



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

Université de Liège



**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**

Délivrable D3.42

Rapport sur l'établissement et l'application d'un indicateur  
quantitatif

## TABLE DES MATIERES

<b><u>1 INTRODUCTION .....</u></b>	<b><u>4</u></b>
<b><u>2 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE RELATIVE AU DEVELOPPEMENT ET A LA MISE EN ŒUVRE D'INDICATEURS QUANTITATIFS.....</u></b>	<b><u>6</u></b>
<b><u>3 INDICATEURS QUANTITATIFS PROPOSES ET TESTES DANS LE CADRE DU PROJET SYNCLIN'EAU.....</u></b>	<b><u>13</u></b>
<b>3.1 INDICATEUR DES « MOYENNES MENSUELLES ».....</b>	<b>13</b>
3.1.1 DESCRIPTION DE L'INDICATEUR .....	13
3.1.2 APPLICATION DE L'INDICATEUR « MOYENNES MENSUELLES » DANS LE CADRE DU PROJET SYNCLIN'EAU.....	15
3.1.2.1 Application de l'indicateur à la masse d'eau RWM011 .....	16
3.1.2.2 Application de l'indicateur à la masse d'eau RWM021 .....	23
3.1.2.3 Application de l'indicateur à la masse d'eau RWM012 .....	25
<b>3.2 ETABLISSEMENT D'INDICATEURS QUANTITATIFS PAR L'APPROCHE DES DEBITS DE BASES .....</b>	<b>26</b>
3.2.1 DESCRIPTION DE L'INDICATEUR .....	26
3.2.1.1 Rappels théoriques.....	26
3.2.1.2 Présentation des techniques de séparation d'hydrogrammes.....	28
3.2.2 APPLICATION DE L'INDICATEUR DANS LE CADRE DU PROJET SYNCLIN'EAU .....	31
3.2.2.1 Présentation des bassins tests.....	31
3.2.2.2 Caractéristiques géologiques .....	32
3.2.2.3 Caractéristiques hydrologiques.....	35
3.2.2.4 Comparaison des techniques de séparation.....	38
3.2.2.5 Corrélation entre les niveaux piézométriques et le débit de base des cours d'eau en période d'étiage	41
3.2.2.6 Calcul des périodes de retour VCN3 .....	43
3.2.2.6.1 Contrôle des données .....	44
3.2.2.6.2 Analyse fréquentielle des débits de base VCN3 .....	45
3.2.2.6.3 Représentation graphique .....	48
<b>3.3 INDICATEUR « TEMPO ».....</b>	<b>53</b>
3.3.1 DESCRIPTION DE L'INDICATEUR .....	53
3.3.1.1 Introduction.....	53
3.3.1.2 Approche théorique.....	54
3.3.1.3 Fonction de transfert pluie – niveau piézométrique.....	55
3.3.1.4 Fonction de transfert pluie – niveau piézométrique - débit .....	56

3.3.1.5	Calibration des fonctions de transferts.....	56
3.3.1.6	Modèle de transfert pluie – niveau piézométrique.....	59
3.3.1.7	Modèle de transfert pluie-débit total.....	62
3.3.1.8	Modèle de transfert pluie – débit du cours d'eau.....	66
3.3.1.9	Modèle de transfert pluie – niveau piézométrique – débit total.....	67
3.3.1.10	Evaluation du temps de réponse du système pour atteindre une valeur seuil de débit d'étiage ou de hauteur piézométrique .....	71
3.3.1.10.1	Modèle pluie – débit total .....	71
3.3.1.10.2	Modèle pluie-débit du cours d'eau .....	73
3.3.1.10.3	Modèle pluie-niveau piézométrique .....	74
3.3.1.11	Conclusions et perspectives .....	76
<b>4</b>	<b><u>SYNTHESE ET CONCLUSIONS .....</u></b>	<b><u>78</u></b>
<b>4.1</b>	<b>METHODE DES « MOYENNES MENSUELLES » .....</b>	<b>78</b>
<b>4.2</b>	<b>METHODE DES « PERIODES DE RETOUR – VCN3 » .....</b>	<b>79</b>
<b>4.3</b>	<b>METHODE « TEMPO » .....</b>	<b>79</b>
<b>4.4</b>	<b>COMPARATIF DES TROIS METHODES TESTEES .....</b>	<b>80</b>
<b>4.5</b>	<b>PERSPECTIVE EN MATIERE D'ETABLISSEMENT DE RESEAUX ET D'INDICATEURS QUANTITATIFS. 83</b>	
4.5.1	VERS UN INDICATEUR QUANTITATIF PLUS CONSISTANT.....	83
4.5.2	MISE EN ADÉQUATION DES RÉSEAUX QUANTITATIFS .....	85
<b>5</b>	<b><u>BIBLIOGRAPHIE .....</u></b>	<b><u>87</u></b>
	<b><u>ANNEXES .....</u></b>	<b><u>90</u></b>

## 1 Introduction

La Directive Cadre Européenne 2000/60 (DCE) impose aux Etats Membres d'atteindre à l'horizon 2015 un bon état quantitatif et qualitatif des eaux et de gérer ces eaux de manière intégrée à l'échelle des masses d'eau. Au sens de la directive cadre, le bon état quantitatif recouvre une triple exigence :

1. l'équilibre doit être assuré entre le taux annuel moyen de captage (prélèvement annuel moyen à long terme) et la ressource en eau souterraine disponible au sein de la masse d'eau souterraine;
2. les niveaux des nappes d'eau souterraine doivent être maintenus de manière à garantir certaines fonctions telles que l'alimentation des eaux de surface, des zones humides et écosystèmes associés;
3. les phénomènes d'intrusion d'eau salée dans les eaux souterraines doivent être prévenus (hors sujet dans le cadre de l'étude Synclin'EAU).

Dans le cadre du projet Synclin'EAU, le constat a été effectué que le bilan hydrogéologique et l'évaluation des réserves en eau souterraine sont au cœur de la problématique d'une gestion quantitative optimale de la masse d'eau souterraine. Partant de là, option a été prise de définir des réseaux de surveillance quantitative comportant des points de trois types : (1) des suivis piézométriques, (2) des suivis de sources et émergences, (3) des suivis limnimétriques de seuils hydrogéologiques, l'ensemble des informations collectées en ces points devant idéalement permettre de calculer les différents termes du bilan hydrogéologique (Cf. Délivrable D3.31. Etablissement de réseaux quantitatifs provisoires, Décembre 2006).

Chaque point de mesure du réseau quantitatif apporte des informations sur l'état quantitatif de la masse d'eau souterraine, avec un certain degré d'intégration sur son ensemble (relativement ponctuel pour un niveau piézométrique, potentiellement plus large pour un suivi d'émergences ou de seuils hydrogéologiques). Pour enclencher le processus décisionnel devant conduire à une gestion soutenable de la masse d'eau souterraine d'un point de vue quantitatif, ces informations doivent, dans la mesure du possible, être agrégées sous la forme d'indicateurs de cet état quantitatif. D'une manière générale, un **indicateur** est un outil d'évaluation et d'aide à la décision grâce auquel on va pouvoir mesurer une situation (**indicateur d'état**) ou une tendance (**indicateur d'évolution**), de façon relativement objective, à un instant donné et pour une zone donnée. Cet indicateur doit constituer une synthèse d'une situation ou d'une information complexe ne pouvant être appréhendée directement, offrant la possibilité à des acteurs différents (scientifiques, gestionnaires, politiques et citoyens) de juger de la situation.

Un indicateur peut en agréger d'autres. Il doit exister une relation causale entre le fait mesuré (indiqué) et l'indicateur. L'utilité d'un indicateur dépend d'abord de sa capacité à refléter la réalité, mais aussi de sa simplicité d'acquisition et de compréhension.

L'indicateur théoriquement le plus représentatif et le plus intégrateur est sans doute l'estimation des réserves en eaux souterraines présentes au sein de la masse d'eau souterraine, voire des réserves « soutenables » (sustainable yield) si l'on intègre des fonctions annexes de l'eau, telles que l'alimentation des eaux de surface. Cette évaluation repose sur le calcul du **bilan hydrogéologique**. Sur la même base, il est envisageable de développer des indicateurs dérivés comme, par exemple, un indicateur de pression quantitative défini par le taux d'exploitation rapporté à la réserve (« soutenable »).

Cependant, dans beaucoup de contextes hydrogéologiques, il reste difficile d'évaluer de façon continue le bilan hydrogéologique et les concepts qui en découlent (réserves soutenables et autres) avec une précision suffisante (pré-requis de la DCE) pour réellement suivre l'évolution de ces indicateurs au cours du temps. Dans ce cas, il est préférable de développer des indicateurs moins élaborés (suivi de la piézométrie, suivi de débits...) qui, même s'ils sont moins intégrateurs, permettent de mettre en évidence plus aisément l'évolution ponctuelle ou globale de l'état quantitatif de la masse d'eau souterraine.

L'objectif de ce livrable est de passer en revue, via un travail bibliographique, une série d'indicateurs quantitatifs développés et mis en œuvre dans d'autres pays et régions. Partant de là, certains indicateurs ont été sélectionnés et/ou développés et des données disponibles et acquises dans le cadre du projet Synclin'EAU ont été utilisées en vue de tester ces indicateurs sur des cas concrets. Sur cette base, une analyse en partie comparative, et une synthèse des potentialités des indicateurs testés est réalisée, de manière à dégager leurs avantages respectifs et de fournir des recommandations pratiques relatives à l'établissement et à la gestion des réseaux quantitatifs dans ce contexte.

## **2 Revue bibliographique relative au développement et à la mise en œuvre d'indicateurs quantitatifs**

La construction d'un indicateur peut s'effectuer selon quatre approches conceptuelles<sup>1</sup> que sont les approches *bottom-up*, *top-down*, *systémique* et *de cause à effet*. L'approche de cause à effet est la plus largement utilisée pour le développement d'un indicateur : plusieurs concepts ont été développés comme la séquence Pression-Etat-Réponse (PER ou PSR), élaborée par l'OCDE (Organisation pour la Coopération et le Développement Economique), ou plus sophistiquée, comme la FDPEIR (Force-Directrice-Pression-Etat-Impact-Réponse (DPSIR)). L'approche *bottom-up* consiste à assembler des données primaires détaillées en différents niveaux hiérarchiques d'indicateur, en utilisant une approche intuitive et mathématique. Cette approche a tendance à être critiquée comme étant trop restrictive mais est cependant utilisée lorsque les données sont abondantes. L'approche *top-down* est basée sur une description fonctionnelle du système et des objectifs à atteindre et décompose l'architecture jusqu'à la donnée primaire afin de déterminer les besoins à mettre en œuvre. Les modèles «boîtes noires» sont souvent utilisés dans ce type de système afin de faciliter la mise en pratique mais ne sont pas assez détaillés pour être validables. L'approche systémique analyse les flux entrant et sortant ainsi que les stocks avant de définir un indicateur. Cette méthode est prometteuse mais souvent complexe et considérée parfois comme trop académique.

Lorsque le choix du cadre conceptuel est effectué, l'étape suivante pour la conception de l'indicateur<sup>2</sup> repose sur des choix de normalisation tels que la détermination de valeurs de références (seuil, normes, valeurs critiques,..) et le mode de visualisation (code couleur, évolution graphique) le plus représentatif. Le tableau suivant illustre les types d'indicateurs mis en œuvre dans d'autres pays et régions et détermine l'applicabilité de ces méthodes dans le cadre de Synclin'EAU.

