$$

Pour la MESO RWM012, il suffit d'introduire les coefficients d'infiltration dans l'équation (6). L'eau utile annuelle utilisée a été calculée pour l'ensemble de la MESO, de la même manière que dans le calcul des bilans, avec le logiciel WaterBudget. Le Tableau 4.2-4 reprend les valeurs de recharge annuelle calculées pour la période de 1980 à 2007. La recharge annuelle varie en fonction de l'eau utile (voir Figure 4.2-1), elle a été la moins importante pour l'année 2005 où elle est estimée à 13 (+/- 4.8) millions de m<sup>3</sup>, et la plus importante pour l'année 2001 avec 95 (+/- 35) millions de m<sup>3</sup>.

Les ressources renouvelables en eau souterraine sont définies comme étant le flux d'eau annuel **moyen** qui s'infiltré dans le sol pour atteindre la zone saturée des terrains. L'estimation des ressources renouvelables pour la masse d'eau RWM012 correspond à la moyenne de la recharge annuelle sur une période de 27 ans : 52 millions de m<sup>3</sup> avec une incertitude de +/- 37% soit :

**52 (+/-19) millions de m<sup>3</sup> d'eau par an**

**Il faut rappeler qu'une partie seulement de ces ressources naturelles est exploitable du fait de différentes contraintes hydrogéologiques, hydrologiques, écologiques et technico-économiques.**

En raison de l'importance que peut avoir un tel chiffre sur la gestion des ressources en eau et de l'incertitude élevée liée à l'estimation de ces ressources, on peut conseiller, par prudence, d'utiliser comme valeur des ressources renouvelables, une estimation « basse » des ressources renouvelables qui consiste à considérer la valeur la plus basse de l'estimation engendrée par le degré d'incertitude (52 millions de m<sup>3</sup> - 37%, voir Figure 4.2-1) soit :

**Estimation «basse » des ressources renouvelables  
= 33 millions de m<sup>3</sup> d'eau par an**

| RWM012 |         |                                          |                                         |
|--------|---------|------------------------------------------|-----------------------------------------|
|        | EU (mm) | Recharge annuelle répartie +/- 37 % (mm) | Recharge annuelle +/- 37% (millions m³) |
| 1980   | 409,247 | 139,0                                    | 66                                      |
| 1981   | 501,842 | 170,5                                    | 81                                      |
| 1982   | 314,293 | 106,8                                    | 51                                      |
| 1983   | 331,212 | 112,5                                    | 54                                      |
| 1984   | 369,642 | 125,6                                    | 60                                      |
| 1985   | 227,212 | 77,2                                     | 37                                      |
| 1986   | 357,896 | 121,6                                    | 58                                      |
| 1987   | 388,644 | 132,0                                    | 63                                      |
| 1988   | 311,744 | 105,9                                    | 51                                      |
| 1989   | 133,789 | 45,4                                     | 22                                      |
| 1990   | 79,689  | 27,1                                     | 13                                      |
| 1991   | 173,501 | 58,9                                     | 28                                      |
| 1992   | 307,384 | 104,4                                    | 50                                      |
| 1993   | 322,139 | 109,4                                    | 52                                      |
| 1994   | 233,613 | 79,3                                     | 38                                      |
| 1995   | 351,273 | 119,3                                    | 57                                      |
| 1996   | 273,901 | 93,0                                     | 44                                      |
| 1997   | 181,191 | 61,5                                     | 29                                      |
| 1998   | 421,824 | 143,3                                    | 68                                      |
| 1999   | 417,042 | 141,7                                    | 68                                      |
| 2000   | 404,066 | 137,2                                    | 66                                      |
| 2001   | 583,064 | 198,0                                    | 95                                      |
| 2002   | 523,282 | 177,7                                    | 85                                      |
| 2003   | 205,678 | 69,9                                     | 33                                      |
| 2004   | 249,586 | 84,8                                     | 40                                      |
| 2005   | 144,42  | 49,1                                     | 23                                      |
| 2006   | 339,15  | 115,2                                    | 55                                      |
| 2007   | 374,912 | 127,3                                    | 61                                      |

Tableau 4.2-4 : Recharge annuelle de la RWM012 (estimation à +/-37% près) calculée de 1980 à 2007 en mm et en millions de m³.

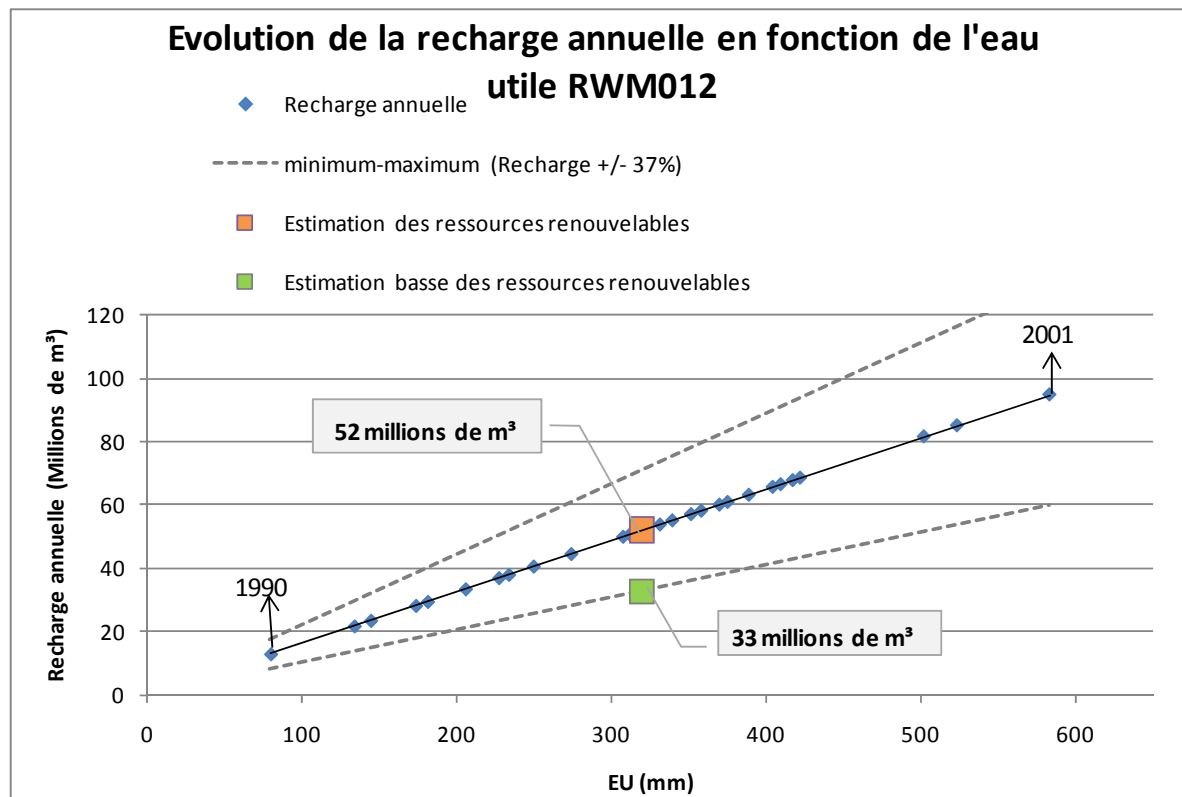
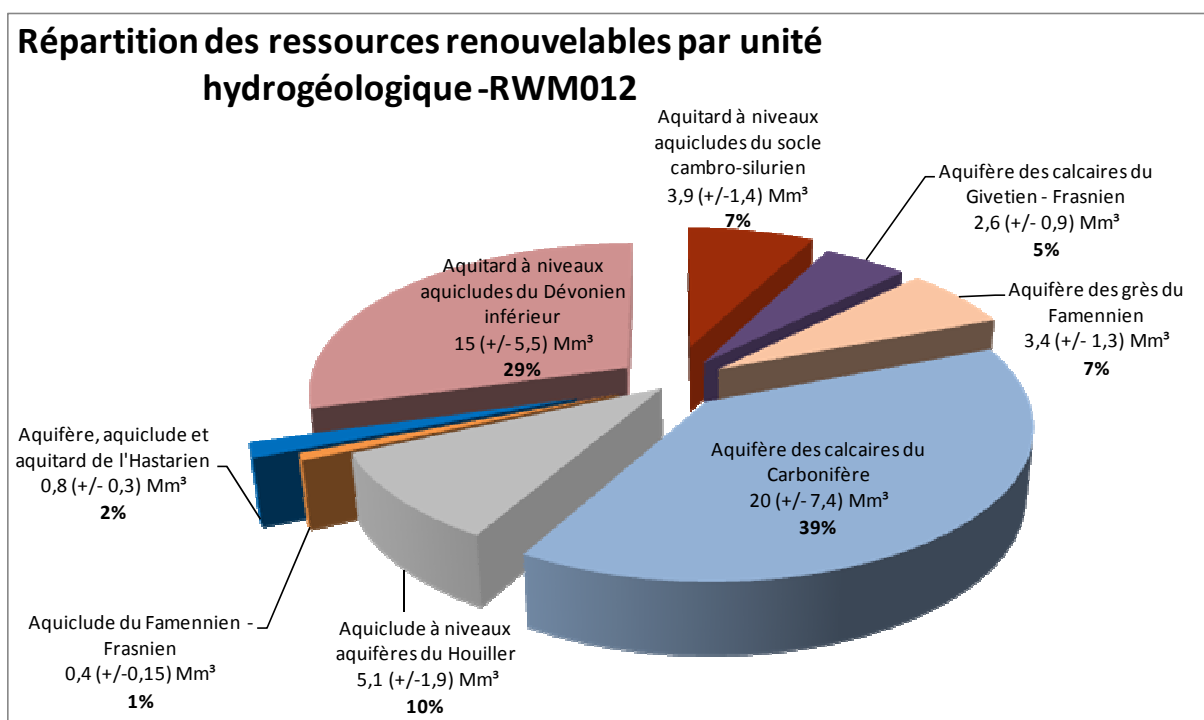


Figure 4.2-1 : Recharge annuelle en fonction de l'eau utile. Avec indication des ressources renouvelables.

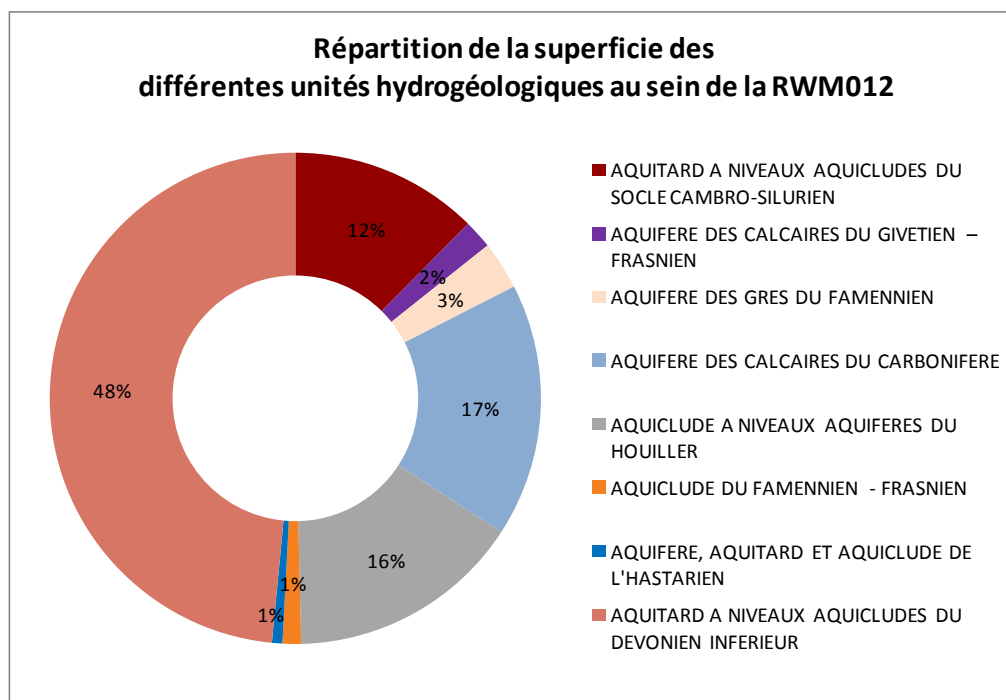
#### 4.2.4 Répartition des ressources renouvelables au sein de la masse d'eau RWM012

Connaissant la surface affleurante de chaque unité hydrogéologique, la répartition des ressources renouvelables par unité hydrogéologique peut être estimée. Le diagramme de la Figure 4.2-2 représente le pourcentage des ressources renouvelables totales engendré pour chaque unité hydrogéologique.

L'aquifère des calcaires carbonifères génère la plus grande partie des ressources renouvelables avec un volume de 20 (+/- 7,4) millions de m<sup>3</sup> par an, ce qui représente 39% des ressources renouvelables totales. Cette prédominance est due au coefficient d'infiltration élevé des calcaires carbonifères (80%) malgré une superficie qui représente seulement 17% de la masse d'eau (Figure 4.2-3). L'aquitard à niveaux aquicludes du Dévonien inférieur engendre 29% des ressources renouvelables totales, et cela malgré une prédominance dans la masse d'eau (48%).



**Figure 4.2-2 : Ressources renouvelables par unité hydrogéologique en millions de m<sup>3</sup> (Mm<sup>3</sup>) et pourcentage que cela représente par rapport aux ressources renouvelables totales de la RWM012.**



**Figure 4.2-3 : Pourcentage de la superficie des différentes unités hydrogéologiques par rapport à la superficie totale de la RWM012.**

#### 4.2.5 Comparaison des ressources prélevées aux ressources renouvelables

A titre indicatif, on peut comparer le volume annuel prélevé dans la masse d'eau RWM012 aux ressources renouvelables pour visualiser la proportion que cela représente. On peut aussi faire cette comparaison pour certaines unités hydrogéologiques.

La Figure 4.2-4 représente le pourcentage du volume prélevé sur les ressources renouvelables pour la masse d'eau RWM012 dans son entièreté. Le volume prélevé considéré est le volume moyen annuel<sup>1</sup> de 7,5 millions de m<sup>3</sup>. Celui-ci est comparé aux ressources renouvelables en considérant trois estimations :

- estimation « théorique » des ressources renouvelables : estimation des ressources renouvelables calculée à partir des coefficients d'infiltration ;
- estimation « basse » des ressources renouvelables: estimation qui minimise les risques d'une surestimation des ressources renouvelables, en considérant comme valeur, la limite

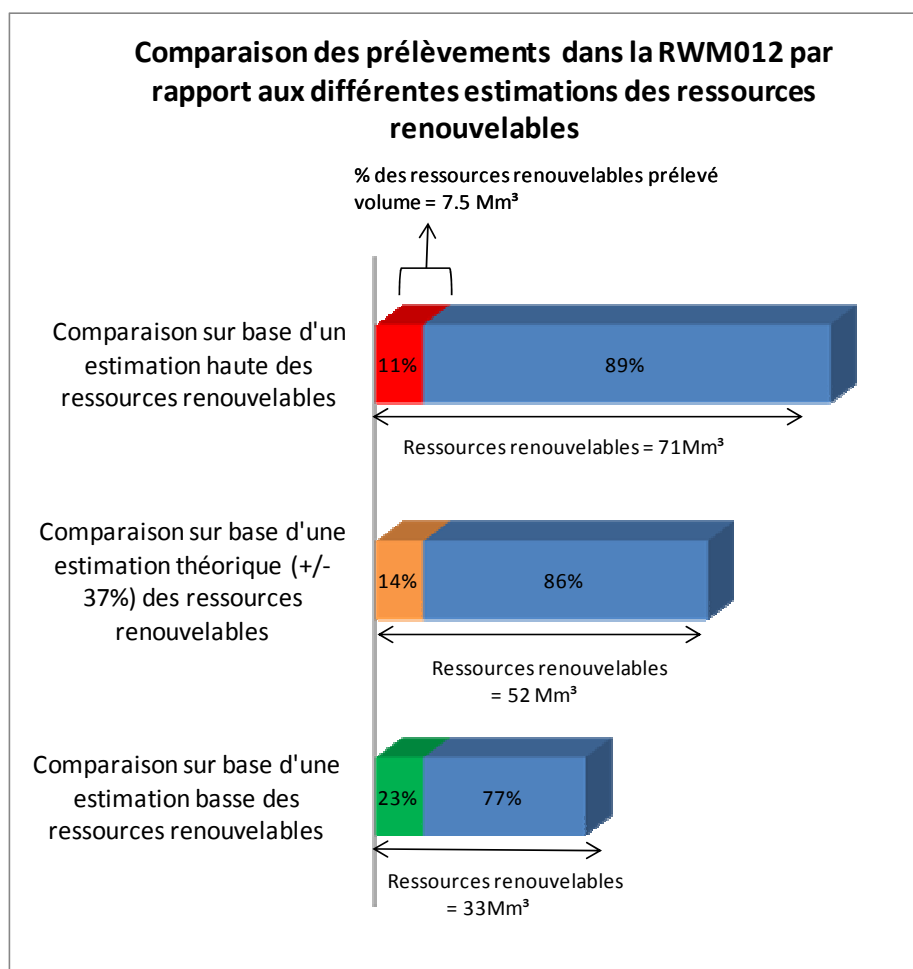
---

<sup>1</sup> En fait, volume prélevé pour l'année 1999 considéré comme représentatif du volume prélevé moyen annuel. Chiffres provenant de l'atlas du karst wallon.



inférieure de la marge d'imprécision, soit, les ressources renouvelables - 37% (deux fois l'écart-type);

- estimation « haute » des ressources renouvelables : estimation qui maximise les risques d'une surestimation des ressources renouvelables, en considérant comme valeur, la limite supérieure de la marge d'imprécision, soit, les ressources renouvelables + 37% (deux fois l'écart-type).



**Figure 4.2-4 : Prélèvement au sein de la masse d'eau RWM012 rapporté sur les différentes estimations des ressources renouvelables.**

En considérant la limite inférieure de l'estimation des ressources renouvelables soit 33 millions de m<sup>3</sup> (52 millions de m<sup>3</sup> - 37%, voir Figure 4.2-1), on voit que le volume prélevé dans la masse d'eau représenterait 23% des ressources renouvelables.

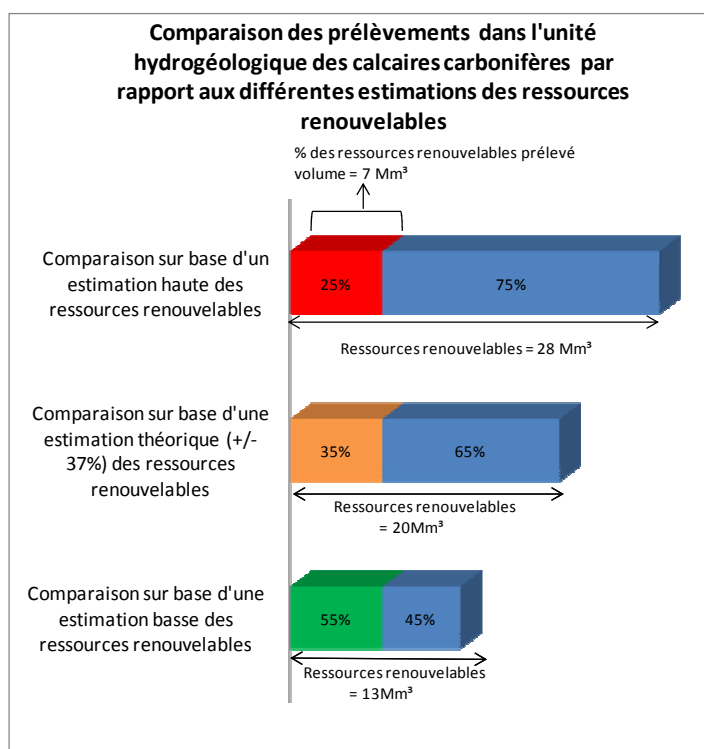
On peut appliquer cette comparaison par unité hydrogéologique. Cependant la séparation par unité n'est pas toujours judicieuse, des transferts d'eau pouvant se produire d'une unité à l'autre. Le Tableau 4.2-5 reprend les principaux volumes prélevés dans différentes unités hydrogéologiques de la RWM012, ainsi que leur comparaison avec les différentes estimations des ressources renouvelables engendrées au droit de l'unité hydrogéologique. L'essentiel des prélèvements (94%) de la masse d'eau

sont concentrés dans l'unité hydrogéologique des calcaires carbonifères. Ces volumes représenteraient 55% (selon l'estimation basse) des ressources renouvelables engendrées au droit calcaires carbonifères. L'aquitard a niveaux aquicludes du Dévonien est très faiblement exploité (1.6% selon une estimation basse des ressources renouvelables). L'aquifère des calcaires givetien-frasnien est faiblement exploité (13.3% des ressources renouvelables selon une estimation basse).

| RWM012 captages Versus Ressources renouvelables     |                     |                                     |                               |                      |                   |                                         |                      |                  |
|-----------------------------------------------------|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------|----------------------|-------------------|-----------------------------------------|----------------------|------------------|
|                                                     | Volume prélevé (m³) | Volume prélevé/Volume prélevé total | Ressources renouvelables (m³) |                      |                   | Pourcentage (Volume prélevé/Ressources) |                      |                  |
|                                                     |                     |                                     | Estimation basse              | Estimation théorique | Estimation haute  | Estimation basse                        | Estimation théorique | Estimation haute |
| <b>Total RWM012</b>                                 | <b>7.508.570</b>    | <b>1,00</b>                         | <b>32.689.489</b>             | <b>51.888.077</b>    | <b>71.086.666</b> | <b>23,0</b>                             | <b>14,5</b>          | <b>10,6</b>      |
| AQUIFERE DES CALCAIRES DU CARBONIFERE               | 7.057.140           | 0,94                                | 12.839.917                    | 20.380.821           | 27.921.724        | 55,0                                    | 34,6                 | 25,3             |
| AQUITARD A NIVEAUX AQUICLUDES DU DEVONIEN INFERIEUR | 156.940             | 0,02                                | 9.609.923                     | 15.253.846           | 20.897.770        | 1,6                                     | 1,0                  | 0,8              |
| AQUIFERE DES CALCAIRES DU GIVETIEN – FRASNIEN       | 218.790             | 0,03                                | 1.639.859                     | 2.602.950            | 3.566.042         | 13,3                                    | 8,4                  | 6,1              |

**Tableau 4.2-5 : Comparaison du volume prélevé annuel moyen aux différentes estimations des ressources renouvelables. Pour l'ensemble de la MESO RWM012 et pour différentes unités hydrogéologiques représentatives.**

L'aquifère des calcaires carbonifères est fort sollicité par rapport aux autres unités hydrogéologiques. Le diagramme de la Figure 4.2-5 illustre le pourcentage du volume prélevé au sein des calcaires carbonifères par rapport aux différentes estimations des ressources renouvelables. Les ressources renouvelables dont il est question ici, sont les ressources engendrées au droit des aquifères calcaires carbonifères. Selon une estimation des ressources renouvelables que l'on peut qualifier « d'optimiste » (estimation haute), le volume prélevé (7,5 millions de m³) représenterait 25% des ressources renouvelables. Selon l'estimation théorique, le prélèvement serait de 34%, et enfin selon l'estimation basse, les volumes prélevés correspondraient à 55% des ressources renouvelables. A ce niveau, il paraît bon de rappeler que les ressources renouvelables ne constituent pas les ressources exploitables.



**Figure 4.2-5 : Volume prélevé au sein des calcaires carbonifères comparé aux différentes estimations des ressources renouvelables engendrées au sein des calcaires carbonifères.**

#### 4.2.6 Ressources renouvelables et ressources exploitables

Si la détermination des ressources renouvelables à l'échelle d'une masse d'eau est une tâche délicate engendrant un degré d'incertitude important associé à l'estimation, la détermination, d'une manière objective, des ressources exploitables est un exercice encore plus difficile et sort du cadre strict de l'hydrogéologie. Au regard de la DCE, la ressource exploitable peut être comprise comme étant le flux annuel moyen calculé à long-terme (les ressources renouvelables) pour la masse d'eau diminué du flux moyen annuel nécessaire pour atteindre les objectifs de qualité écologique<sup>2</sup> pour les eaux de surface associées (Wojciech, 2006).

Du point de vue hydrologique, il faut rappeler que les eaux souterraines contribuent au maintien du débit des cours d'eau, en particulier en période d'étiage. Ecologiquement, beaucoup de zones humides sont liées à la présence des nappes d'eau souterraine.

L'exploitation des ressources renouvelables de chaque bassin doit être examinée à la lumière de critères spécifiques, et tout particulièrement le maintien d'un débit d'étiage suffisant garantissant la qualité des eaux de surface. L'estimation de ce débit réservé de qualité acceptable nécessite des études environnementales qui n'entrent pas dans le cadre des objectifs du projet Synclin'EAU.

<sup>2</sup> Défini dans l'article 4 de la DCE

## 5 Caractéristiques hydrauliques – écoulement

La partie "caractérisation hydraulique" a pour but de mieux comprendre les écoulements au sein des différents types d'aquifères rencontrés dans la région étudiée. Ces écoulements sont imposés par les propriétés hydrauliques du réservoir, d'une part, et par les conditions aux limites géologiques et hydrodynamiques de l'autre (Castany, 1982).

Les conditions aux limites sont déterminées, sur le terrain, par l'identification des structures hydrogéologiques et par les mesures de niveau piézométriques et leurs fluctuations. Une importante campagne de mesures piézométriques a été effectuée en ce sens dans le cadre de ce projet, grâce auquel une carte régionale contenant les informations piézométriques a été réalisée. Les directions principales d'écoulement y sont également spécifiées dans la mesure où les données disponibles le permettent. Les résultats des mesures piézométriques sont exposés au point 5.2.

Les propriétés hydrauliques sont identifiées, sur le terrain, grâce aux essais de traçage et aux essais de pompage. Une synthèse des données relatives aux paramètres hydrauliques des principales formations aquifères (conductivité hydraulique, transmissivité) a été réalisée sur base d'informations provenant d'études antérieures, mais également sur base de données récoltées dans le cadre du projet. La variabilité de ces paramètres et les facteurs pouvant les influencer sont examinés au point 5.1.

### 5.1 Paramètres Hydrauliques

Ce chapitre est consacré aux propriétés hydrauliques des unités hydrogéologiques de la masse d'eau RWM012. Une synthèse (non-exhaustive) des données relatives à la perméabilité (conductivité hydraulique et transmissivité) des principales méga-unités hydrogéologiques de la masse d'eau a été réalisée. Les valeurs de ces paramètres et les informations relatifs aux ouvrages associés sont fournies sous forme de tableau en annexe de ce document. La plupart des données proviennent de la Banque de Données Hydrologique (BDHydro). D'autres informations, issus des essais de pompage des forages Synclin'EAU ou fournies par des sociétés de distribution d'eau (SWDE), viennent compléter ce set de données.

#### 5.1.1 *Rappels théoriques*

La perméabilité est l'aptitude d'un réservoir à se laisser traverser par l'eau, sous l'effet d'un gradient hydraulique. C'est le paramètre le plus important pour estimer le potentiel aquifère d'un réservoir. La perméabilité totale *d'une roche* est définie par sa porosité d'une part (perméabilité primaire), et par son degré de fracturation d'autre part (perméabilité secondaire).

La perméabilité primaire est liée aux conditions de genèse de la roche. La taille des grains, la morphologie et l'interconnexions des pores au sein de la roche sont les facteurs définissant sa

perméabilité primaire. Dans la masse d'eau RWM012, les unités hydrogéologiques principales sont constituées de formations cohérentes. En générale, ces types de formations possèdent une perméabilité primaire faible.

La perméabilité secondaire se développe dans un second temps, après que la roche soit formée. La fracturation, généralement d'origine tectonique, permet à l'eau de s'infiltrer et d'agrandir les fractures par érosion chimique et/ou mécanique. Les aquifères possédant une grande perméabilité secondaire sont appelés aquifère de fissure. Ceux-ci constituent la majorité des aquifères dans la RWM012.

Le paramètre qui mesure la perméabilité d'une roche est la conductivité hydraulique (K) (ou coefficient de perméabilité). C'est « le volume d'eau gravitaire en  $m^3$  traversant en une unité de temps (s), sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique, une unité de section en  $m^2$  orthogonale à la direction d'écoulement, dans les conditions de validité de la loi de Darcy » (Castany, 1982). Elle s'exprime en m/s. La variabilité de ce paramètre au sein des unités hydrogéologiques de la RWM011 est décrite ci dessous.