---

<sup>1</sup> Jaroslav Vrba and Annukka Lipponen, 2007. Groundwater Resources Sustainability Indicators .UNESCO, IAEA,IAH

<sup>2</sup> Ghislain Geniaux , novembre 2006. Indicateurs de développement durable : un panorama des principales références bibliographiques, cadres conceptuels et initiatives internationales-.Ecodeveloppement, UR767, INRA, F84000 Avignon

Nom	Origine	Catégorie	Méthodologie	Remarques/ Applicabilité
Méthode des seuils d'alerte <sup>3</sup>	BRGM –Corse (nappe alluviale)	B-U ; notion de seuil et valeur critique ; Semi-empirique	L'indicateur est déterminé sur base de l'analyse statistique des séries piézométriques existantes sur les différentes nappes (seuil d'alerte et abaque).	Non applicable. Les connaissances du niveau du substratum des aquifères ne sont pas assez précises pour effectuer les calculs nécessaires.
Méthode d'analyse de tendance <sup>4</sup> (MAT)	Projet Scaldit (Belgique)	Empirique et intuitif (B-U) ; T	Méthode mise au point par la FPMs, sur base du suivi piézométrique des points du réseau quantitatif (calcaire dévono-carbonifère). Cette méthode suit une méthode statistique de traitement de séries temporelles <sup>5</sup> . L'indicateur résultant est un code de couleur déterminé à partir de deux critères statistiques.	Non applicable. Données actuelles trop éparées. La MAT nécessite des données assez régulières et des chroniques assez longues.

---

<sup>3</sup> Aout 2005. Seuils d'alerte pour la gestion des eaux souterraines des nappes alluviales du Baracci, Liamone, Chiuni, Gravone, Taravo et Tarco-BRGM/RP-54015-FR –Rapport final

<sup>4</sup> Convention FPMs–UCL-RW, Mars2006. Caractérisation des masses d'eau souterraine en région wallonne à partir des connaissances disponibles sur les aquifères

<sup>5</sup> MELARD Guy, 1990–Méthodes de prévision à court terme -Editions de l'université Libre de Bruxelles –Editions Ellipses

Nom	Origine	Catégorie	Méthodologie	Remarques/ Applicabilité
Moyennes Mensuelles du niveau piézométrique comparées à celles de l'historique piézométrique	France	E et T ; notion de seuil	Les indicateurs mettent en évidence le caractère normal ou anormal du niveau piézométrique de hautes et basses eaux vis-à-vis de l'historique piézométrique (moyennes inférieure et supérieure).	Applicable. Développement au chapitre 2.1.
Indicateur de l'état quantitatif de la ressource en eau en Région du Centre <sup>6</sup>	France	B-U ; E et T ; notion de seuil et valeur critique	L'indicateur (en mètre) est calculé en effectuant piézomètre par piézomètre, la moyenne des mesures, en pondérant chacune de ces moyennes par la superficie du bassin (hydrogéologique) associé à chaque piézomètre. Cet indicateur est ensuite comparé à des fréquences de retour (Décennale sèche, Quinquennale humide...) exprimées en fonction du taux de remplissage de la nappe (couleur)	Non applicable. Le nombre de données piézométriques historiques disponibles est insuffisant pour un traitement statistique.

<sup>6</sup> Références de la publication [http://www.centre.ecologie.gouv.fr/Hydrologie/Situation\\_hydro.htm](http://www.centre.ecologie.gouv.fr/Hydrologie/Situation_hydro.htm)



Nom	Origine	Catégorie	Méthodologie	Remarques/ Applicabilité
La Méthode APRONA (Association pour la PROtection de la Nappe phréatique de la plaine d'Alsace <sup>7</sup> )	France	B-U ; E	Consiste à comparer les données piézométriques mensuelles aux moyennes interannuelles. L'indicateur résultant de cette comparaison est un code de couleur allant du rouge (niveaux piézométriques inférieurs à la moyenne) au bleu (niveaux piézométriques supérieurs à la moyenne) et est associé à un indice de niveau.	Applicable. Non développé Analogue à la moyenne mensuelle mais est cependant plus obsolète au niveau de la précision de l'indicateur.
La méthode VCN3 <sup>89</sup> ,	France (eau de surface) Belgique	B-U ; notion de seuil	L'indicateur repose sur le calcul d'un débit moyen minimum sur 3 jours consécutifs observé au cours d'une période déterminée, en l'occurrence le mois calendaire (1 → 31/01, 1 → 28/02,...), dont il a été montré qu'il pouvait être corrélé avec la piézométrie.  Cet indicateur est ensuite comparé à des fréquences de retour, calculée sur base de chroniques reconstituées.	Applicable. Développement au chapitre 2.2

<sup>7</sup>Références de la publication [http://www.aprona.net/pdf/piezometrie/Rapport\\_PIEZO\\_2004.pdf](http://www.aprona.net/pdf/piezometrie/Rapport_PIEZO_2004.pdf)

<sup>8</sup><http://www.eaufrance.fr/docs/bsh/2007/11>

<sup>9</sup>[http://www.centre.ecologie.gouv.fr/Hydrogeologie/bulletin\\_de\\_situation\\_hydrogeol.htm](http://www.centre.ecologie.gouv.fr/Hydrogeologie/bulletin_de_situation_hydrogeol.htm)

Nom	Origine	Catégorie	Méthodologie	Remarques/ Applicabilité
Méthode TEMPO	BRGM France	Approche systémique	L'indicateur quantitatif a pour objectif d'évaluer l'état et la dynamique de l'hydrosystème étudié (nappe d'eau souterraine) sur base de l'établissement et l'ajustement d'une fonction de transfert « alimentée par un nombre limité de mesures et d'observations acquises dans l'hydrosystème visé. (utilisation du logiciel Tempo développé par le BRGM).	Applicable. Développement au chapitre 2.3
Ressources renouvelable en eaux souterraines par habitant (m <sup>3</sup> /an) <sup>10</sup>	Unesco, pays en manque d'eau	PER	Cet indicateur exprime la quantité totale annuelle des ressources renouvelables en eau souterraine (hors eaux salines et saumâtres) par habitant au niveau régional ou national.	L'objectif est d'estimer la quantité d'eau potable, d'eau pour l'agriculture, l'industrie et pour les écosystèmes dans une région donnée. Ce type d'indicateur n'est pas pertinent dans le cadre de Synclin'EAU (indicateur d'impact)

<sup>10</sup> Jaroslav Vrba and Annukka Lipponen- Groundwater Resources Sustainability Indicators –UNESCO, IAEA,IAH-UNESCO 2007

Nom	Origine	Catégorie	Méthodologie	Remarques/ Applicabilité
Total des eaux souterraines captées/ recharge de l'aquifère <sup>11</sup>	Unesco (pays aride et semi-aride)	E	Cet indicateur compare le volume total d'eau souterraine captée (captages, sources, industries, agriculture, ..) au volume total de la recharge de l'aquifère (pluviométrie, échanges avec les eaux de surface, rejets dans l'aquifère (égouts,...)). Seulement trois scénarios sont proposés afin d'interpréter la valeur de l'indicateur (inferieur, égal ou supérieur à une valeur seuil).	Applicable, non appliquée car trop simplifiée
Total des eaux souterraines captées/ ressource exploitable de l'aquifère <sup>12</sup>	Unesco	E	Cet indicateur compare le volume total d'eau souterraine captée (captages, sources, industries, agriculture, ..) au volume de ressource exploitable de l'aquifère (sustainable yield) <sup>13</sup> . L'intérêt de cet indicateur permet de mettre en évidence les zones surexploitées (ou pas) de l'aquifère.	Applicable, non appliquée car trop simplifiée

<sup>11</sup> <sup>12</sup> <sup>14</sup>.Jaroslav Vrba and Annukka Lipponen- Groundwater Resources Sustainability Indicators –UNESCO, IAEA,IAH-UNESCO 2007

Nom	Origine	Catégorie	Méthodologie	Remarques/ Applicabilité
Déplétion des eaux souterraines <sup>14</sup>	Unesco	E	Cet indicateur exprime le déficit en eau souterraine en comparant la somme des surfaces de zone à problèmes avec le total des zones étudiées. Par zones à problèmes sont repris les phénomènes suivants : pertes de production ou tarissements de sources dans des zones à haute densité de productions associés à une tendance à la baisse du niveau de la nappe; changement significatif du débit de base des rivières (monitoring) et /ou disparition de zones humides ; changement de la qualité des eaux souterraines ; phénomène de subsidence.	Applicable, non appliquée car jugée trop empirique

**Tableau 1. Synthèse d'indicateurs quantitatifs développés et mis en oeuvre dans d'autres pays et régions.**

### **3 Indicateurs quantitatifs proposés et testés dans le cadre du projet Synclin'EAU**

#### **3.1 Indicateur des « Moyennes Mensuelles »**

Cette méthode a été développée en France pour son application en Champagne Ardennes, sur l'aquifère des craies <sup>15</sup>.

Elle a été testée sur les masses d'eau étudiées dans le cadre du projet (RWM011, RWM012 et RWM021). Une première partie reprend le but et la définition de cet indicateur, ensuite sa mise en œuvre est développée. La seconde partie illustre l'application de la méthode dans le cadre du projet Synclin'Eau. Elle reprend, masse d'eau par masse d'eau, la synthèse des différents résultats obtenus. Les avantages et inconvénients de cette méthode ainsi que son applicabilité et les perspectives futures seront discutées au Chapitre 4

##### *3.1.1 Description de l'indicateur*

La méthode des « Moyennes Mensuelles » permet d'avoir un « regard rapide » sur l'état de la nappe à un endroit précis (celui du piézomètre). Les données nécessaires à son application sont des chroniques piézométriques et des mesures piézométriques mensuelles réalisées sur l'année pour laquelle on veut qualifier l'état quantitatif de la masse d'eau souterraine. Les chroniques piézométriques ne doivent pas obligatoirement être régulières, continues et complètes.

Dans le cas présent, les mesures piézométriques enregistrées pendant le projet Synclin'EAU durant les années hydrologiques 2006-2007 et 2007-2008 ont été utilisées. Ces mesures sont comparées aux piézométries moyennes, minimales et maximales mensuelles calculées à partir des chroniques piézométriques historiques. Cette comparaison indique l'état de l'aquifère ainsi que la tendance de l'évolution durant ces deux dernières années hydrologiques.

La synthèse des résultats obtenus pour les différents piézomètres du réseau mis en place permet de qualifier l'état global de la masse d'eau.