La transmissivité (T) sert à évaluer la productivité d'un captage dans un aquifère. Il est fonction de K par la relation suivante :  $T = K \cdot e$  où e est l'épaisseur du réservoir. La transmissivité est considérée comme étant un paramètre intrinsèque à l'ouvrage, elle ne servira qu'à calculer la perméabilité et ne fera donc pas l'objet d'attentions particulières dans ce chapitre.

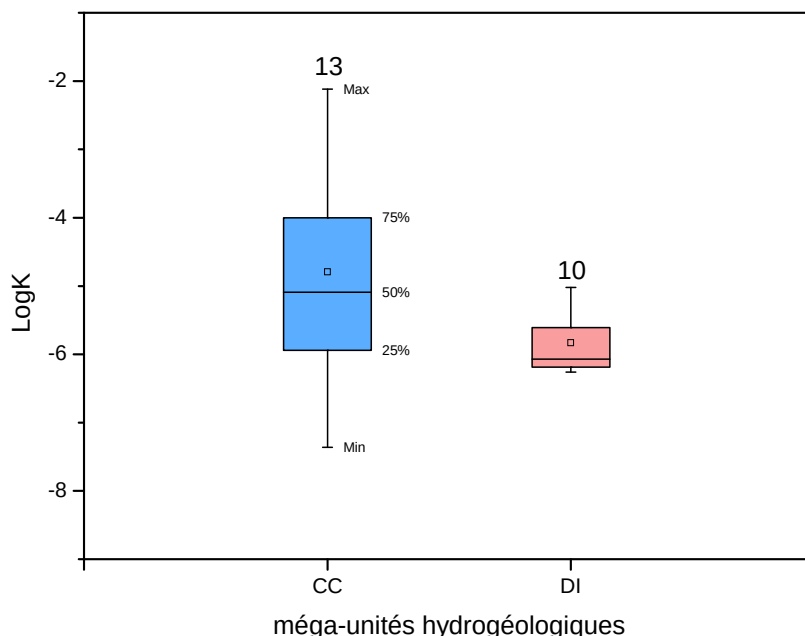
#### 5.1.2 Méthodologie

Les paramètres d'écoulements sont estimés à partir d'essais de pompage. Les méthodes de calcul utilisées dans la détermination de ces paramètres varient selon la nature de la nappe aquifère (captive, libre, semi-captive). La nappe de la RWM012 étant généralement libre, la méthode de calcul la plus couramment utilisée est celle de Theis-Jacob, où la transmissivité (T) est directement déduite à partir d'un graphique semi-logarithmique du rabattement en fonction du temps de pompage. La valeur de T retenue est la moyenne de toutes les valeurs de transmissivité calculées à chaque étape de l'essai de pompage (paliers et remontées, les valeurs « aberrantes » sont écartées).

La conductivité hydraulique est ensuite estimée en divisant T par l'épaisseur du réservoir aquifère. Dans de nombreux cas, la conductivité hydraulique n'est pas répertoriée. Ne disposant pas d'informations quant à l'épaisseur de l'aquifère au droit de chaque ouvrage, nous avons alors estimé K en divisant T par la hauteur des crépines dans l'ouvrage.

### 5.1.3 Variabilité des conductivités hydrauliques de la RWM012

Les données de perméabilité répertoriées dans cette masse d'eau ne concernent que l'aquifère des calcaires carbonifères et l'aquiclude à niveaux aquifères du Dévonien Inférieur. La variabilité des valeurs de conductivités hydrauliques des ces unités hydrogéologiques est représentée par la Figure 5.1-1. Le détail de ces valeurs est également fourni en annexe de ce document.



**Figure 5.1-1. Variabilité des valeurs de conductivité hydraulique (exprimées en logarithmes) au sein des méga-unités de la RWM011. Les chiffres indiquent le nombre d'échantillons disponibles par méga-unités. CC= aquifère des calcaires carbonifères ; DI = aquiclude à niveaux aquifères du Dévonien Inférieur**

L'examen visuel de la Figure 5.1-1 montre que la gamme de valeurs de perméabilité répertoriées dans les calcaires est assez étendue. Elle s'étend sur quatre ordres de grandeurs ( $7,5 \times 10^{-3}$  à  $6,6 \times 10^{-7}$  m/s), avec une moyenne de  $1,4 \times 10^{-3}$  et un écart-type logarithmique égal à 1,4. Cette grande variabilité est caractéristique des aquifères de fissure. En effet, la porosité primaire des calcaires carbonifères est très faible, mais la présence de failles et diaclases améliore très fort la conductivité hydraulique du réservoir. De plus, ces zones fracturées peuvent être altérées et karstifiées. Par conséquent, les perméabilités calculées sont variables en fonction de la nature lithologique des roches traversées (calcaire, dolomie,...), mais surtout de la présence de fractures et du degré d'altération et de karstification qui en découle.

Malgré sa grande surface d'affleurement dans la masse d'eau RWM012 (48%), l'aquitard à niveau aquiclude du Dévonien Inférieur est mal représenté en terme d'échantillonnage (2 mesures

répertoriées seulement). C'est bien évidemment lié au faible potentiel aquifère de cette méga-unité hydrogéologique qui est essentiellement composée de grès et de shales. Afin de constituer un groupe de valeurs statistiquement plus représentatif, quelques valeurs de perméabilité d'ouvrages appartenant à la masse d'eau voisine (RWM016) ont été incluses dans l'interprétation. Comme l'indique la Figure 5.1-1, les perméabilités mesurées dans le Dévonien Inférieur sont nettement plus faible que ce qui est observé dans les calcaires. La dispersivité des valeurs l'est également (écart-type égal à 0,46), malgré l'hétérogénéité de cette méga-unité, tant du point de vue lithologique (présence de grès, siltites, shales, poudingues,...), que sur le plan de l'hydrogéologie (alternance d'aquifères, aquitards et aquicludes). Un plus grand nombre de données serait toutefois nécessaire afin de mieux représenter les unités hydrogéologiques.

## 5.2 Piézométrie de la masse d'eau

Ce chapitre s'intéresse à la piézométrie de la masse d'eau. Elle pour objectif de préciser l'hydrodynamisme des aquifères à partir des variations piézométrique observées dans les différents ouvrages du réseau de surveillance quantitatif et, accessoirement, de confirmer les termes de bouclages des bilans. Ces variations, mis en relation avec les valeurs d'eau utile mensuelles (calculée via le logiciel WaterBudget), permettent localement d'examiner la cinétique de la recharge de la nappe et fournissent, dans une moindre mesure, des informations quant à la perméabilité du milieu. Les piézomètres ont été sélectionnés en fonction de divers critères : situation au droit d'un aquifère (grès et calcaires) ; accessibilité, profondeur, localisation en tête de bassin ou à l'exutoire,...

Les différents profils piézométriques ont été regroupés par bassin versant. La comparaison de ces profils, couplée au contexte hydrogéologique régional, ont permis de spécifier les directions principales d'écoulement et, dans certains cas, les limites hydrogéologiques des bassins versants.

### 5.2.1 *Bassin versant de la Sambre en amont du confluent avec l'Eau d'Heure*

Le bassin versant de la Sambre, en amont du confluent avec l'Eau d'Heure est principalement composé de l'aquitard à niveaux aquicludes du Dévonien inférieur. En bordure Nord, on retrouve une bande de schistes du Houiller encadrant un massif de calcaires carbonifères charrié par la faille du Midi.

Douze ouvrages situés dans ce bassin on été intégrés dans le réseau de caractérisation quantitatif (Figure 5.2-1). Sept sont implantés dans l'aquitard à niveaux aquiclude du Dévonien inférieur (Puits 2 détergents, FPMS13582, QUATRE CHEMINS, GOZÉE, FPMS13253, FPMS13271, LE BAZARD). Ce nombre est complété d'une sonde de contrôle et deux nouveaux forages (forage FPMS 5 et forage FPMS 6). Deux des piézomètres suivis se situent dans l'aquifère des sables du Paléocène (puits Navez, Bienne-lez-Happart), et deux dans l'aquiclude à niveaux aquifères du Houiller (FPMS30062 et FPMS30078). Un nouveau piézomètre a de plus été foré dans l'aquifère des calcaires du Carbonifère (forage FPMS 4).



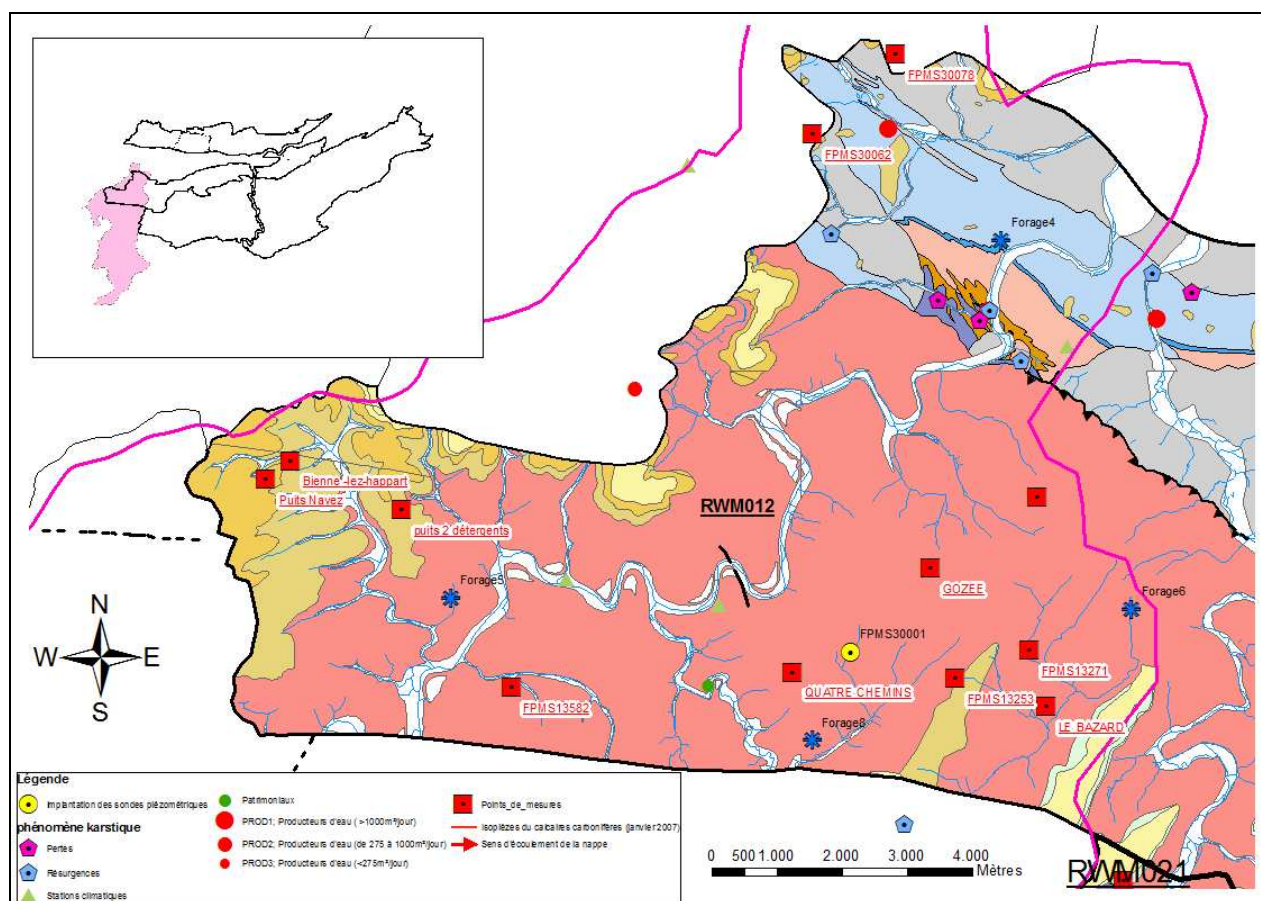


Figure 5.2-1: Localisations des piézomètres dans le bassin versant de la Sambre en amont du confluent avec l'eau d'Heure.

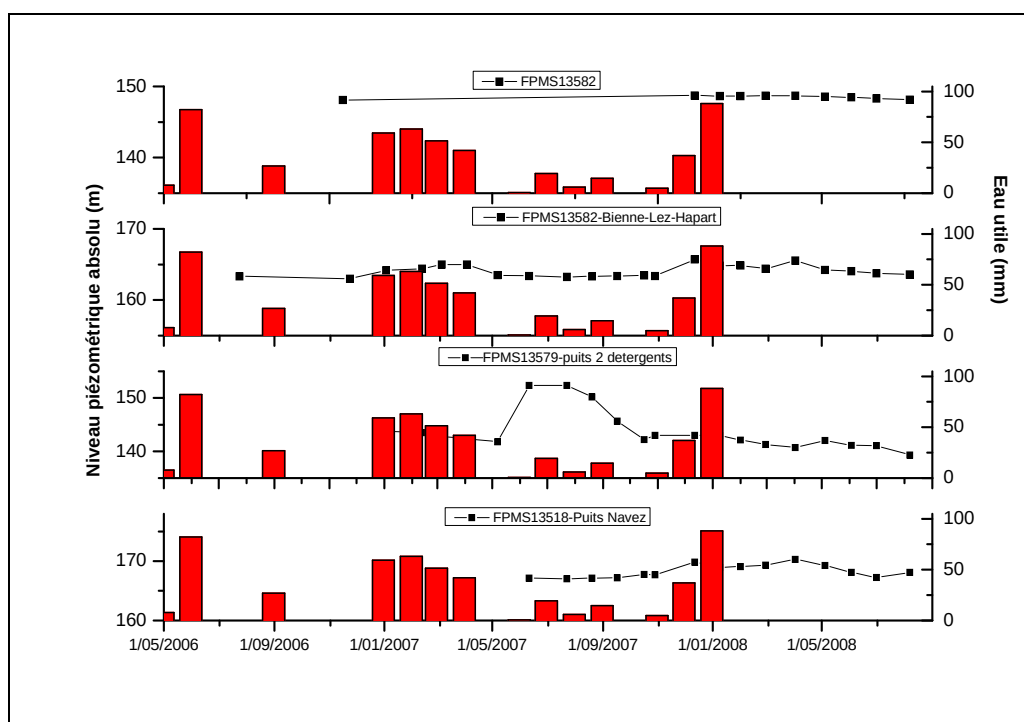


Figure 5.2-2 : Comparaison des fluctuations de niveau piézométrique et de l'eau utile mensuelle pour les piézomètres du bassin versant de la Sambre en amont du confluent avec l'eau d'Heure, en fonction de l'eau utile calculée du 01/01/2006 au 01/01/2008 (en rouge)

Les hauteurs d'eau dans les puits Navez et Bienne-Les Happart, implantés dans les sables, varient de manière identique (amplitude de l'ordre de 3m) et sont corrélées avec l'apport en eau utile.

Une pompe immergée qui capte 28500m<sup>3</sup> /an est installé dans le puits 2 détergents. Bien que ce volume ne soit pas élevé, son influence sur les variations piézométriques ne permet pas une interprétation cohérente du profil enregistré.

Les profils piézométriques des puits implantés dans le massif schisto-gréseux du bassin de Dinant présentent des fluctuations de niveau de la nappe différentes. Soit les variations sont de faibles amplitudes, moins d'un mètre (FPMS13582 (Figure 5.2-2), FPMS 13253 et Gozée (Figure 5.2-3), soit les variations sont brutales, comme par exemple une variation de 4 mètres entre le mois de juin et juillet 2007 pour le puits FPMS13271 (Figure 5.2-3). Après analyse, ce dernier profil ainsi que ceux du Puits 4 chemins et le Bazard ne peuvent pas être interprétés correctement car on y pompe fréquemment lors de la prise de mesure.

La sonde (Figure 5.2-4) mise en place dans le puits FPMS 30001 donne une image représentative de l'aquitard à niveaux aquicludes du Dévonien inférieur où les fluctuations de niveau piézométrique sont faibles, probablement du à la faible recharge souterraine.

Dans l'aquiclude à niveaux aquifères du Houiller, les puits peu profonds (Figure 5.2-4) présentent une légère corrélation avec l'apport en eau utile mais aucune variation saisonnière.

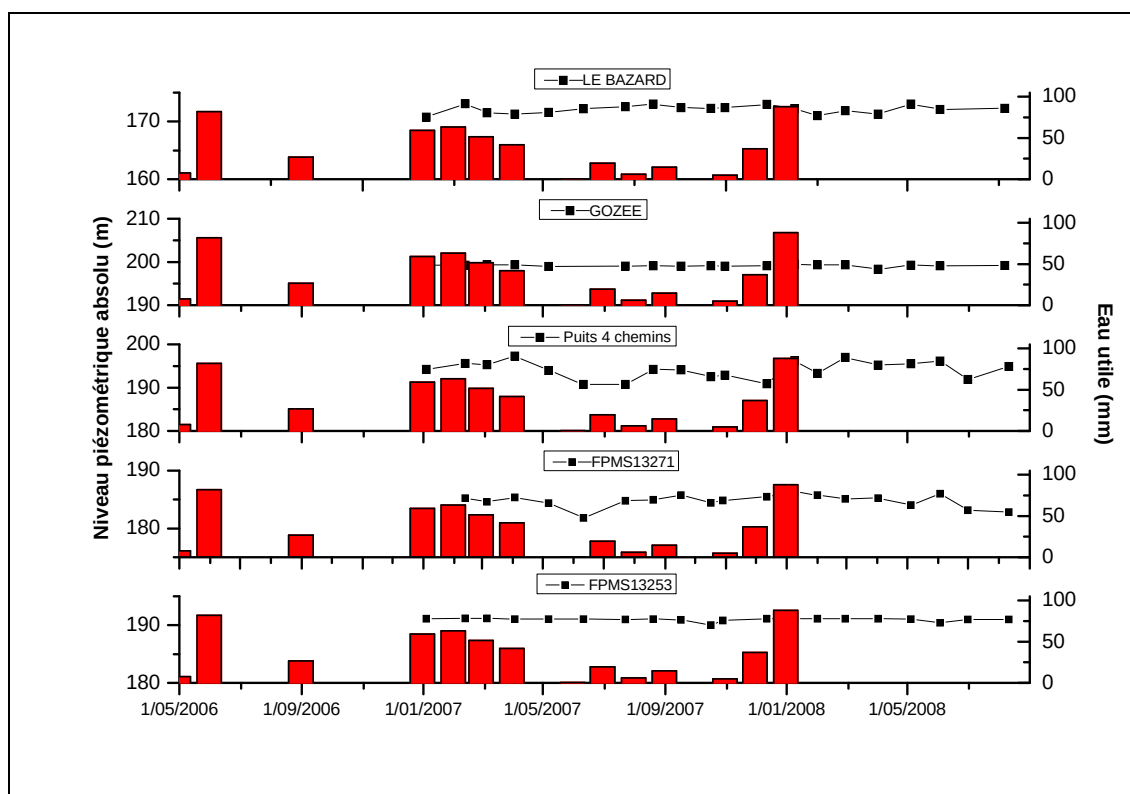


Figure 5.2-3: Variations piézométriques de l'aquitard à niveaux aquiclude du dévonien inférieur, dans le bassin versant de la Sambre en amont du confluent avec l'eau d'Heure, en fonction de l'eau utile calculée du 01/01/2006 au 01/01/2008 (en rouge)

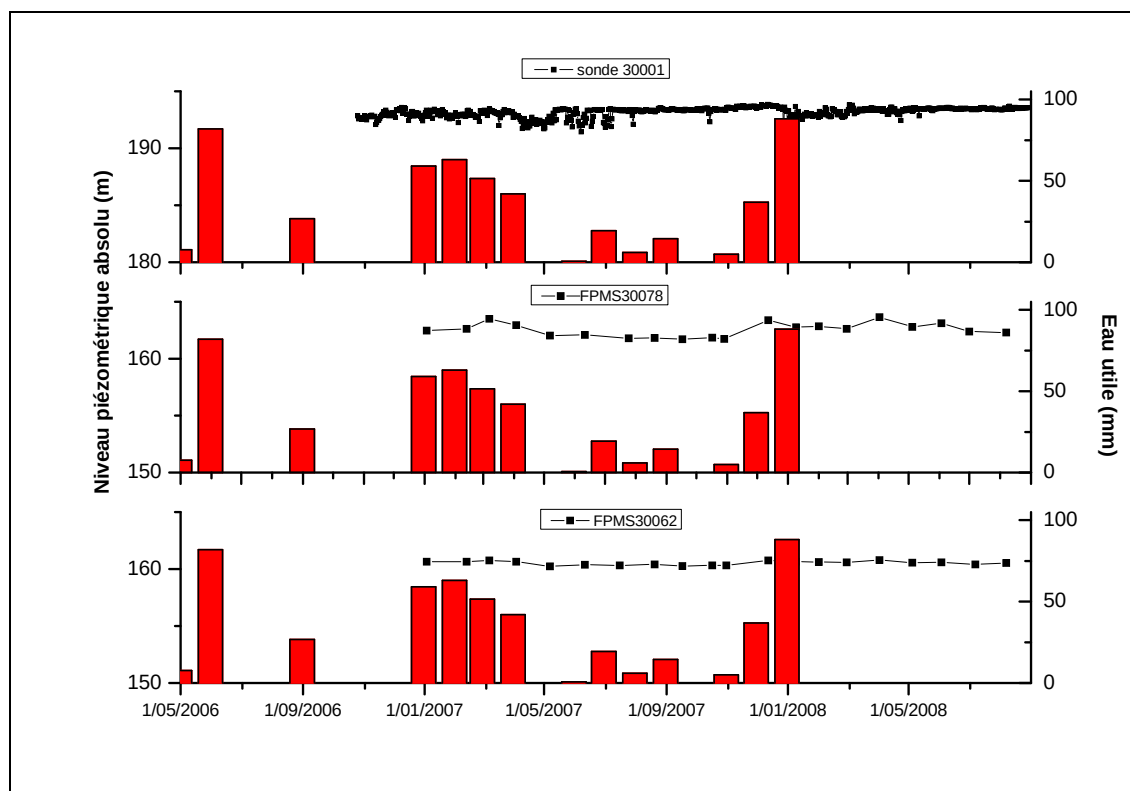
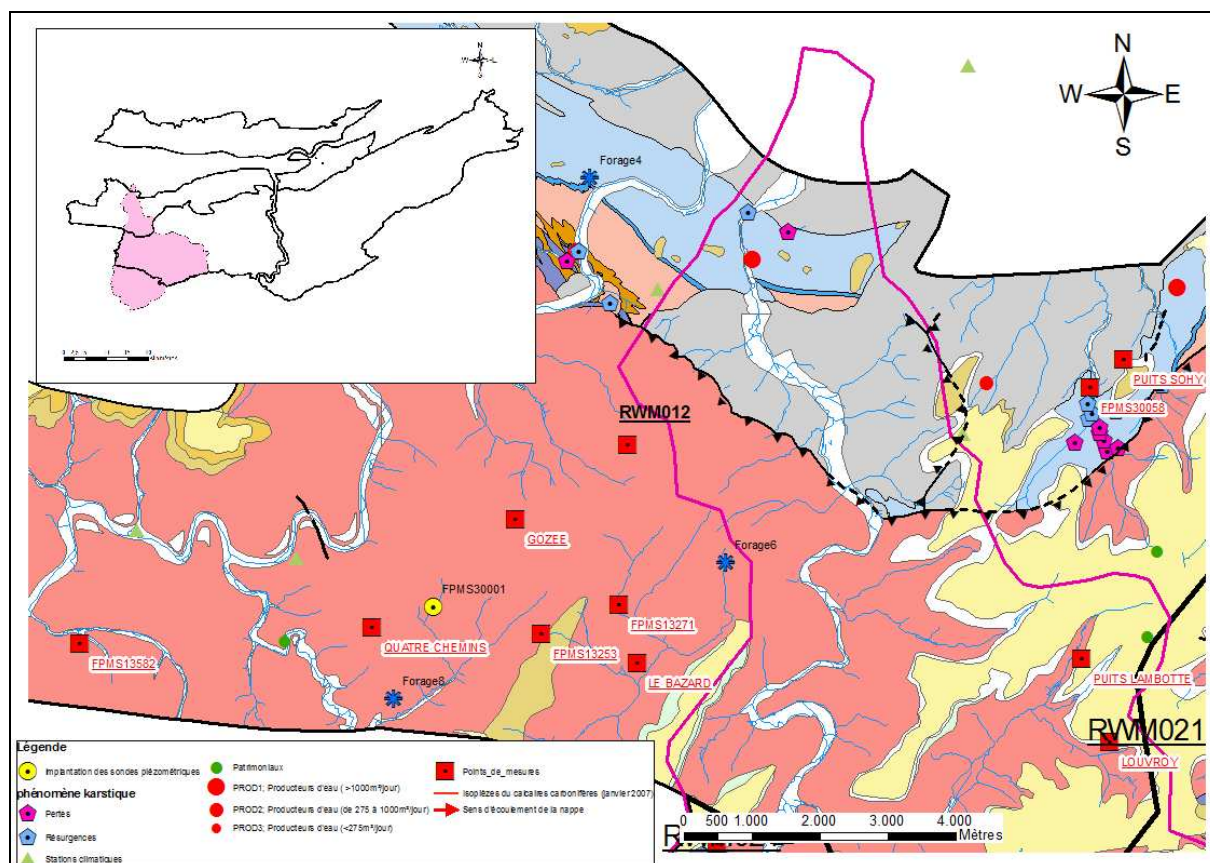


Figure 5.2-4: Variations piézométriques de la l'aquitard à niveau aquifère (sonde) et de l'aquiclude à niveau aquifère du houiller dans le bassin versant de la Sambre en amont du confluent avec l'eau d'Heure et, en fonction de l'eau utile mensuelle calculée du 01/01/2006 au 01/01/2008 (en rouge)

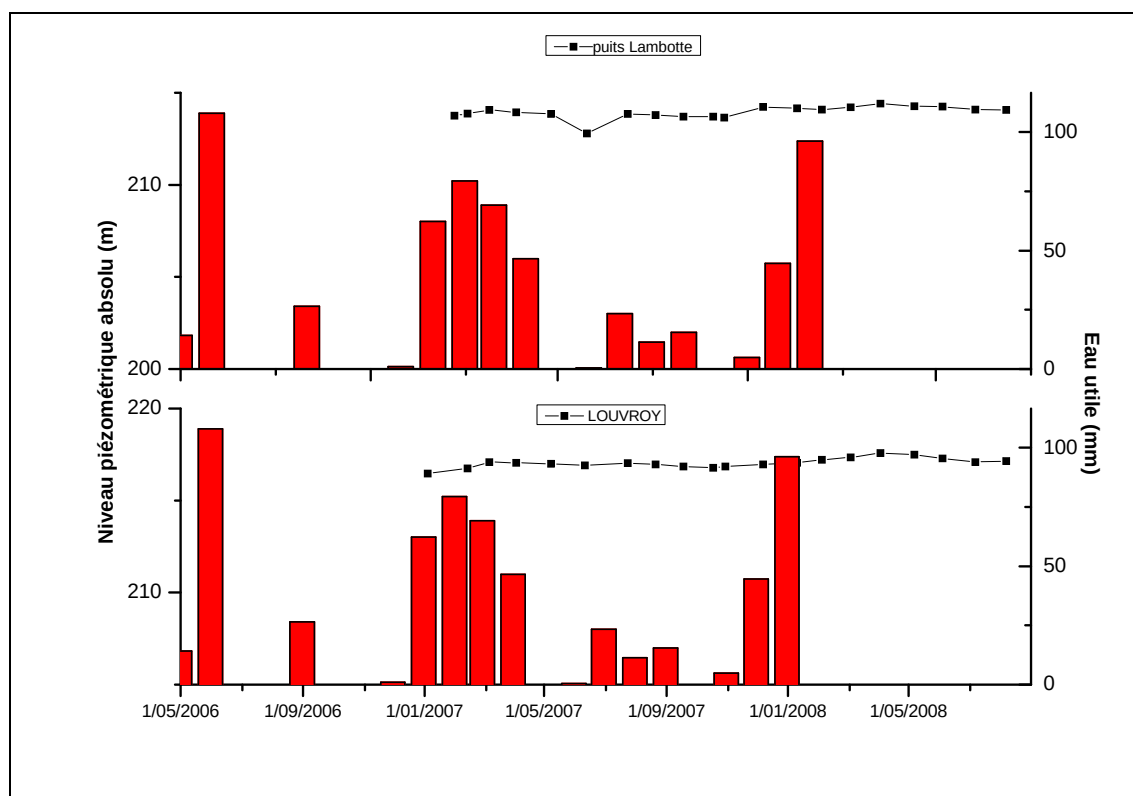
### 5.2.2 Bassin versant de l'Eau d'Heure

Le bord Nord du bassin versant de l'eau d'Heure recoupe la masse d'eau RWM012. Deux piézomètres retenus dans le réseau de caractérisation appartenant à l'aquitard à niveaux aquicludes du Dévonien inférieur, le puits Lambotte et le puits Louvroy (Figure 5.2-5).