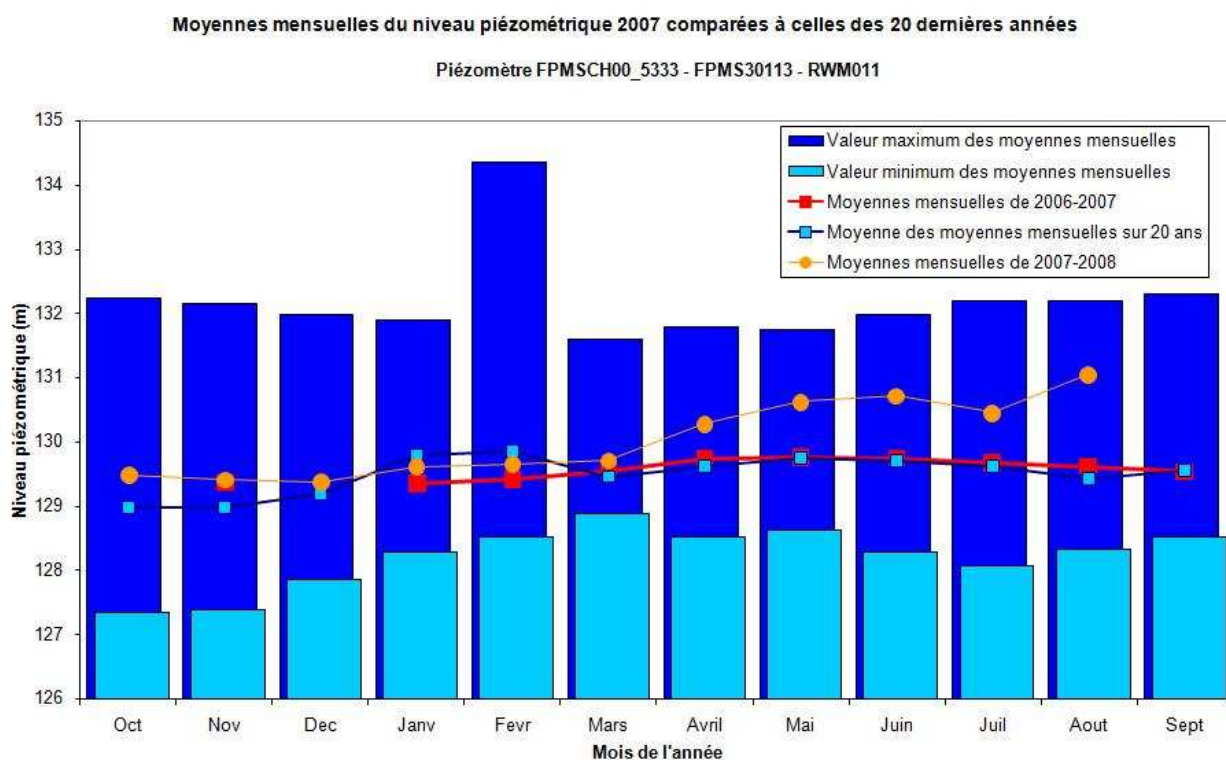
L'analyse se présente sous la forme d'un graphique reprenant cinq informations (voir Figure 1). La première est la valeur maximale des Moyennes Mensuelles calculées sur les 20 dernières années, représentée sous la forme de bâtonnets bleu foncé. La seconde est la valeur minimum des Moyennes Mensuelles calculées sur les 20 dernières années, représentée sous la

---

<sup>15</sup> Références de la publication : [http://www.champagne-ardenne.ecologie.gouv.fr/publications/publications\\_pdf/Plaq\\_TdB\\_Nappe\\_craie5.pdf](http://www.champagne-ardenne.ecologie.gouv.fr/publications/publications_pdf/Plaq_TdB_Nappe_craie5.pdf)

forme de bâtonnets bleu clair. Ces deux bâtonnets définissent un intervalle à l'intérieur duquel les mesures seraient considérées comme « admissibles » car internes aux extrêmes. Vient ensuite une série de référence (points bleus) qui représente la moyenne des Moyennes Mensuelles calculées sur les 20 dernières années.

A cela sont ajoutées les données enregistrées pendant le projet Synclin'EAU, c'est-à-dire les mesures effectuées mensuellement par les équipes de novembre 2006 à août 2008. L'année hydrologique 2006-2007 est représentée en rouge et 2007-2008 est représentée en orange.



**Figure 1 : Moyennes Mensuelles des niveaux piézométriques 2006-2007 & 2007-2008 comparées à celles des 20 dernières années pour un piézomètre de la masse d'eau RWM011.**

L'analyse se poursuit en comparant les données observées aux différents paramètres historiques, permettant ainsi de déterminer un code couleur indicatif :

- Si les mesures de l'année hydrologique observée sont systématiquement supérieures aux maxima des Moyennes Mensuelles calculées sur les 20 dernières années, une couleur VERTE est utilisée.

- Si les mesures de l'année hydrologique observée sont dans la même gamme que les moyennes des Moyennes Mensuelles calculées sur les 20 dernières années, une couleur BLEUE est utilisée.
- Si les mesures de l'année hydrologique observée sont systématiquement inférieures aux moyennes des Moyennes Mensuelles calculées sur les 20 dernières années mais supérieures aux minima des Moyennes Mensuelles calculées sur les 20 dernières années, une couleur ORANGE est utilisée.
- Si les mesures de l'année hydrologique observée sont systématiquement inférieures aux minima des Moyennes Mensuelles calculées sur les 20 dernières années, une couleur ROUGE est utilisée.

Deux niveaux sont particulièrement importants : le premier est celui à partir duquel une baisse significative est observée et à partir de laquelle il est intéressant de suivre en détail l'évolution de la nappe (ORANGE) ; le second est un niveau critique (ROUGE) à partir duquel les niveaux sont les plus bas jamais enregistrés.

Cet indicateur constitue ainsi un premier état des lieux simple et rapide. Il permet, en encodant régulièrement les nouvelles mesures mensuelles, de suivre l'évolution de la tendance de chaque historique piézométrique.

En reportant sur carte les différents indicateurs établis –via le code couleur associé à l'historique piézométrique étudié–, il est alors possible de qualifier l'état et l'évolution piézométrique de la nappe étudiée. En effet, ces indicateurs couleurs peuvent spécifier d'éventuelles zonations : zones à surveiller car une hausse est amorcée (vert), zones à surveiller car une baisse significative s'annonce (orange), zones critiques (rouge), etc.

### 3.1.2 Application de l'indicateur « Moyennes Mensuelles » dans le cadre du projet Synclin'EAU

La méthode a été appliquée à tous les piézomètres ayant d'une part, un historique piézométrique suffisant, et d'autre part, des mesures mensuelles réalisées dans le cadre du Projet Synclin'EAU. Au total, 24 ouvrages ont ainsi pu être analysés par la méthode et 24 indicateurs ont pu être établis. La liste des ouvrages est présentée en annexe, masse d'eau par masse d'eau.

### 3.1.2.1 Application de l'indicateur à la masse d'eau RWM011

Pour la masse d'eau RWM011, neuf ouvrages ont une chronique suffisante et ont fait l'objet de l'analyse par les Moyennes Mensuelles. La carte de la Figure 2 reprend la situation des différents ouvrages ainsi que le résultat graphique de la méthode et l'indicateur associé – via son code couleur (Figure 2).

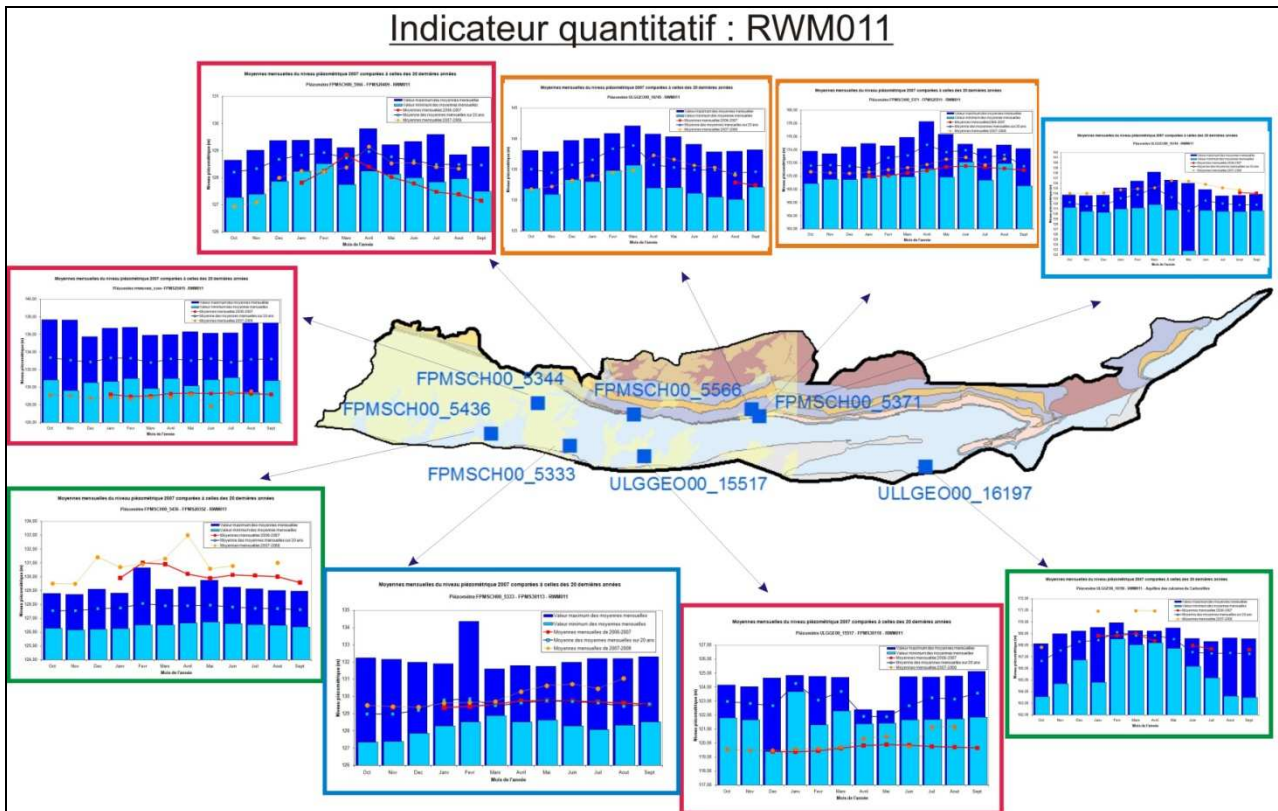
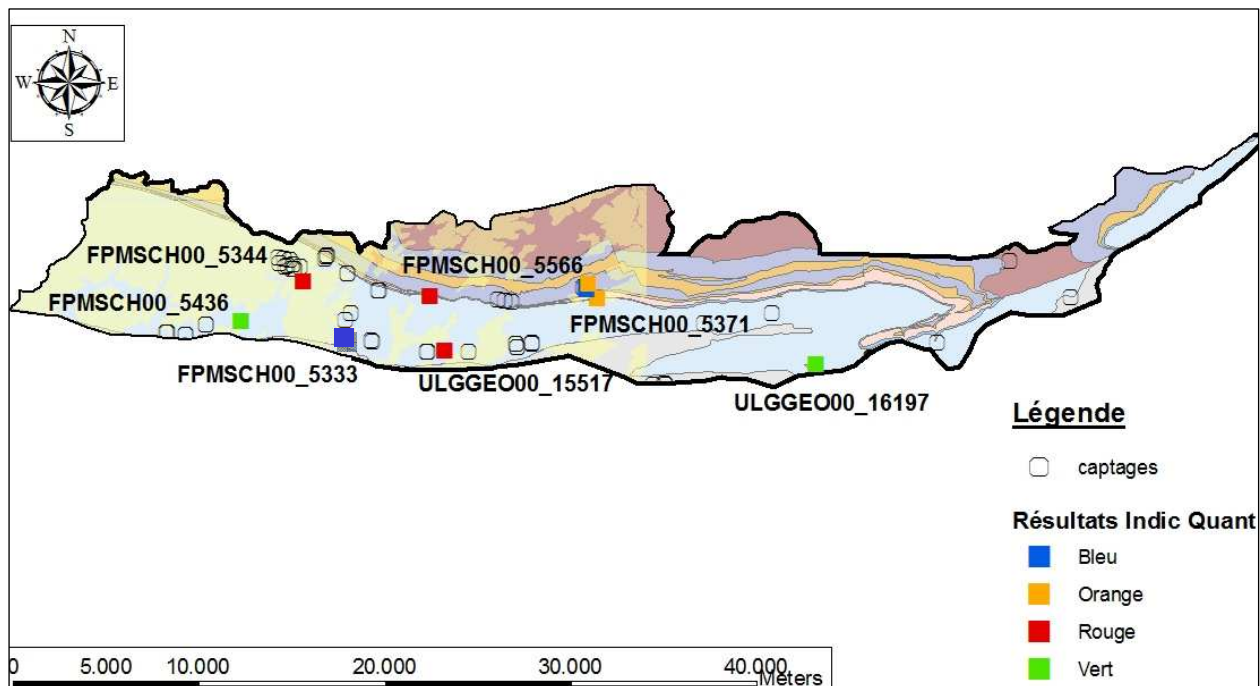


Figure 2 : Application de la méthode «Moyennes Mensuelles» à la masse d'eau RWM011 – Localisation des piézomètres et présentation des résultats graphiques et du code couleur de l'indicateur.





**Figure 3 : RWM011 – Localisation des piézomètres et résultats associés – Localisation de l’ensemble des captages de la masse d’eau.**

Les résultats de l’indicateur sur les neuf ouvrages de la RWM011 montrent trois cas critiques (ROUGE), deux cas où une baisse significative est à surveiller (ORANGE), deux cas « normaux » (BLEU) et deux cas où les niveaux sont supérieurs à la moyenne (VERT).

Les piézomètres à niveaux critiques et à surveiller sont en général localisés à proximité de captages. La Figure 3 reprend d’une part les piézomètres (avec la couleur du résultat de la méthode) et d’autre part, l’ensemble des captages de la masse d’eau (carré contour noir).

L’analyse des résultats obtenus en trois analyses des ouvrages de la masse d’eau RWM011 sont détaillées ci-dessous. Il s’agit des piézomètres :

- *FPMSCH00\_5333*
- *FPMSCH00\_5344*
- *FPMSCH00\_5566*

L’ouvrage *FPMSCH00\_5333* est un piézomètre situé au Sud-Ouest de la masse d’eau. Il est situé dans les calcaires carbonifères et sa profondeur est de plus de 60 mètres.

Moyennes mensuelles du niveau piézométrique 2007 comparées à celles des 20 dernières années

Piézomètre FPMSCH00\_5333 - FPMS30113 - RWM011

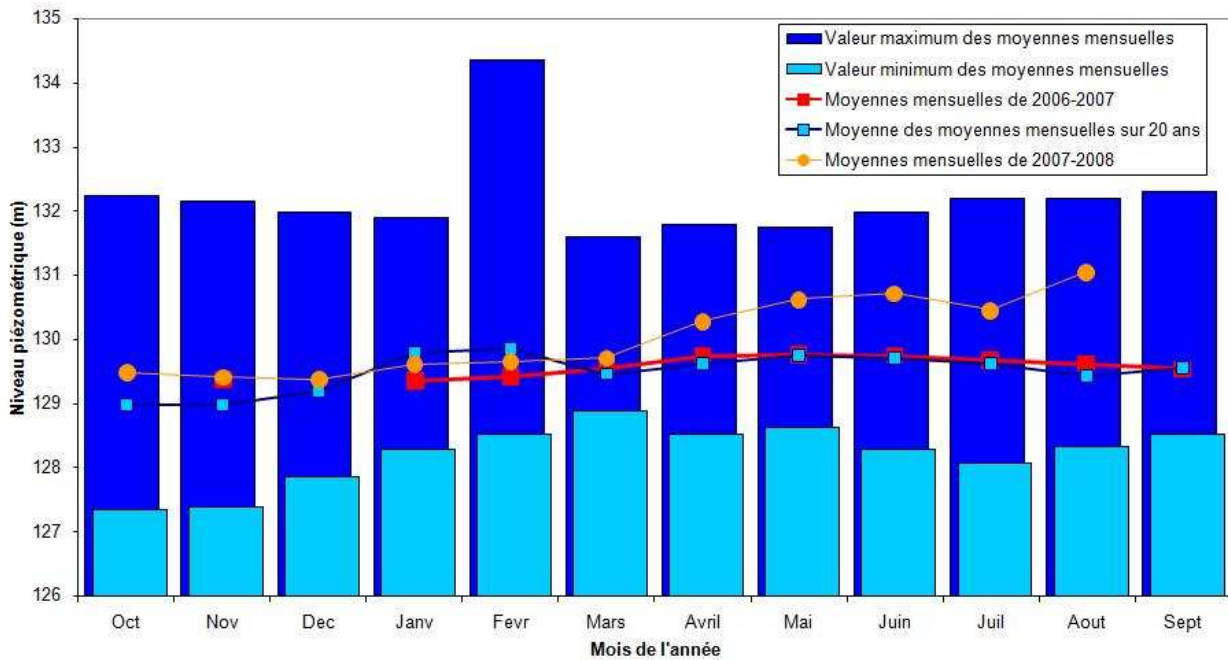
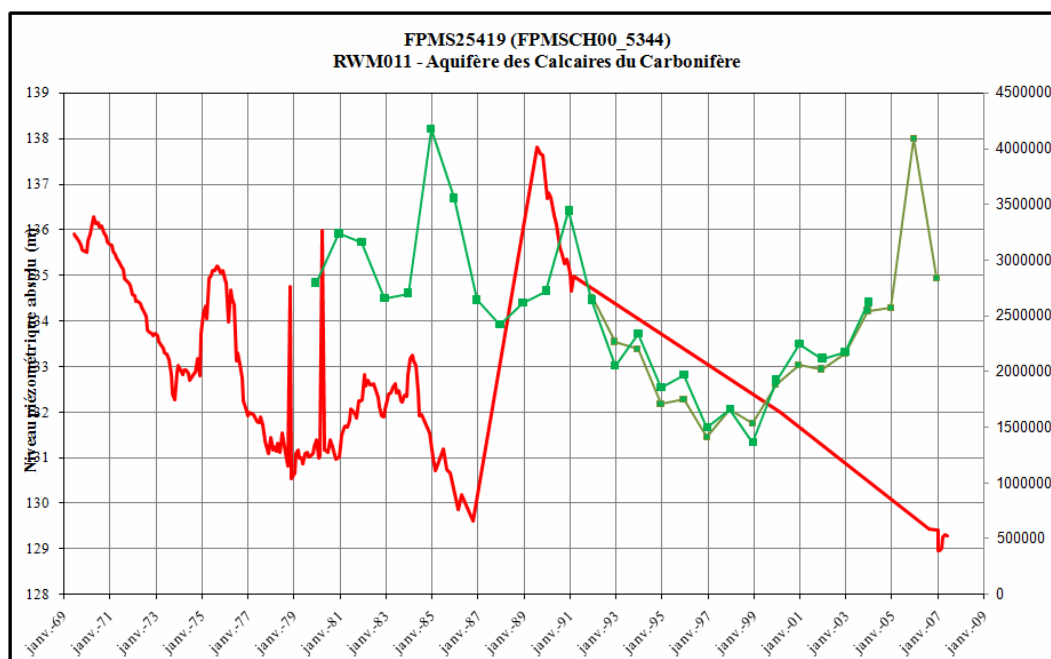


Figure 4 : Indicateur "Moyennes Mensuelles" sur FPMSCH00\_5333 - RWM011 - Calcaires carbonifères.

Les mesures piézométriques de l'année hydrologique 2006-2007 et de l'année hydrologique en cours 2007-2008 sont représentées respectivement en rouge et en orange.

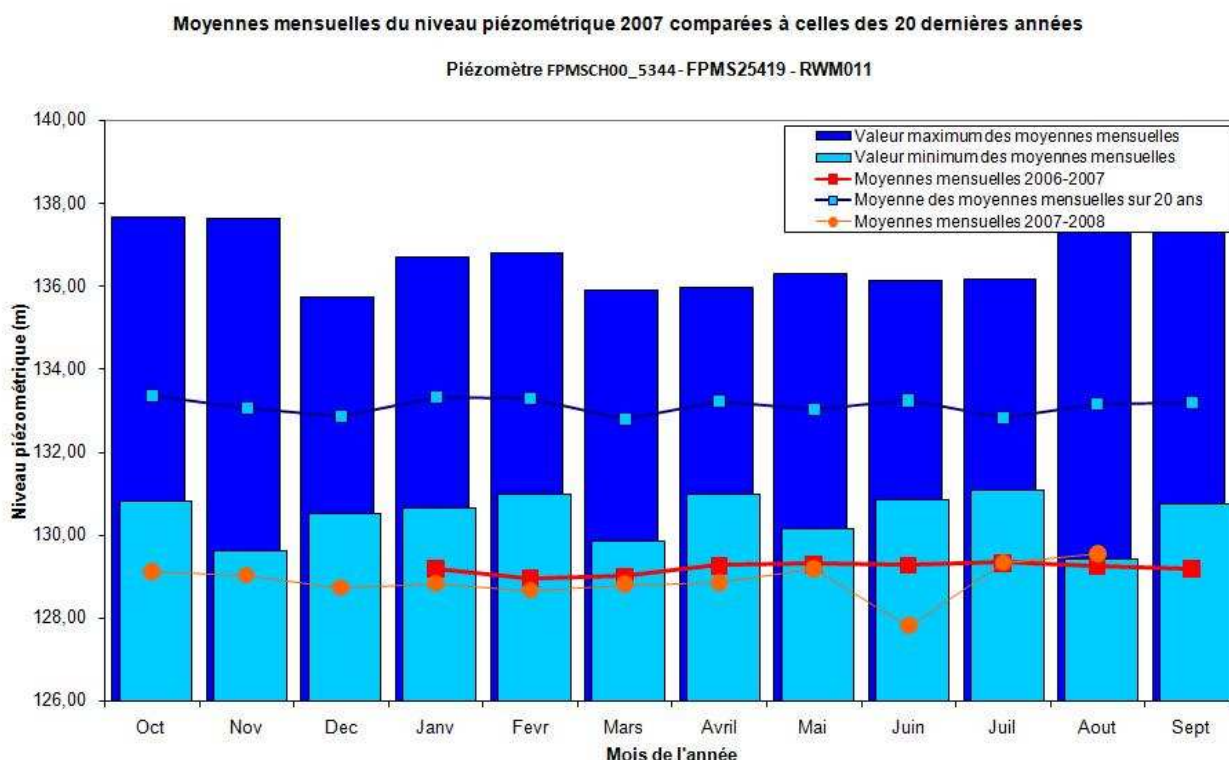
Dans le cas de ce piézomètre, nous pouvons voir que les Moyennes Mensuelles des deux années hydrologiques sont toujours comprises entre les maxima et minima des Moyennes Mensuelles calculées sur les 20 dernières années. Ceci signifie qu'à cet endroit, la nappe apparaît comme dans un état stable.

L'ouvrage *FPMSCH00\_5344* est un piézomètre situé au Nord-Ouest de la masse d'eau. Les captages de Villers-Perwin de la S.W.D.E sont proches (distance de plus ou moins 1000 mètres). La Figure 5 reprend l'historique piézométrique de cet ouvrage (en rouge), ainsi que l'évolution du volume total pompé aux captages de Villers-Perwin (en vert).