**Figure 5.2-5: Localisations des piézomètres dans le bassin versant de l'Eau d'Heure, appartenant à la masse d'eau RWM012**

La Figure 5.2-6 représente les variations piézométriques de l'aquifère en fonction de l'eau utile dans le bassin versant de l'Eau d'Heure. La piézométrie de ces deux ouvrages affiche des profils semblables. L'amplitude des fluctuations saisonnières est faible (moins de 1m entre les « basses » et « hautes eaux ») et aucune corrélation significative avec l'eau utile ne peut être dégagée.

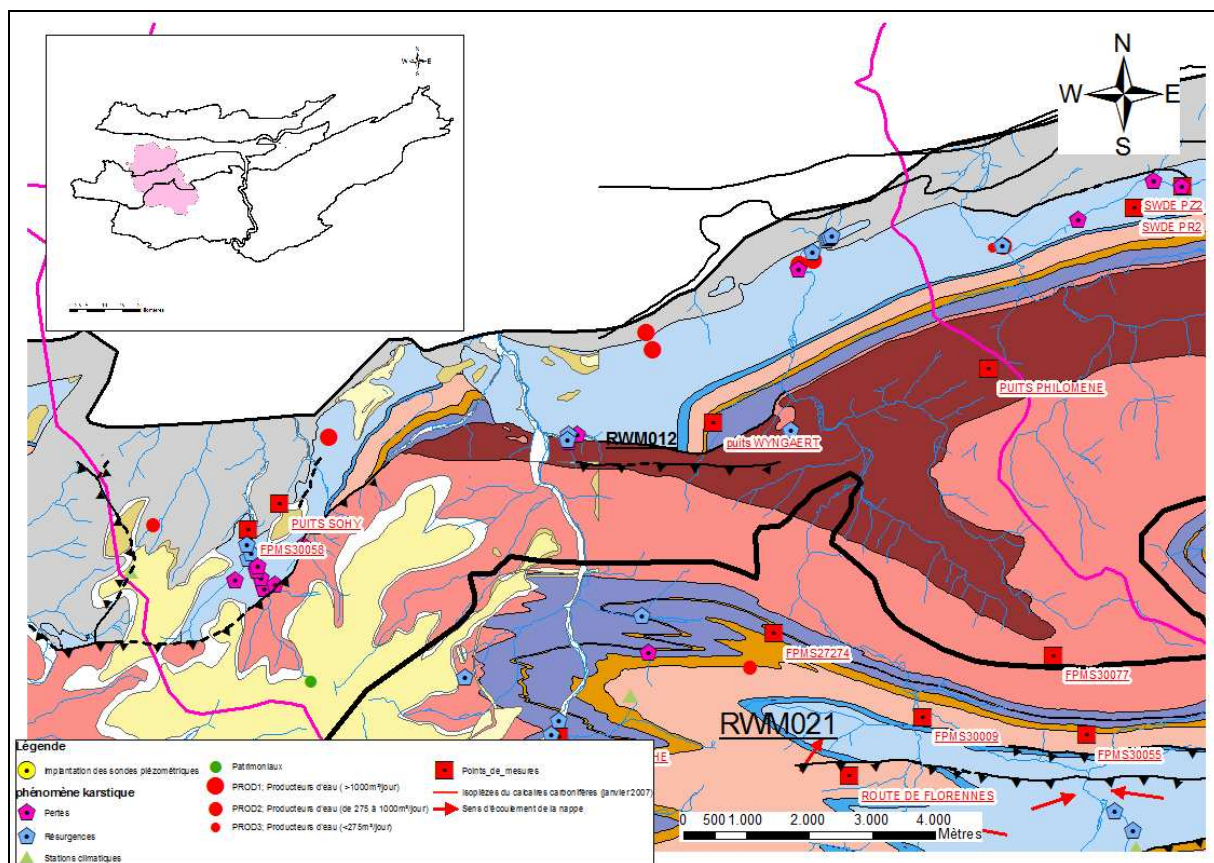


**Figure 5.2-6: Comparaison de fluctuations de niveau piézométrique et de l'eau utile mensuelle pour les piézomètres du bassin de l'Eau d'Heure, en fonction de l'eau utile mensuelle calculée du 01/01/2006 au 01/01/2008 (en rouge)**

### 5.2.3 Bassin versant de la Sambre du confluent avec l'Eau d'Heure au confluent avec la Biesme

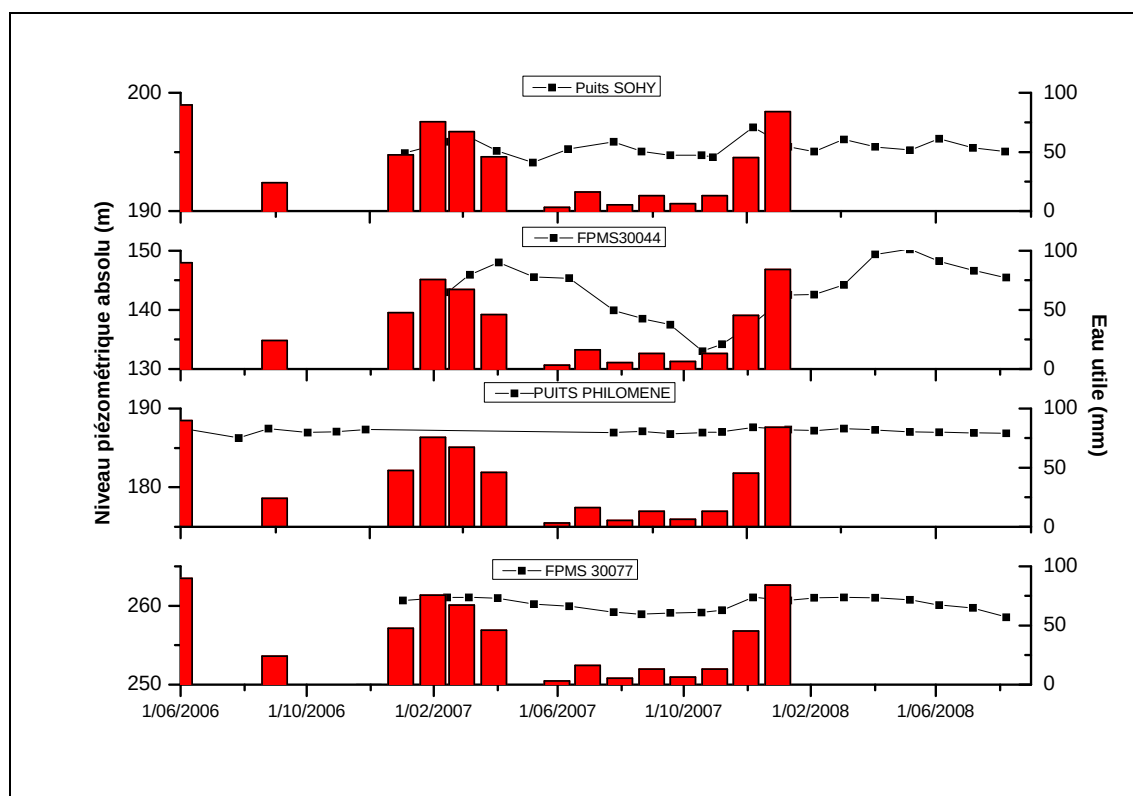
Le bassin versant de la Sambre, entre la confluence avec l'Eau d'Heure et la confluence avec la Biesme, recoupe une partie de la masse d'eau RWM012. Cinq puits appartenant au réseau de caractérisation sont localisés dans ce bassin. Le FPMS30077 est dans l'aquitard à niveaux aquiclude du Dévonien inférieur, le puits PHILOMENE dans l'aquitard à niveaux aquicludes du socle Cambro-silurien, le puits WYNGAERT (fpms30044) dans l'aquifère des calcaires du Givetien et le puits SOHY est dans l'aquiclude à niveaux aquifère du Houiller.





**Figure 5.2-7: Localisations des piézomètres dans le bassin versant de la Sambre du confluent avec l'Eau d'Heure au confluent avec la Biesme, sur la RWM012.**

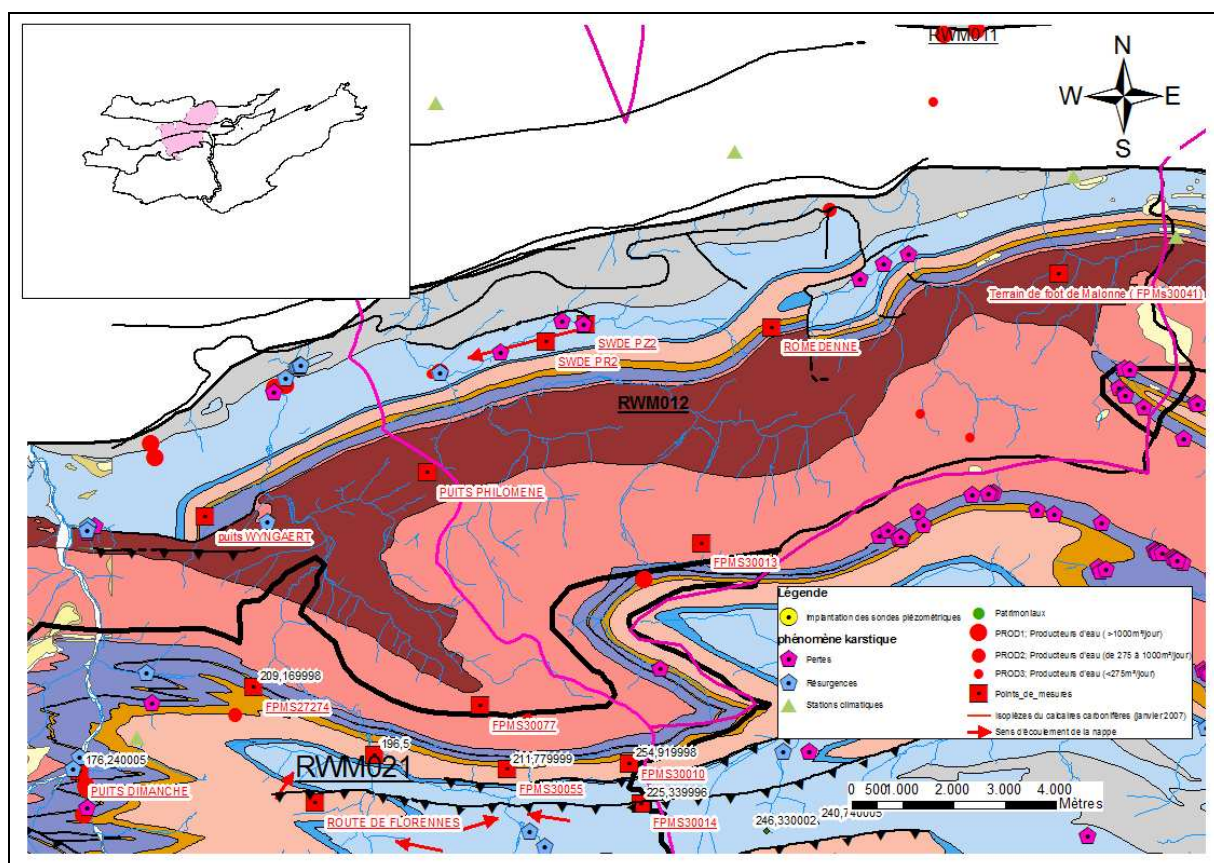
La Figure 5.2-8 compare les variations piézométriques des quatre puits implantés dans les formations hydrogéologiques différentes. La différence de comportement selon la nature lithologique du substratum dans lequel se trouve le puits est bien mise en évidence. En effet, le puits Philomène situé au droit des terrains de faible perméabilité du socle Cambro-silurien n'affiche aucune variation piézométrique. De faibles fluctuations saisonnières apparaissent dans le puits FPM S30077 implanté dans les formations du Dévonien inférieur. La piézométrie du puits FPM S30044 (WYNGAERT) situé dans les calcaires givetien-frasnien affiche d'importantes variations saisonnières avec une amplitude de l'ordre de 15 m. Les pics du niveau piézométrique sont corrélés avec les pics en eau utile avec un retard de plus ou moins deux mois. Le puits SOHY, dans les terrains houillers, est utilisé par leurs propriétaires, ce qui perturbe probablement les hauteurs piézométriques enregistrées, une interprétation cohérente n'est donc pas envisageable dans ce cas.



**Figure 5.2-8: Comparaison de fluctuations de niveau piézométrique et de l'eau utile mensuelle pour les piézomètres du le bassin versant de la Sambre du confluent avec l'Eau d'Heure au confluent avec la Biesme, en fonction de l'eau utile mensuelle calculée du 01/01/2006 au 01/01/2008 (en rouge)**

#### 5.2.4 Bassin versant de la Sambre en aval du confluent avec la Biesme

Le Sud du bassin versant de la Sambre, en aval du confluent avec la Biesme est composé de 8 formations géologiques différentes. Cette partie de bassin compte 5 piézomètres du réseau de caractérisation. Les puits SWDE PZ2 et SWDE PR2 sont dans l'aquifère des calcaires carbonifères, ROMEDENNE dans l'aquifère des calcaires du Givetien, FPMS 30013 dans l'aquitard à niveaux aquicludes du Dévonien inférieur et le FPMS30041 appartient au socle du Cambro-Silurien (Figure 5.2-9).