**Figure 5 : Evolution du niveau piézométrique de l'ouvrage FPMSCH00\_5344 et du volume capté à Villers-Perwin.**

La Figure 6 reprend les résultats obtenus par la méthode des Moyennes Mensuelles.

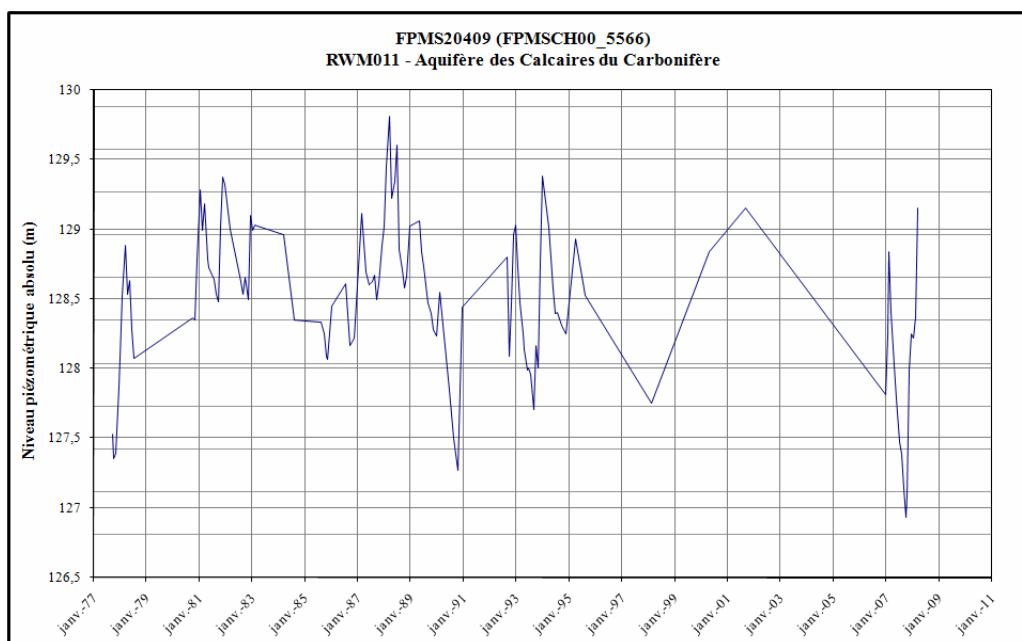


**Figure 6 : Indicateur "Moyennes Mensuelles" pour le piézomètre FPMSCH00\_5344 RWM011 - Calcaires carbonifères.**

On constate que les moyennes mensuelles 2006-2007 et 2007-2008 sont toujours inférieures aux minima des moyennes mensuelles calculées sur les 20 dernières années. Cet état montre une baisse significative de la nappe au cours de ces deux années. Une couleur ROUGE est donnée à l'indicateur.

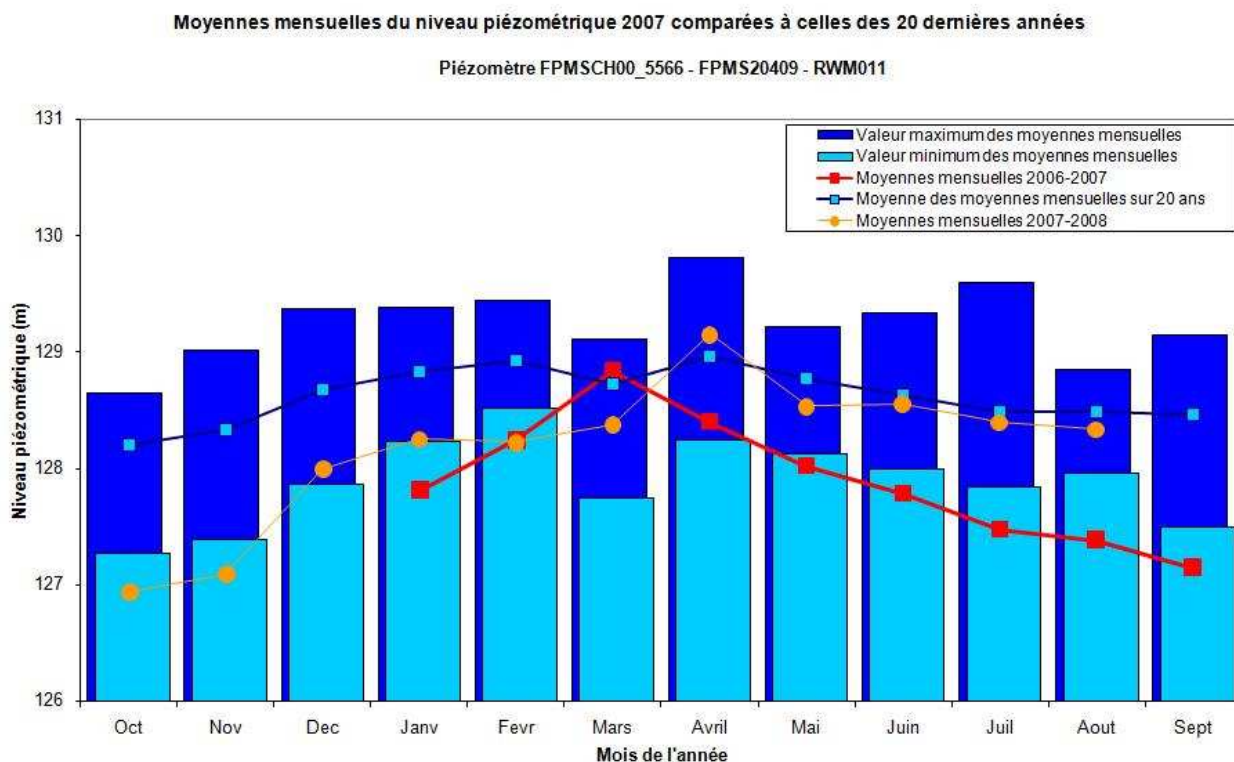
Le champ captant de Villers-Perwin a été développé au début des années 70 (3 puits en 1970 et 6 puits en 1971) pour sécuriser et satisfaire aux besoins en eau du « grand Charleroi ». A cette époque, l'Administration des Mines avait autorisé un prélèvement de 10.000 m<sup>3</sup>/jour pour l'ensemble des ouvrages de production, soit plus de 3.600.000 m<sup>3</sup>/an. Les statistiques de débits depuis 1980 montrent que ces volumes ont été atteints et parfois fortement dépassés (1985) même si la moyenne annuelle depuis 25 ans s'établit aux environs de 2.500.000 m<sup>3</sup>/an. En ce qui concerne les années 70, il est vraisemblable que les débits annuels étaient au moins aussi élevés, mais cela reste à confirmer.

L'ouvrage *FPMSCH00\_5566* est un piézomètre situé au centre de la masse d'eau RWM011. La Figure 7 reprend l'historique piézométrique de cet ouvrage.



**Figure 7 : Historique piézométrique de l'ouvrage FPMSCH00\_5566.**

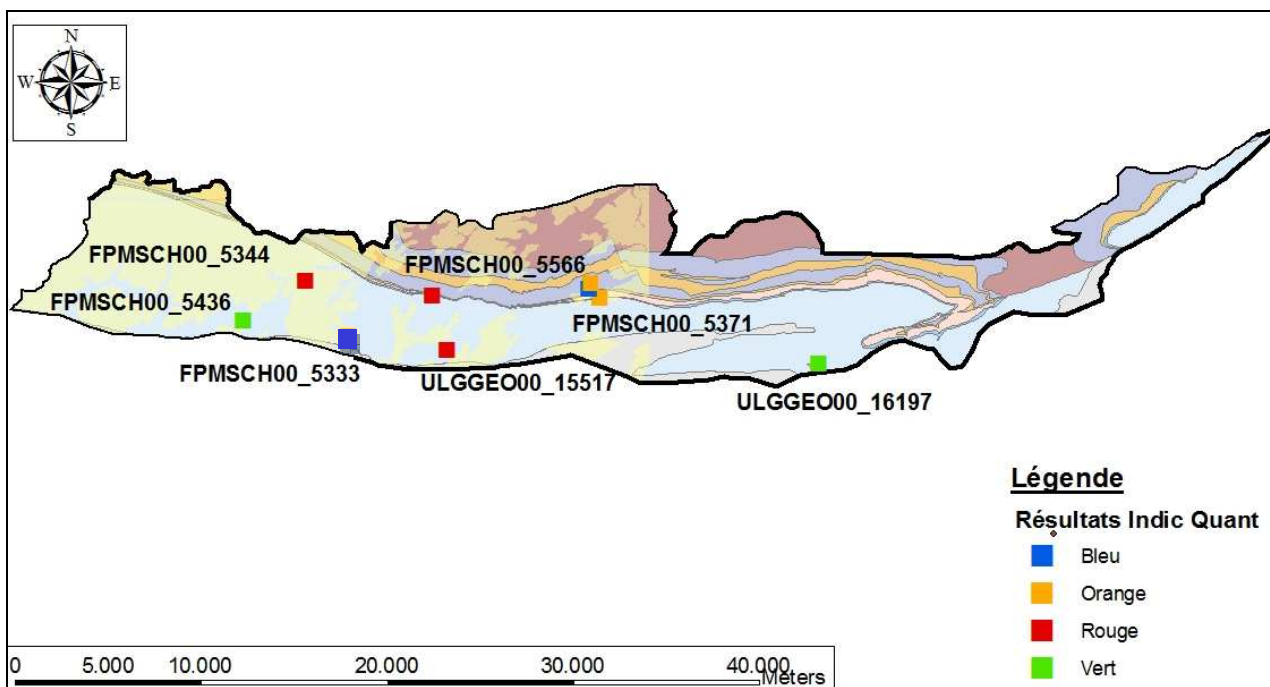
La Figure 8 reprend les résultats de la méthode des Moyennes Mensuelles pour cet ouvrage.



**Figure 8 : Résultats de la méthode des Moyennes Mensuelles pour le piézomètre FPMSCH00\_5566.**

On constate que les mesures de 2006-2007 sont globalement toujours plus basses que le maximum des Moyennes Mensuelles ainsi que la moyenne des Moyennes Mensuelles. De plus, pour les mois de Janvier, Février, Mai, Juin, Juillet, Aout, Octobre, et Novembre, les valeurs sont systématiquement plus basses que le minimum des moyennes mensuelles.

Cet état montre une baisse relative de la nappe au cours de cette année. Une couleur ROUGE est donnée à l'indicateur. En 2008, par contre, la situation semble s'améliorer. Cet indicateur permet de mettre en évidence que l'évolution du niveau de la nappe à cet endroit doit être surveillée de près. Plusieurs pistes peuvent être évoquées pour expliquer cette observation : mise en relation avec la pluviométrie en 2007 et en 2008, étude du volume pompé situé à 3 km de ce piézomètre en 2007 et en 2008. Les prochaines mesures piézométriques aideront également à la compréhension de cet état.



**Figure 9 : Figure synthèse des résultats de la méthode des Moyennes Mensuelles sur la meso RWM011.**

La Figure 9 reprend la synthèse des résultats pour la masse d'eau RWM011. L'indicateur testé révèle une baisse significative du niveau piézométrique durant ces deux dernières années dans un peu plus de la moitié des ouvrages. Cependant, une grande partie de ces ouvrages sont relativement proches de captages, ce qui pourrait biaiser l'indicateur.

Cette méthode devrait donc être appliquée au réseau piézométrique patrimonial où l'influence des captages est moindre. En effet, si cette baisse est également ressentie sur ces ouvrages, cela confirmerait une baisse générale du niveau de la nappe. Ceci pourrait être réalisé après quelques années de suivi du réseau patrimonial mis en place.

Cet indicateur a donc le mérite de pouvoir signaler relativement facilement et rapidement un état défavorable.

### 3.1.2.2 Application de l'indicateur à la masse d'eau RWM021

Pour la masse d'eau RWM021, 13 ouvrages ont une chronique suffisante et ont fait l'objet de l'analyse par les Moyennes Mensuelles. La Figure 10 reprend la situation des différents ouvrages ainsi que le résultat de la méthode.

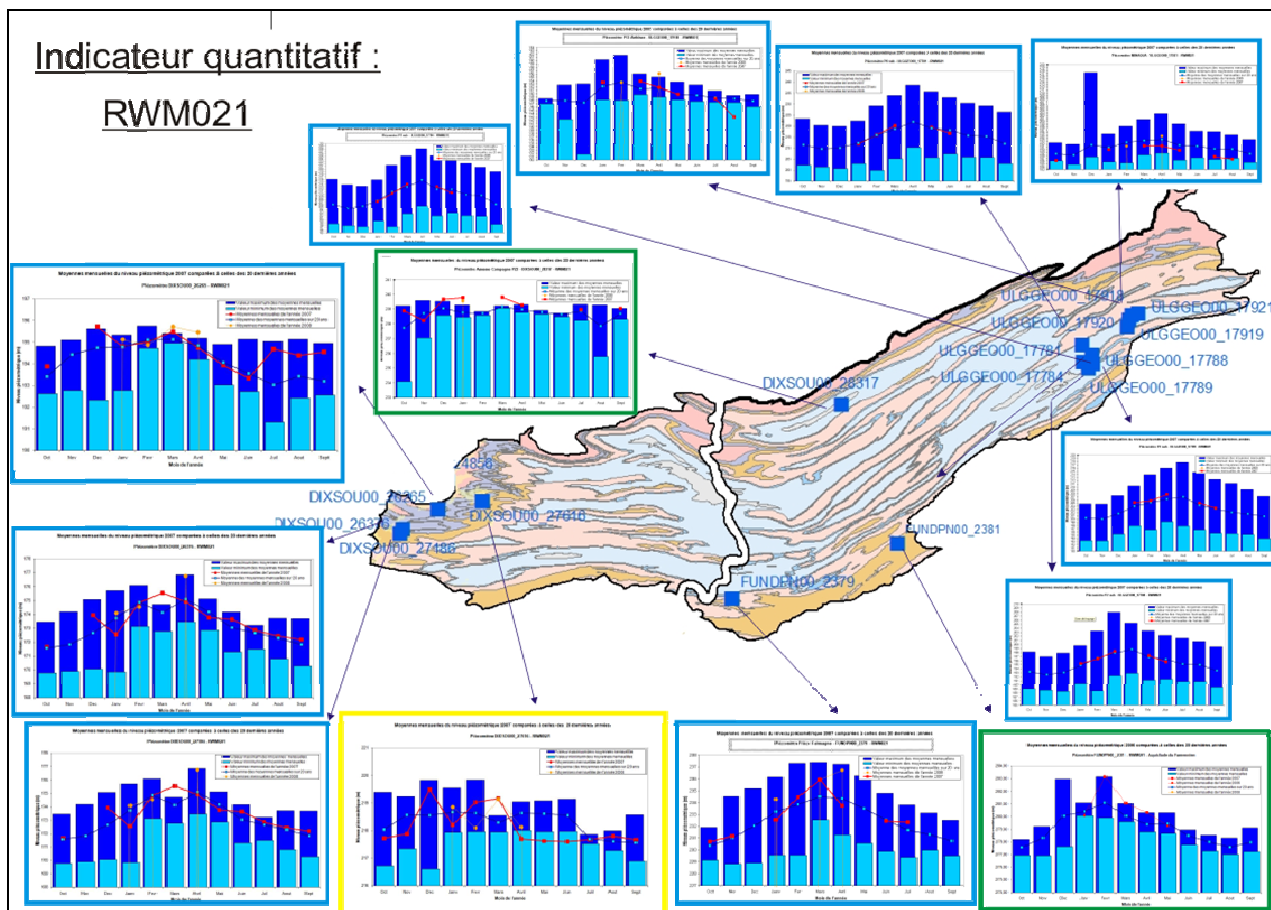
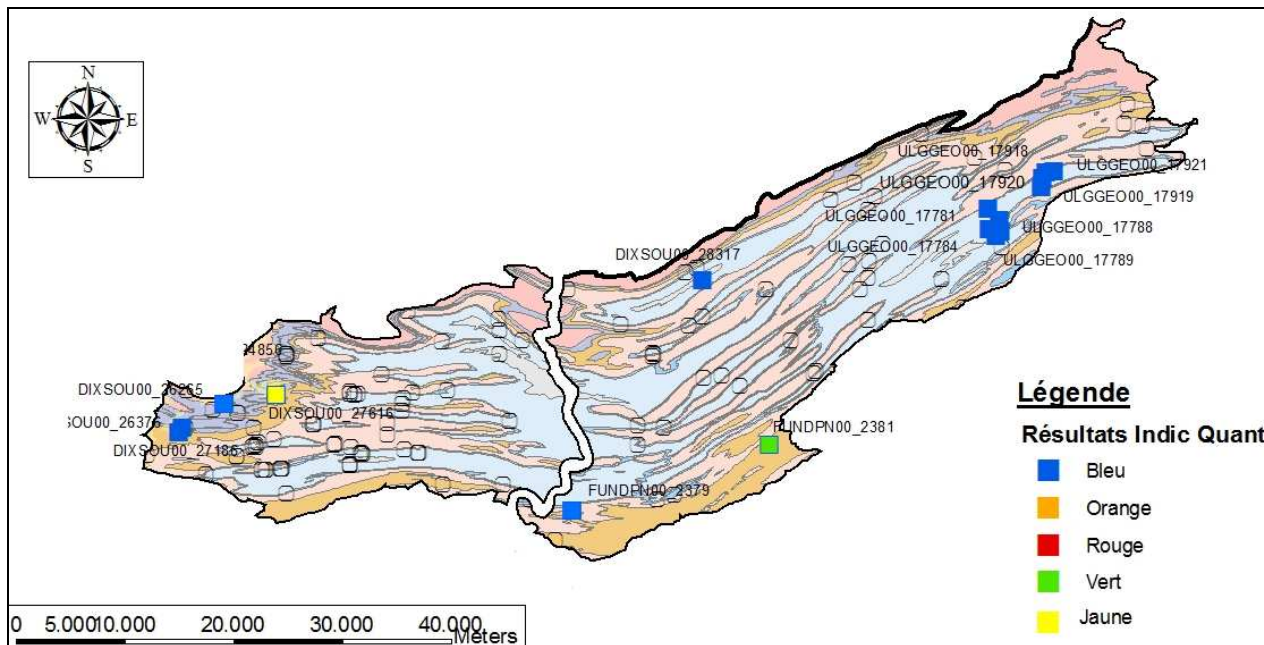


Figure 10 : Application de la méthode «Moyennes Mensuelles» à la masse d'eau RWM021 – Localisation des piézomètres testés et présentation des résultats graphiques et du code couleur de l'indicateur.

Les résultats de l'indicateur sur les 13 ouvrages de la RWM021 montrent 10 cas « normaux » (BLEU), deux cas où les niveaux sont supérieurs aux moyennes (VERT), aucun cas critique (ROUGE) et aucun cas où une baisse serait à surveiller (ORANGE). Un cas non déterminé existe (JAUNE). Avec les données disponibles à l'heure actuelle, aucun seuil d'alerte ou critique n'étant atteint dans cette masse d'eau, il semblerait qu'elle puisse être qualifiée en bon état quantitatif.

Il faut noter toutefois que la majorité des piézomètres sont situés relativement loin des captages importants de cette masse d'eau (Figure 11). De plus, la répartition des piézomètres testés n'est pas uniforme sur la masse d'eau. Une fois de plus, cet indicateur donnera de meilleurs résultats après quelques années de suivi du réseau patrimonial mis en place.

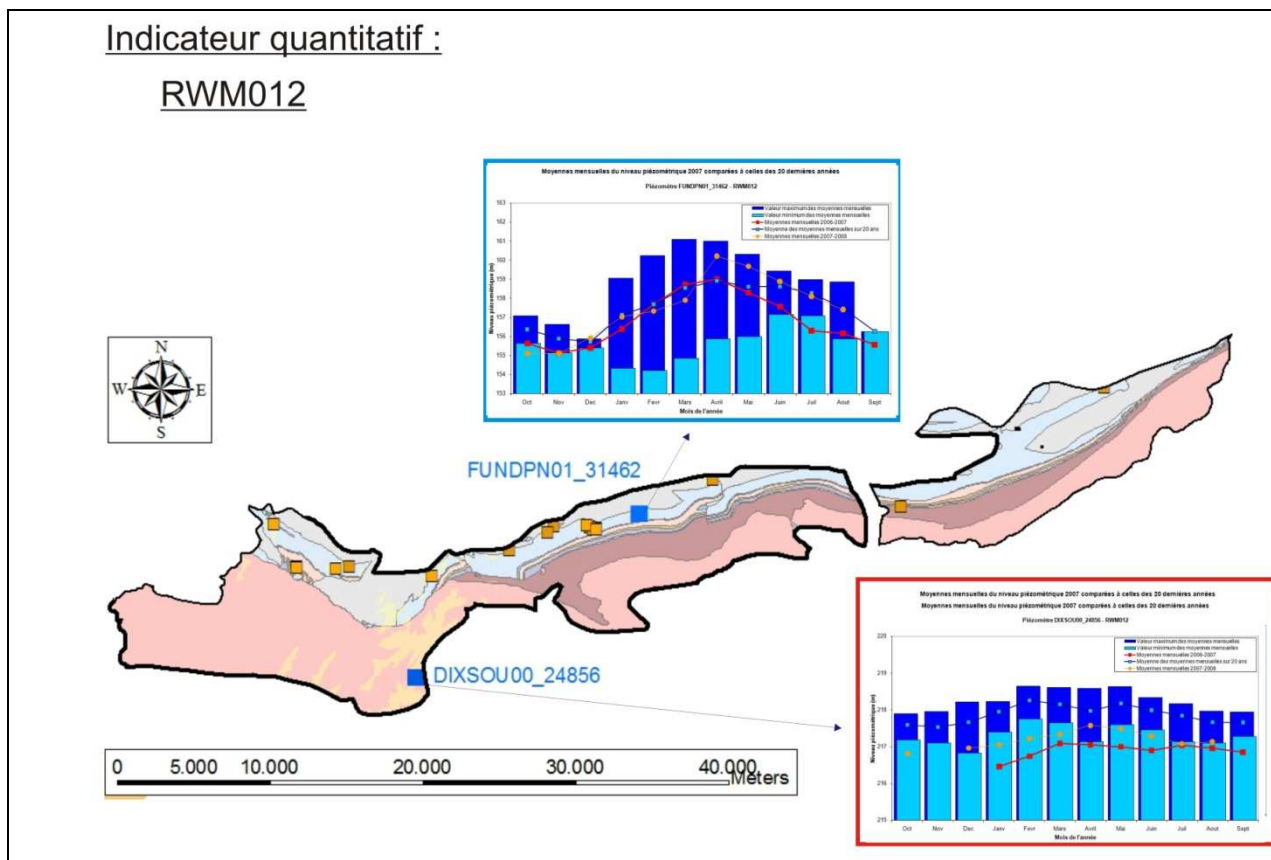


**Figure 11 : RWM021 – Localisation des piézomètres testés et résultats associés**  
**Localisation de l'ensemble des captages de la masse d'eau.**



### 3.1.2.3 Application de l'indicateur à la masse d'eau RWM012

Pour la masse d'eau RWM012, deux ouvrages ont une chronique suffisante et ont fait l'objet de l'analyse par les Moyennes Mensuelles. La Figure 12 reprend la situation des différents ouvrages ainsi que le résultat de la méthode.