**Figure 5.2-9: Localisations des piézomètres dans le bassin versant de la Sambre en aval du confluent avec la Biesme (RWM012)**

La Figure 5.2-10 montre les variations des hauteurs d'eau enregistrées dans les différentes nappes en fonction de l'apport en eau utile.

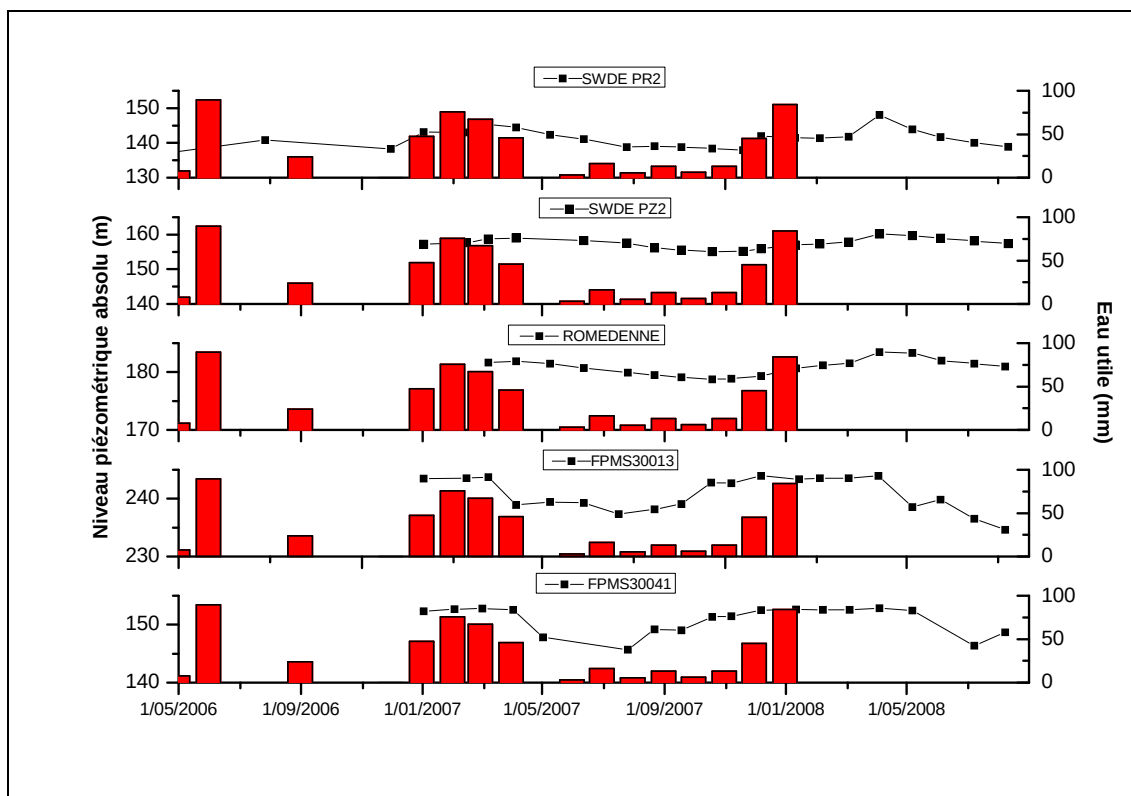
Le sens d'écoulement de la nappe est montré par le gradient calculé (0.01) entre les 2 puits des calcaires carbonifères qui ont un comportement similaire (variation saisonnière et corrélation avec l'eau utile). Ce sens est également visible si l'on observe le système de perte résurgence le long du ruisseau du Ry Sec.

Le puits ROMEDENNE a un comportement similaire à ceux implantés dans les calcaires du Carbonifère, c'est-à-dire une variation saisonnière et une bonne corrélation avec l'apport de l'eau utile.

Bien qu'implantés au sein de la même unité hydrogéologique, les puits FPMS30041 et Philomene présentent des fluctuations de niveau piézométrique différentes. Cela doit être attribué au fait que le puits FPMS30041 est utilisé fréquemment entre avril et octobre pour l'irrigation.

Le puits FPMS30013 est utilisé pour alimenter la ferme tout proche durant les mois d'été. Les données piézométriques pour cette période ne sont donc pas interprétables.





**Figure 5.2-10: Comparaison de fluctuations de niveau piézométrique et de l'eau utile mensuelle pour les piézomètres du bassin versant de la Sambre en aval du confluent avec la Biesme, en fonction de l'eau utile mensuelle calculée du 01/01/2006 au 01/01/2008 (en rouge)**

#### 5.2.5 Bassin versant de la Meuse, zone de Wépion

Le Puits Berlemont est implanté dans les calcaires carbonifères (Figure 5.2-11). Il est situé au Sud de Namur (près de Wépion) et fait directement partie du bassin versant de la Meuse.

La Figure 5.2-12 présente les variations piézométriques de l'aquifère en fonction de l'eau utile dans le bassin versant de la Meuse. L'amplitude maximale mesurée entre juillet 2006 et juillet 2008 est très faible (70cm), mais les fluctuations sont bien corrélées avec l'eau utile. Le niveau piézométrique moyen mesuré est quasi égal à la côte altimétrique du lit de la Meuse. L'influence de celle-ci a probablement un effet tampon sur les variations piézométrique de la nappe. Il semble ainsi évident qu'à cet endroit, la Meuse serve d'exutoire à la nappe des calcaires carbonifères et en impose le niveau de base.

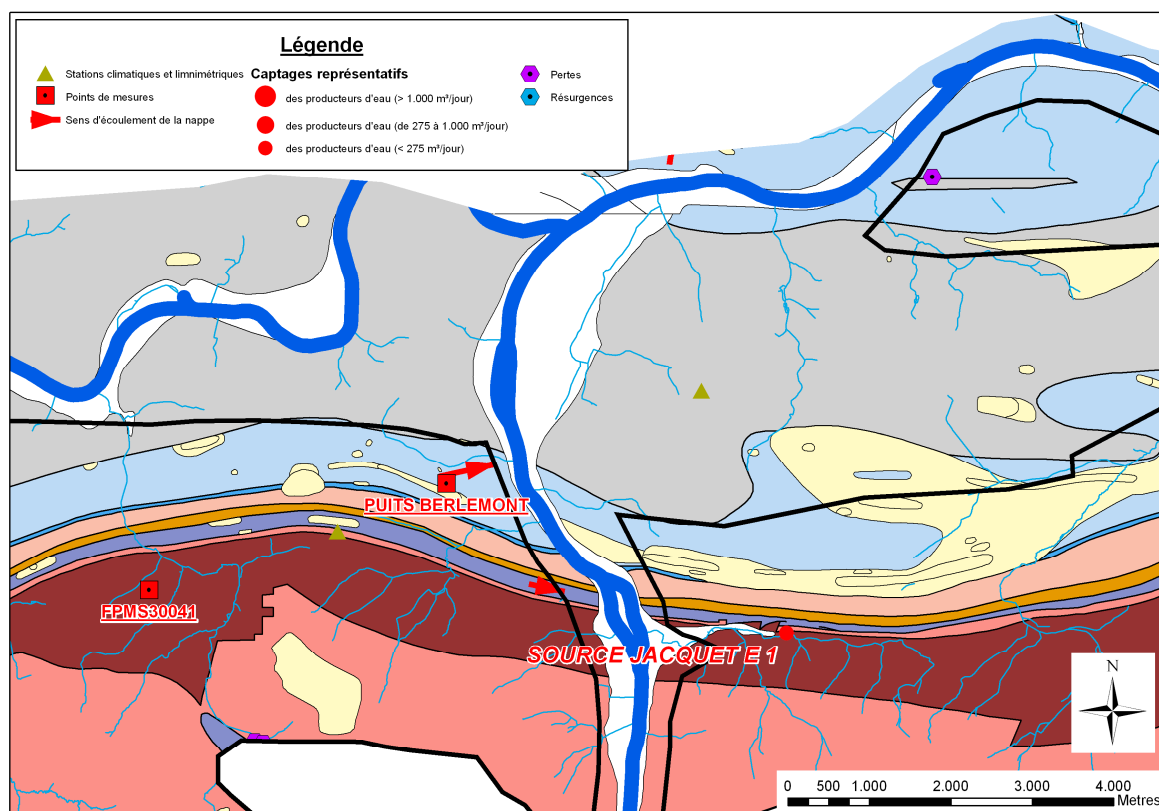


Figure 5.2-11. Localisation des piézomètres du bassin versant de la Meuse, dans la zone de Wépion.

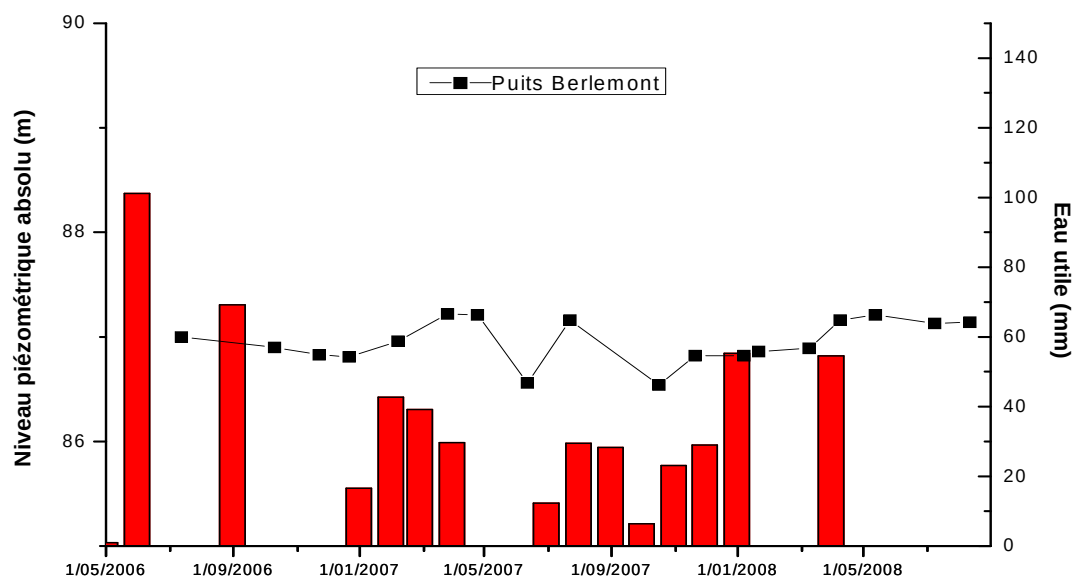


Figure 5.2-12. Variations piézométriques de la nappe aquifère dans le bassin versant de la Meuse, au Sud de Namur.

### 5.2.6 Rive droite de la Meuse, entre Namur et Huy

La zone considérée comprend l'extrémité aval du bassin du Samson et se prolonge vers le Nord-Est en direction du Hoyoux. Les formations géologiques qui la composent appartiennent au bord Sud du synclinorium de Namur. L'essentiel de la superficie de cette zone est constituée par les calcaires du Viséen et du Tournaisien. Ils sont recouverts d'une épaisseur variable de grès et de schistes du Houiller affleurant au cœur des structures synclinales.

L'écoulement souterrain dans les calcaires est dirigé vers le Nord. En effet, la Meuse est l'exutoire principal des aquifères calcaires dans cette zone. Le réseau hydrographique secondaire est principalement perdant sur les calcaires et n'influence donc pas les directions générales d'écoulement. Le Samson, présent à l'Ouest de la zone est lui aussi un exutoire de la nappe.

Les limites du bassin hydrogéologique correspondent aux formations Famenniennes de grès qui limite le flanc Sud du synclinorium de Namur. Au Nord, la Meuse est bien sûr la limite hydrogéologique du bassin alors qu'à l'Ouest, le Samson remplit le même rôle.

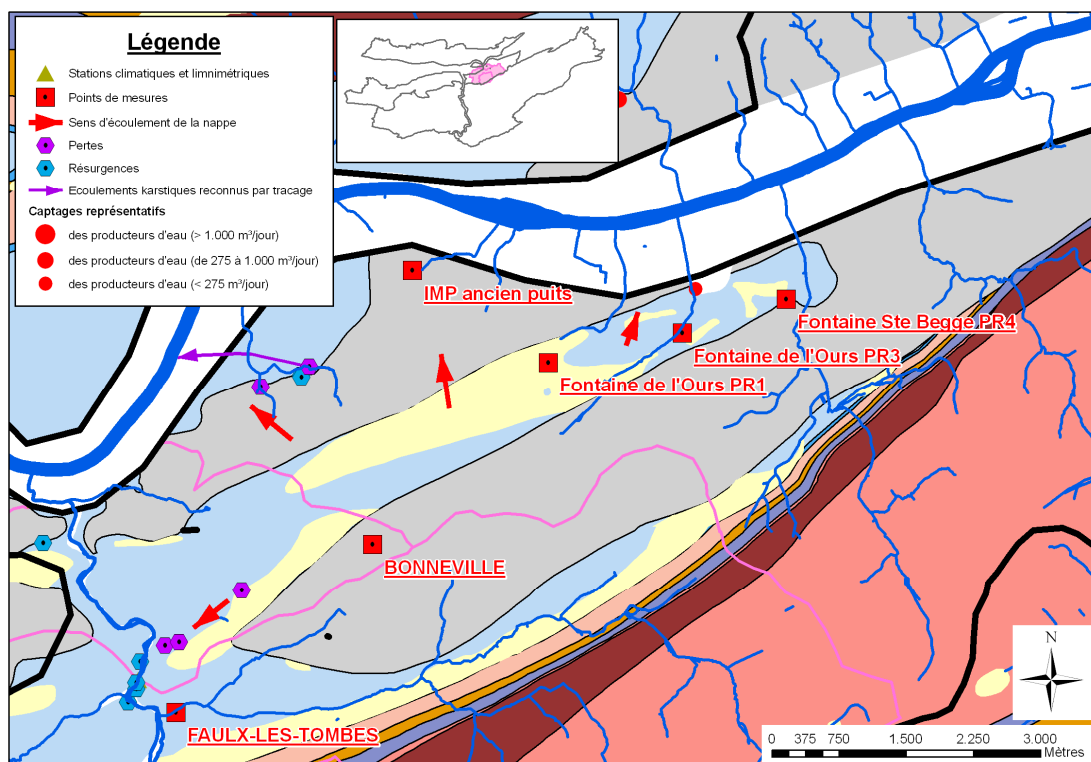
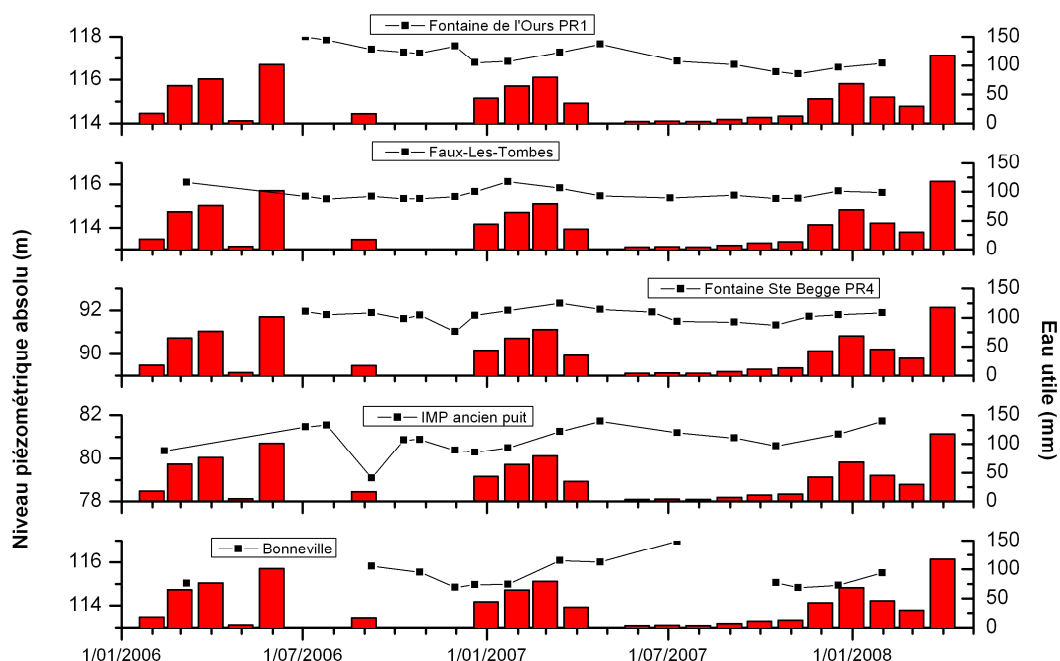