**Figure 12 : Application de la méthode «Moyennes Mensuelles» à la masse d'eau RWM012 – Localisation des piézomètres testés et présentation des résultats graphiques et du code couleur de l'indicateur.**

Les résultats de l'indicateur sur les deux ouvrages de la RWM012 montrent un piézomètre « normal » (BLEU), et un cas critique (ROUGE). Avec les données disponibles à l'heure actuelle, aucune conclusion ne peut être tirée sur cette masse d'eau. L'indicateur donnera de meilleurs résultats après quelques années de suivi du réseau patrimonial mis en place.

## 3.2 Etablissement d'indicateurs quantitatifs par l'approche des débits de bases

Dans cette méthode, l'évolution annuelle et interannuelle des réserves en eaux souterraines d'un bassin versant est estimée à partir du débit de base, c'est-à-dire la contribution des eaux souterraines au débit total mesuré d'un cours d'eau. Plusieurs approches sont développées, d'une part en corrélant le débit de base avec la piézométrie, d'autre part en établissant des seuils d'alertes grâce au calcul des périodes de retours (« indicateur VCN3 »). Dans le but de développer l'indicateur quantitatif le plus fiable possible, quelques techniques d'estimation de débit de base sont présentées et comparées. Elles sont ensuite testées sur plusieurs cours d'eau de la zone Synclin'EAU.

### 3.2.1 *Description de l'indicateur*

#### 3.2.1.1 Rappels théoriques

L'hydrogramme représente la variation temporelle du débit total au niveau d'une section d'un cours d'eau. Il représente la somme de différentes sources d'eau contribuant au débit de la rivière. Ces composantes peuvent être subdivisées en deux types :

- Les écoulements rapides correspondant à la réponse directe aux précipitations. Ils comprennent le ruissellement de surface, le ruissellement hypodermique (i.e. portion des précipitations infiltrées venant des zones non-saturées) et, dans une moindre mesure, les précipitations alimentant directement le cours d'eau à sa surface.
- Les écoulements de base correspondant à la partie du débit du cours d'eau provenant essentiellement des nappes d'eau souterraine, mais aussi de la vidange des lacs et de la fonte des glaciers, durant des périodes suffisamment longues où il ne se produit ni précipitation, ni fonte des neiges (Glossaire International d'Hydrologie<sup>16</sup>).

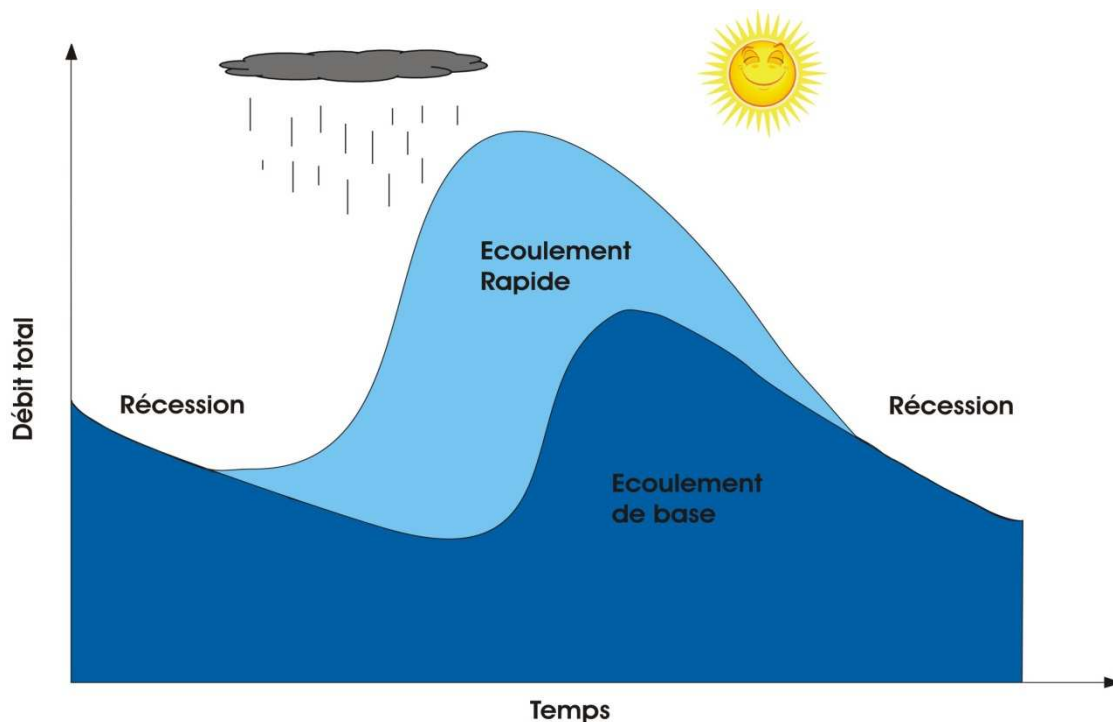
Bien évidemment, les contributions relatives de ces écoulements varient au cours de l'année hydrologique, en particulier pendant les périodes de crues. Si l'on prend l'exemple d'un cours d'eau drainant, les différentes composantes d'écoulement peuvent théoriquement varier de la manière suivante (Brodie et Hostetler<sup>17</sup>) (Figure 13) :

---

<sup>16</sup> <http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/>

<sup>17</sup> [http://www.connectedwater.gov.au/documents/IAH05\\_Baseflow.pdf](http://www.connectedwater.gov.au/documents/IAH05_Baseflow.pdf)

- Après une longue période de sécheresse, on considère qu'un cours d'eau drainant est entièrement alimenté par l'écoulement de base.
- Pendant la période de pluie, ce sont essentiellement les écoulements rapides qui font augmenter le débit de la rivière. La montée rapide du niveau limnimétrique du cours d'eau peut même temporairement inverser le gradient hydraulique, la rivière devenant ainsi perdante, ce qui se marque sur l'hydrogramme par une baisse du débit de base au début de la crue.
- Lorsque le pic de crue est passé, la diminution du niveau limnimétrique ainsi que l'élévation tardive des niveaux piézométriques des nappes souterraines (car il faut prendre en compte le temps d'infiltration de l'eau de pluie) ont pour effet d'augmenter le gradient hydraulique vers la rivière. A partir de ce moment, le débit de base augmente.
- Enfin, si la période de récession est assez longue, la composante d'écoulement rapide devient négligeable et le cours d'eau peut être à nouveau considéré comme entièrement alimenté par les écoulements de base.



**Figure 13. Schéma indicatif des variations relatives des contributions des composantes du débit total lors d'une crue.**

Dans l'exemple de la Figure 13, simplifié et idéalisé, on suppose que la rivière est drainante (i.e. la côte piézométrique de la nappe doit être plus élevée que le niveau de la rivière) mais également que la nappe aquifère est la principale contributrice au débit de base. Cependant,

l'écoulement de base peut également provenir des lacs, de la fonte des glaciers ou du stockage temporaire dans les berges de la rivière.

Enfin, il faut également s'assurer du caractère « naturel » du cours d'eau étudié. En effet, le développement et l'utilisation des ressources en eau du bassin versant doivent être pris en considération. Les activités humaines présentées ci-dessous peuvent significativement modifier le débit de base naturel du cours d'eau :

- les pompages dans les nappes aquifères peuvent avoir pour effet de diminuer ou même inverser le gradient hydraulique entre la nappe et la rivière ;
- les systèmes de régulation du cours d'eau, les barrages et les écluses ;
- le pompage direct dans le cours d'eau ainsi que le relarguage de gros volumes (stations d'épurations, industries) ;
- les déviations artificielles des cours d'eau (chenaux) vers d'autres bassins versants ;
- le drainage artificiel de plaines alluviales et les changements dans l'utilisation de sols (reforestations,...) peuvent modifier le système de drainage du bassin versant ;
- le renforcement des berges et du lit de la rivière peut également modifier les conditions de transmission à l'interface rivière/aquifère.

Ainsi, avant de pouvoir supposer que l'écoulement de base soit entièrement alimenté par les eaux souterraines, il convient de vérifier les points cités ci-dessus.

### *3.2.1.2 Présentation des techniques de séparation d'hydrogrammes*

Les procédures d'extraction des débits de base à partir d'hydrogrammes sont aussi nombreuses que variées et reposent, pour la plupart, sur des méthodologies relativement empiriques. Il est donc important de noter qu'aucune des ces techniques ne représente le débit de base réel. En période de hautes eaux, l'estimation du débit de base d'un cours d'eau est un exercice difficile car fortement influencé par le ruissellement de surface. Les techniques présentées ci-dessous permettent juste de trouver une approximation plus ou moins réaliste du débit de base, tout en restant simple d'utilisation, applicable sur de longues chroniques de débits et sur tous types de bassins versants.

Pour le projet nous avons choisi de tester quatre techniques de séparation que nous pouvons subdiviser en deux groupes (Brodie et Hostetler<sup>18</sup>) : les méthodes basées sur les

---

<sup>18</sup> [http://www.connectedwater.gov.au/documents/IAH05\\_Baseflow.pdf](http://www.connectedwater.gov.au/documents/IAH05_Baseflow.pdf)

traitements de données (VCN3, minima lissés et filtres récursifs digitaux) et les méthodes de séparations graphiques (PART).

### 1. La méthode **VCN3**

Le VCN3 est une technique de traitement de données hydrologiques couramment utilisée par les DIREN (Directions Régionales de l'Environnement) françaises dans les bulletins de situations hydrologiques des différentes régions de France. Il est défini comme le débit moyen minimum sur 3 jours consécutifs observé au cours d'une période donnée, généralement un mois calendaire. Le minimum mensuel ainsi obtenu est alors considéré comme représentatif du débit de base. Contrairement aux autres méthodes, aucune extrapolation n'est faite entre les points minima mensuels, ce qui signifie que le débit de base n'est représenté que par une seule valeur par mois.

### 2. La méthode des **minima lissés (ML)**

Cette seconde méthode a été développée par l'institut d'hydrologie (1980) du Royaume-Uni. Comme pour la méthode VCN3, la procédure de séparation repose sur une base empirique. Un programme, BFI, peut être téléchargé à l'adresse suivante :

[http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics\\_lab/twahl/bfi/bfidownload.html](http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics_lab/twahl/bfi/bfidownload.html).

Le programme calcule le minimum sur une période de 5 jours consécutifs (sans recouvrement) pour toute la série de données et recherche ensuite des points d'inflexion dans la séquence des minima selon le critère suivant :

Pour trois minima adjacents ( $Q_{i-1}$ ,  $Q_i$ ,  $Q_{i+1}$ ),  $Q_i$  est un point d'inflexion si :

$$0.9 Q_i < Q_{i-1} \text{ et } 0.9 Q_i < Q_{i+1}$$

$Q_i$  est alors considéré comme égal au débit de base pour le jour  $i$ .