Figure 5.2-13 : Localisation des piézomètres situés en rive droite de la Meuse, entre Namur et Huy.



**Figure 5.2-14 : Mise en relation des variations de niveau piézométrique mesurées avec l'eau utile mensuelle calculée pour les piézomètres du bord sud du synclinorium de Namur, en rive droite de la Meuse, entre Namur et Huy.**

Six piézomètres ou puits domestiques ont été suivis à l'intérieur de la zone considérée. Ils sont tous crépinés dans les formations calcaires du Carbonifère. Les fluctuations de niveau piézométrique dans ces ouvrages sont représentées à la Figure 5.2-14. L'amplitude des variations est de l'ordre d'un à deux mètres. Ces fluctuations sont généralement marquées lors des périodes de recharge.

Le puits FAULX LES TOMBES réagit immédiatement aux précipitations utiles. La décharge de l'aquifère s'effectue aussi rapidement dû à la proximité du Samson, exutoire local de la nappe.

Le puits FONTAINE SAINTE BEGGE PR4 réagit assez lentement à la recharge et ne montre des fluctuations de niveau piézométrique que d'un mètre au cours d'une année.

Aux ouvrages FONTAINE DE L'OURS PR1 et FONTAINE DE L'OURS PR3, un décalage entre pic d'eau utile et haut niveau piézométrique est observé. Ce dernier ouvrage n'est pas représenté sur le graphique car le comportement de la nappe qui y est observé est similaire à celui du PR1. Les piézomètres implantés sous couvert des schistes du Houiller présentent également un décalage entre les pics d'eau utile et les hauts niveaux piézométriques. Dans cette zone, la nappe est fortement rabattue par la Meuse qui impose le niveau de base de l'aquifère ce qui lui confère un caractère libre sous ces schistes houillers. Cette couverture peu perméable explique pourquoi la nappe des calcaires ne réagit pas immédiatement à l'eau utile. L'eau alimentant la nappe située sous les schistes provient

soit des schistes surmontant l'aquifère soit d'une zone de recharge éloignée. Ces deux possibilités ayant le même effet : retarder l'élévation du niveau piézométrique par rapport aux valeurs d'eau utile.

Le puits IMP présente lui aussi un décalage entre les périodes de recharge de l'aquifère et les pics de niveau piézométrique. Il est également implanté dans les calcaires sous couvert des schistes du Houiller. L'eau de la recharge met donc un temps relativement long à atteindre la nappe sous couvert de formations géologiques peu perméables. Le même constat peut être fait pour le puits BONNEVILLE. Toutefois dans ce cas, le décalage peut atteindre 6 mois.

## **6 Conclusions : fonctionnement hydrodynamique de la masse d'eau**

La masse d'eau souterraine RWM012 correspond à une bande de terrains s'étirant autour de la Sambre en amont de Namur et autour de la Meuse en aval. Le substrat hydrogéologique est composé majoritairement d'aquitards à niveaux aquicludes du socle cambro-silurien et du Dévonien inférieur, de l'aquiclude à niveaux aquifère du Houiller et l'aquifère des calcaires du Carbonifère. Les formations détritiques du Frasnien-Fammennien et calcaires du Givetien-Frasnien ne représentent que de fines bandes intercalées entre les formations du Dévonien et du Carbonifère.

Pour rappel, le livrable D3.12 relatif à la masse d'eau RWM012, reprends les résultats et interprétations des mesures expérimentales réalisées dans le cadre du projet Synclin'EAU afin de d'estimer les ressources et de préciser les caractéristiques hydrauliques de la masses d'eau.

Ces mesures ont consisté en :

- La collecte de données météorologiques (précipitations, températures) auprès de l'IRM et du SETHY ;
- La collecte de données relatives aux débits de différents cours d'eau mesurés au droit de 13 stations de jaugeage gérées par le SETHY ou la DGRNE ;
- Un inventaire des données hydrogéologiques compilées dans la banque de données BD-Hydro.
- La mise en place et la gestion durant deux ans de 28 stations de jaugeage localisées dans la RWM021, au droit de seuils hydrogéologiques ;
- Le suivi piézométrique, durant deux ans, des aquifères à partir d'un réseau de 141 piézomètres ;

Les données récoltées ont permis :

- De calculer l'eau utile selon un pas de temps mensuel, selon la méthode modifiée de Thornthwaite, à l'aide du logiciel « WaterBudget » développé par le département ArGenCo de l'ULg;
- de calculer 13 bilans hydrogéologiques dits « historiques » sur des périodes s'étalant de 5 à 38 ans ;
- de calculer 28 bilans hydrogéologiques s'étendant sur une à deux années hydrogéologiques et ce pour des bassins versants caractéristiques de la masse d'eau ;
- d'estimer, par différentes méthodes, les débits de base de rivières caractéristiques ;
- Préciser l'amplitude et la dynamique des fluctuations piézométriques saisonnières de la masse d'eau ;
- d'évaluer, par une approche mathématique à confirmer expérimentalement, le coefficient d'infiltration des différentes unités hydrogéologiques ;
- de définir les grands principes du fonctionnement hydrodynamique des aquifères de la masse d'eau souterraine RWM021.

## 6.1 Bilans hydrologiques

Le calcul de bilans hydrogéologiques sur les bassins hydrographiques de la masse d'eau souterraine RWM012 a permis de caractériser relativement précisément les quantités d'eau en jeu dans leurs cycles hydriques. Les précipitations annuelles sur l'ensemble de la masse d'eau RWM012 varient entre 950 et 1050 mm. L'évapotranspiration est le terme le plus important du bilan car elle retourne plus de 60% de l'eau à l'atmosphère, laissant au bassin 40% pour le ruissellement et l'infiltration. Le ruissellement représente 20 à 30% des précipitations annuelles. Les variations de stock d'eau du sol se situent au alentour des 6% alors que les variations de réserves sont de 3%.

Il est bien sûr malaisé de tirer des conclusions générales à l'échelle d'une masse d'eau souterraine sur base de bilans hydrologiques établis sur deux bassins éloignés. Toutefois il est raisonnable d'affirmer que le transfert d'eau souterraine entre bassin hydrographique s'effectue préférentiellement via les calcaires du Carbonifère. Ceci ayant été mis en évidence dans les extrémités amont et aval du bassin versant du Samson.

Si une bonne gestion des ressources en eau doit avant tout se faire sur base pluri-annuelle, il n'en demeure pas moins que l'estimation des variations annuelles de la réserve des aquifères est un facteur qui doit systématiquement être intégré dans cette gestion. Le calcul de ces variations de réserve se fait principalement à partir du calcul de l'écoulement de base, d'où la nécessité de la mise en place de stations de jaugeage sur les principaux cours d'eau, au niveau des seuils hydrogéologiques. Un suivi piézométrique est également nécessaire.

## 6.2 Estimation des ressources renouvelables

Une méthode « exploratrice » visant à estimer les ressources renouvelables de la masse d'eau a été développée dans le cadre du projet Synclin'EAU. A partir de données acquises lors de l'étude des bilans, la méthode tente d'établir des coefficients d'infiltration globaux propres aux unités hydrogéologiques pour l'ensemble de la masse d'eau. Ces coefficients d'infiltration sont ensuite utilisés pour estimer les ressources renouvelables à l'échelle de la masse d'eau.

Les difficultés rencontrées lors de la mise en œuvre de cette approche indiquent l'inhomogénéité des coefficients d'infiltration à l'échelle de la masse d'eau, d'autres facteurs que le substratum conditionnant l'infiltration, par exemple la topographie ou l'occupation du sol. De ce fait l'application de la méthode reste affectée par une incertitude importante, l'estimation fournie étant accompagnée d'une marge d'imprécision assez importante (un intervalle d'incertitude de 37% autour

de l'estimation a été défini). Pour la masse d'eau RWM012, l'estimation des ressources renouvelables est de 52 (+/- 19) millions de m<sup>3</sup> par an.

Une analyse des ressources renouvelables engendrées par unité hydrogéologique a permis de mettre en évidence certaines tendances. Notamment que les calcaires carbonifères sont les plus productifs (17% des ressources renouvelables totales) et les plus exploités, 55% des ressources renouvelables seraient prélevées selon le scénario le plus pessimiste (scénario dans lequel on considère la limite inférieure de l'intervalle d'incertitude, c'est à dire -37%).

### 6.3 Caractéristiques hydrauliques des unités hydrogéologiques

Afin de représenter au mieux les propriétés hydrauliques des principales unités hydrogéologiques de la masse d'eau, une synthèse des données relatives aux paramètres hydrauliques des principales unités hydrogéologiques (conductivité hydraulique, transmissivité) a été réalisée sur base d'informations provenant d'études antérieures, mais également sur base de données récoltées dans le cadre du projet.

Parmi les méga-unités hydrogéologiques composants la masse d'eau RWM012, seuls l'aquifère des calcaires carbonifères et l'aquitard du Dévonien inférieur ont pu être différenciées sur base de leurs paramètres d'écoulement. La grande variabilité des valeurs de perméabilité (allant de  $7,5 \times 10^{-3}$  à  $6,6 \times 10^{-7}$  m/s), caractéristiques des aquifères de fissure, est mis en évidence pour les aquifères calcaires. Une variabilité nettement plus faible est observée dans les formations terrigènes, ce qui s'explique essentiellement par l'absence de phénomène de karstification. L'aquitard à niveau aquiclude du Dévonien inférieur présente des perméabilités significativement plus faibles. Un nombre de valeurs plus élevé serait toutefois nécessaire afin de mieux représenter statistiquement ces unités hydrogéologiques, tous deux sous-échantillonnées.

### 6.4 Piézométrie de la masse d'eau.

Dans le cadre du projet, 29 piézomètres ont été suivis mensuellement, certains, équipés de sondes automatiques, ont enregistré les variations piézométriques selon un pas de temps de 15 minutes. Les piézomètres ont été sélectionnés en fonction de divers critères : situation au droit d'un aquifère (grès et calcaires) ; accessibilité, profondeur, localisation en tête de bassin ou à l'exutoire,... Le suivi piézométrique a eu pour objectif de préciser l'hydrodynamisme des aquifères et accessoirement de confirmer les termes du bilan. L'importance de ces suivis a été notamment démontrée lors du calcul



des bilans. Malgré le grand nombre de piézomètres, la faible densité du réseau et l'hétérogénéité du substrat géologique ont fait qu'il n'a pas été possible de dresser des cartes piézométriques.

Durant la période d'observations les niveaux piézométriques dans la RWM012 ont fluctué de manière saisonnière avec une amplitude atteignant localement 15m dans les calcaires carbonifères. Lorsque ceux-ci sont recouverts de schistes houillers, l'infiltration des eaux météoriques est plus lente, ce qui se marque par un retard plus ou moins élevé des réactions de la nappe par rapport aux pics d'eau utile. Certains piézomètres présentent des niveaux extrêmement stables, en particulier lorsque l'ouvrage est situé dans les formations terrigènes du Dévonien inférieur, où l'amplitude des fluctuations ne dépasse guère 5m. Il s'agit d'un milieu dans lequel la recharge souterraine est faible.

De manière générale, les fluctuations sont d'autant plus fortes que les piézomètres se situent en tête de bassin versant et dans des aquifères de forte conductivité hydraulique (aquifère des calcaires carbonifères). L'amplitude des fluctuations piézométriques saisonnières augmente avec l'éloignement du piézomètre par rapport au niveau de base régional imposé par les rivières drainantes. Le suivi de l'évolution quantitative des nappes doit donc se faire préférentiellement à partir de piézomètres localisés en tête de bassin versant.

## 6.5 Fonctionnement hydrodynamique de la masse d'eau.

L'interprétation des profils piézométrique et l'analyse des bilans hydrogéologique ont permis de déterminer les principaux sens d'écoulements souterrains de la masse d'eau RWM012.

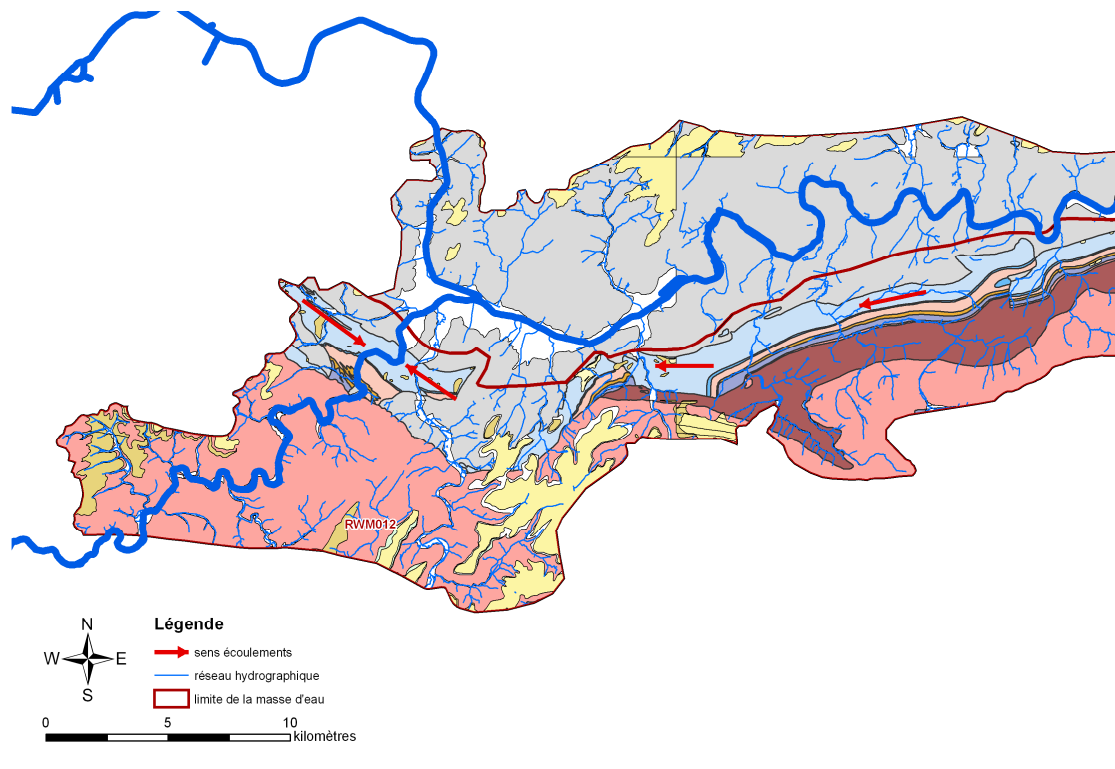
Les directions d'écoulement des eaux sur les substrats géologiques du Dévonien et du Houiller sont influencées par l'hydrographie. Quantitativement, la composante de ruissellement de surface domine largement car la faible perméabilité des terrains ne permet pas d'écoulements souterrains importants (Figure 6.5-1. Principales directions d'écoulements des nappes aquifères au sein de la masse d'eau RWM012, partie occidentale).

Les écoulements souterrains sont par contre beaucoup plus importants dans les calcaires du Carbonifère. A l'Ouest de la masse d'eau, ces écoulements sont orientés NO-SE, donc parallèlement au réseau hydrographique secondaire et en direction de la Sambre qui impose le niveau hydrogéologique de base (Figure 6.5-1).

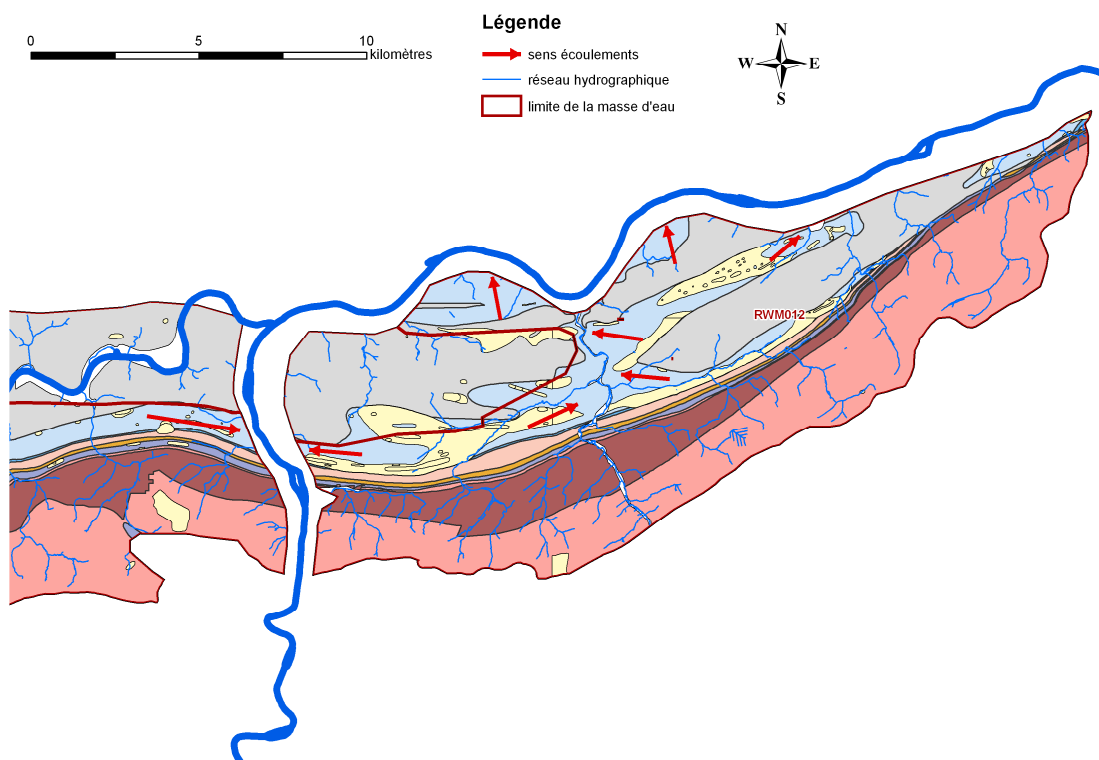
Au centre de la masse d'eau, une zone très étroite est drainée par la Meuse, en amont de Namur. Les écoulements souterrains y sont orientés selon une direction O-E, parallèlement à l'orientation des couches géologiques (Figure 6.5-1 et Figure 6.5-2). Les limites Est et Ouest de cette

zone drainée directement par la Meuse sont assez floues, les limites des bassins versants hydrogéologiques pouvant différer fortement des limites des bassins hydrographiques.

A l'Est de la masse d'eau, l'examen des données de piézométrie et les conclusions des bilans hydrologiques montrent que l'écoulement souterrain suit une direction Nord-Sud (Figure 6.5-2), vers la plaine alluviale de la Meuse. Toutefois, dans ces calcaires, les directions d'écoulement peuvent être localement influencées par la direction de fracturation des roches ou par l'orientation du réseau karstique.



**Figure 6.5-1. Principales directions d'écoulements des nappes aquifères au sein de la masse d'eau RWM012, partie occidentale.**



**Figure 6.5-2. Principales directions d'écoulements des nappes aquifères au sein de la masse d'eau RWM012, partie orientale.**

## **Bibliographie**

Castany, 1982. Principes et méthodes de l'hydrogéologie, Dunod, Paris, 236.

Helsel, D.R., and Hirsch, R.M., 1992, Statistical methods in water resources: Amsterdam, Pays-Bas, Elsevier, pp 529.

Wojciech R, 2007. EU water framework directive versus real needs of groundwater management, Water Resour. Manage, 21,1363-1372

## **ANNEXE 1 : Légende des méga-unités hydrogéologique de la masse d'eau RWM012**

### **Unités hydrogéologiques de couverture (mesozoïque, cénozoïque et quaternaire)**

|                                                                                   |                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
|  | AQUICLUDE D'ARGILES DE REMPLISSAGE |
|  | AQUIFERE ALLUVIAL                  |
|  | AQUIFERE DES CRAIES DU CRETACE     |
|  | AQUIFERE DES SABLES DE L'EOCENE    |
|  | AQUIFERE DES SABLES DE REMPLISSAGE |
|  | AQUIFERE DES SABLES DU PALEOCENE   |
|  | AQUIFERE DES SABLES DU SANTONNIEN  |
|  | AQUIFERE DES TERRASSES FLUVIATILES |

### **Unités hydrogéologiques du paléozoïque**

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

## ANNEXE 2 (Valeurs de transmissivité et de conductivité hydraulique de la masse d'eau RWM012)

| Nom                        | X      | Y      | H crépines<br>(m) | T(m <sup>2</sup> /s) |          |          | K (m/s)  | méga-unité                                       | Source      |
|----------------------------|--------|--------|-------------------|----------------------|----------|----------|----------|--------------------------------------------------|-------------|
|                            |        |        |                   | min                  | max      | moy      |          |                                                  |             |
| Fontaine de l'Ours PR1     | 200074 | 130009 | 28                | 1,7E-05              | 2,0E-05  | 1,9E-05  | 6,6E-07  | Aquifère des calcaires carbonifères              | SWDE        |
| Fontaine de l'Ours PR3     | 201569 | 130339 | 16                | 5,0E-05              | 2,0E-04  | 1,2E-04  | 7,8E-06  | Aquifère des calcaires carbonifères              | SWDE        |
| Fontaine Ste Begge PR4     | 202730 | 130715 | 20                | 1,7E-04              | 3,8E-03  | 1,9E-03  | 9,9E-05  | Aquifère des calcaires carbonifères              | SWDE        |
| Fontaine Ste Begge PR5     | 202025 | 130855 | 16                | 7,7E-07              | 2,6E-05  | 7,5E-06  | 8,5E-07  | Aquifère des calcaires carbonifères              | SWDE        |
| AQS AIS FAUBOURG P0        | 165750 | 121723 | 10                |                      |          | 1,5E-01  | 7,5E-03  | Aquifère des calcaires carbonifères              | BDHydro     |
| AQS AIS FAUBOURG P01       | 165734 | 121704 | 10                |                      |          | 1,5E-01  | 7,5E-03  | Aquifère des calcaires carbonifères              | BDHydro     |
| AQS AIS FORGES P1 (Cascad  | 165193 | 121317 | 56                |                      |          | 1,5E-02  | 5,0E-04  | Aquifère des calcaires carbonifères              | BDHydro     |
| SWDE PR2                   | 170548 | 122211 | 60                | 7,9E-05              | 7,3E-04  | 3,0E-04  | 5,0E-06  | Aquifère des calcaires carbonifères              | BDHydro     |
| SWDE PR3                   | 168021 | 121505 | 20                | 9,0E-05              | 7,1E-04  | 4,3E-04  | 2,2E-05  | Aquifère des calcaires carbonifères              | BDHydro     |
| FPMS27249                  | 171316 | 122552 | 30                | 4,0E-05              | 5,1E-04  | 2,8E-04  | 9,4E-06  | Aquifère des calcaires carbonifères              | BDHydro     |
| FALISOLLE AIE P1           | 167931 | 121825 | 34                | 6,8E-05              | 4,2E-04  | 2,1E-04  | 8,1E-06  | Aquifère des calcaires carbonifères              | BDHydro     |
| FPMS4 - Landelies          | 149111 | 120184 | 28                | 1,30E-06             | 7,50E-06 | 4,40E-06 | 4,4E-08  | Aquifère des calcaires carbonifères              | Synclin'eau |
| ULG 1- Goyet               | 196654 | 126009 | 36                | 1,10E-04             | 1,20E-04 | 1,16E-04 | 1,16E-06 | Aquifère des calcaires carbonifères              | Synclin'eau |
| ULG9 - Villers-aux-Tours   | 230988 | 133540 | 36                | 5,20E-05             | 1,00E-04 | 7,42E-05 | 7,42E-07 | Aquiclude à niveaux aquifères du Dévonien Inféri | Synclin'eau |
| Puits "Le Halleux"         | 226000 | 135315 | 88                | 1,90E-05             | 5,10E-04 | 1,52E-04 | 1,73E-06 | Aquitard à niveaux aquicludes du Dévonien Inféri | Synclin'eau |
| F11-Chatqueue -PP6 (RWM016 | 231960 | 142302 | 12                | 2,70E-07             | 2,00E-05 | 7,69E-06 | 6,41E-07 | Aquitard à niveaux aquicludes du Dévonien Inféri | BDHydro     |
| PP4-Chatqueue (RWM016)     | 232180 | 142710 | 12                | 1,50E-06             | 6,35E-05 | 2,10E-05 | 2,41E-06 | Aquitard à niveaux aquicludes du Dévonien Inféri | BDHydro     |
| F3-Chatqueue -PP9 (RWM016) | 232526 | 141895 | 20                | 2,40E-05             | 1,40E-04 | 8,18E-05 | 4,09E-06 | Aquitard à niveaux aquicludes du Dévonien Inféri | BDHydro     |
| Bois-St-Jean-10 (RWM016)   | 233793 | 143169 | 8                 | 1,00E-06             | 7,90E-06 | 4,45E-06 | 5,50E-07 | Aquitard à niveaux aquicludes du Dévonien Inféri | BDHydro     |
| Bois-St-Jean-2 (RWM016)    | 234000 | 142970 | 7                 | 2,00E-06             | 1,20E-05 | 6,55E-06 | 8,50E-07 | Aquitard à niveaux aquicludes du Dévonien Inféri | BDHydro     |
| Bois-St-Jean-6A (RWM016)   | 234172 | 143459 | 7                 | 6,00E-07             | 1,20E-05 | 4,83E-06 | 6,00E-07 | Aquitard à niveaux aquicludes du Dévonien Inféri | BDHydro     |
| Bois-St-Jean-3 (RWM016)    | 234198 | 143166 | 7                 | 3,90E-05             | 8,70E-05 | 6,63E-05 | 9,55E-06 | Aquitard à niveaux aquicludes du Dévonien Inféri | BDHydro     |
| Bois-St-Jean-14 (RWM016)   | 234289 | 143477 | 4                 | 2,10E-05             | 3,50E-05 | 2,63E-05 | 2,45E-06 | Aquitard à niveaux aquicludes du Dévonien Inféri | BDHydro     |

SWDE = Société Walonne des Eaux

BDHydro = Banque de Données Hydrologique

en rouge = K moyen recalculé par Synclin'EAU, i.e. en divisant la transmissivité moyenne par la hauteur crépinée de l'ouvrage