Ces points d'inflexions sont alors connectés entre eux et interpolés pour chaque jour de la série de données. Cette dernière étape est effectuée de manière à ce que la courbe des débits de base ne dépasse évidemment jamais l'hydrogramme des débits totaux.

### 3. La méthode des **filtres récursifs digitaux (FRD)**

Cette méthode part du principe qu'un hydrogramme peut être analysé comme un spectre de fréquence : les basses fréquences sont plutôt associées aux débits de base tandis que les fréquences plus élevées seront principalement attribuées au ruissellement de surface. Le débit de

base est alors extrait de l'hydrogramme par un filtre digital à basse fréquence (« lowpass filter »). L'algorithme de filtre utilisé ici est celui d'Eckhardt (2005) :

$$b_k = \frac{(1 - BFI_{\max})ab_{k-1} + (1 - a)BFI_{\max}y_k}{1 - aBFI_{\max}}$$

où

$b_k$  est le débit de base au moment  $k$

$a$  est le coefficient de tarissement

$y_k$  est le débit total au moment  $k$

BFI (baseflow index) est le rapport entre le débit de base et le débit total

$BFI_{\max}$  est le BFI maximal calculé par l'algorithme

L'algorithme comprend deux paramètres à introduire. Le premier est le coefficient de tarissement qui peut-être aisément calculé par l'analyse des récessions. Au contraire,  $BFI_{\max}$  n'est pas mesurable et doit être estimé en fonction des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques des bassins versants. Eckhardt (2005) propose une valeur de 0.8 pour les cours d'eau pérennes avec aquifères poreux.

#### 4. La méthode **PART**

Il s'agit d'une méthode développée par l'USGS (US Geological Survey). Le programme associé peut être téléchargé à l'adresse suivante <http://water.usgs.gov/ogw/part/>. Le fonctionnement du programme se résume en deux étapes :

- la première consiste à repérer les périodes où la composante de ruissellement de surface peut être considérée comme négligeable par rapport au débit de base. Pour se faire, le programme PART se base sur le temps de récession antécédent, i.e. le nombre de jours nécessaires pour qu'un cours d'eau retourne à son niveau de base après une crue. Ce temps est estimé par la relation empirique suivante (Linsley et al., 1981) :

$$N = 2,59 A^{0.2}$$

où

$N$  est le nombre de jour après un pic de débit

$A$  est la surface du bassin versant ( $m^2$ )

Le programme parcourt la série de données (dates et débits journaliers) et cherche les jours répondants aux conditions posées par la relation empirique permettant d'estimer le temps de retour au niveau de base. Les débits associés aux dates sélectionnées sont alors considérés comme représentatifs du débit de base, sous condition que le déclin du débit journalier suivant ne dépasse pas 0,1 fois l'unité logarithmique.

- la seconde étape consiste à interpoler linéairement le débit de base pour les jours restants.

### 3.2.2 Application de l'indicateur dans le cadre du projet Synclin'EAU

#### 3.2.2.1 Présentation des bassins tests

Cinq cours d'eau ont été sélectionnés dans 4 masses d'eau différentes : la Mollignée à Warnant (021), le Burnot à Rivière (021), la Hantes à Wihéries (022), la Brouffe à Mariembourg (023) et le Hoyoux à Modave (021)<sup>19</sup>. Ce dernier fait figure d'« outlyer » du fait des nombreux captages opérants dans le bassin versant, ayant certainement pour effet de modifier le débit de base de la rivière. Comme il s'agit principalement de galeries drainantes (Vivaqua), nous supposons que le débit capté représente une fraction constante du débit de base naturel du cours d'eau. Le débit de base du Hoyoux est alors, malgré tout, considéré comme représentatif de l'état de remplissage des aquifères du bassin, condition suffisante pour appliquer les techniques de séparation d'hydrogramme présentées ci-dessus.

Contrairement au Hoyoux, les autres cours d'eaux sélectionnés ont été relativement bien préservés des activités humaines : aucun captage n'opère d'échange important de ou vers les bassins versants, de même qu'aucune structure importante artificielle (barrages, écluses...) n'influence le débit des cours d'eau. Ainsi, pour les cours d'eau considérés, nous pouvons supposer que l'écoulement de base est essentiellement alimenté par les nappes aquifères.

Comme nous le verrons plus loin, l'utilisation de ces bassins tests a pour but de discriminer, dans un premier temps, les méthodes de séparation d'hydrogrammes décrites ci-dessus, ainsi que de fournir au lecteur d'autres outils pratiques pour estimer le débit de base d'un cours d'eau.

---

<sup>19</sup> Pour de plus amples informations sur ces bassins versants, nous invitons le lecteur à se référer aux rapports de caractérisation des masses d'eaux concernées.

### 3.2.2.2 Caractéristiques géologiques

Pour les raisons évoquées plus haut, la sélection de ces bassins tests se justifie par le contraste très important qui les caractérise en terme de représentation à l’affleurement des différentes unités hydrogéologiques. Comme le montrent les Figure 14 et Figure 18, les bassins de la Mollignée et du Hoyoux présentent une nette dominance en horizons aquifères (respectivement 79% et 85%, calcaires carbonifères et grès du Famennien réunis), l’aquiclude du Famennien-Frasnien n’affleurant que sur 9% de la surface. A l’opposé, le bassin de la Brouffe est caractérisé par une bonne représentation de l’aquiclude du Famennien-Frasnien (71%), tandis que l’aquifère des calcaires Dévonien n’affleure que de manière très limitée (2% de la surface). En terme de représentativité en couches aquifères, les bassins de la Hantes et du Burnot peuvent être considérés comme intermédiaires entre ces deux extrêmes, les aquifères calcaires couvrant respectivement 26% et 45% de la superficie des bassins versants.

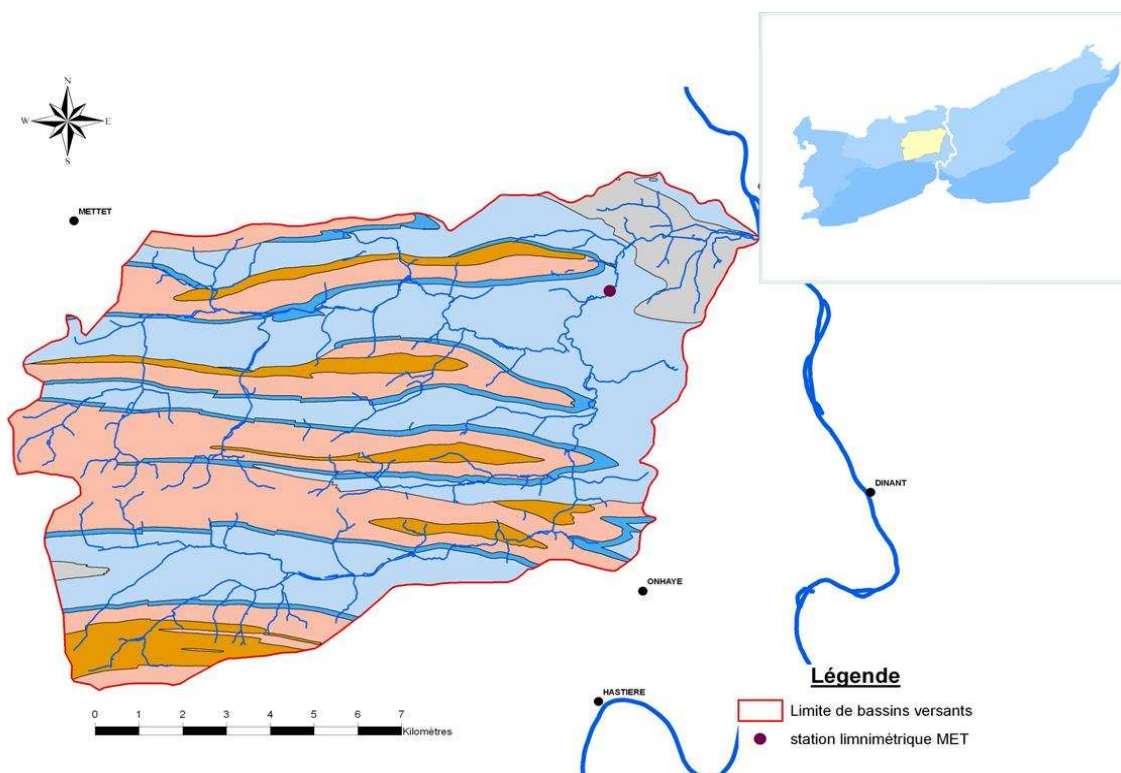


Figure 14 : Bassin de la Mollignée (cf annexe pour consulter la légende des unités hydrogéologiques utilisées).



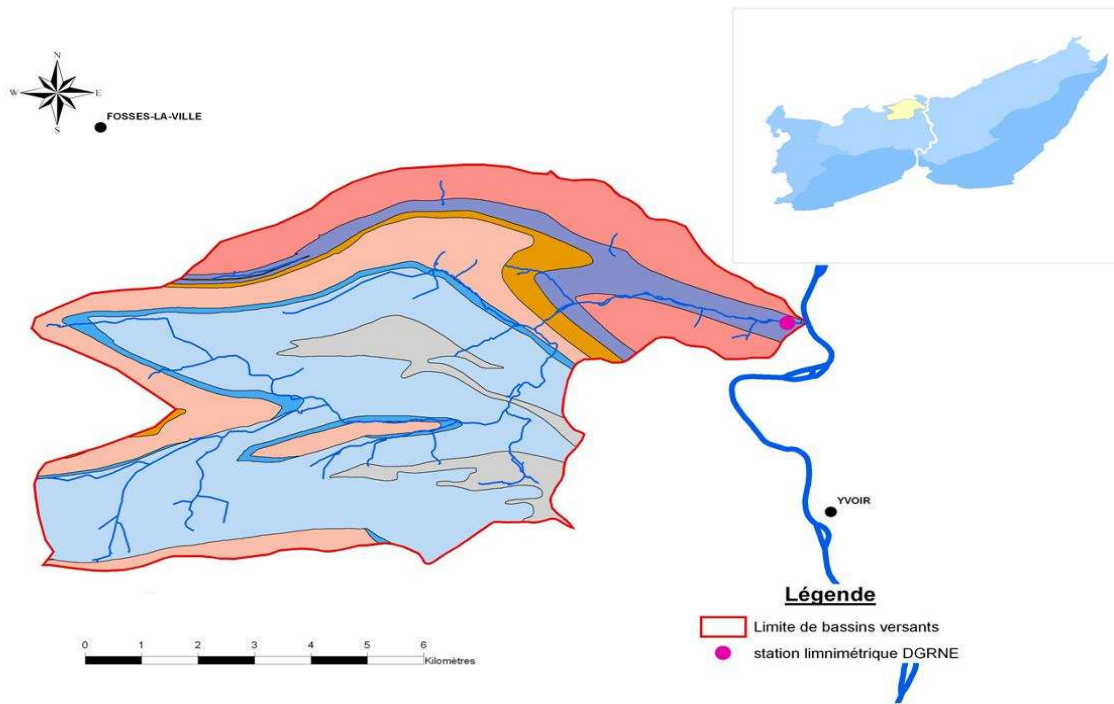


Figure 15 : Bassin du Burnot (cf annexe pour consulter la légende des unités hydrogéologiques utilisées).

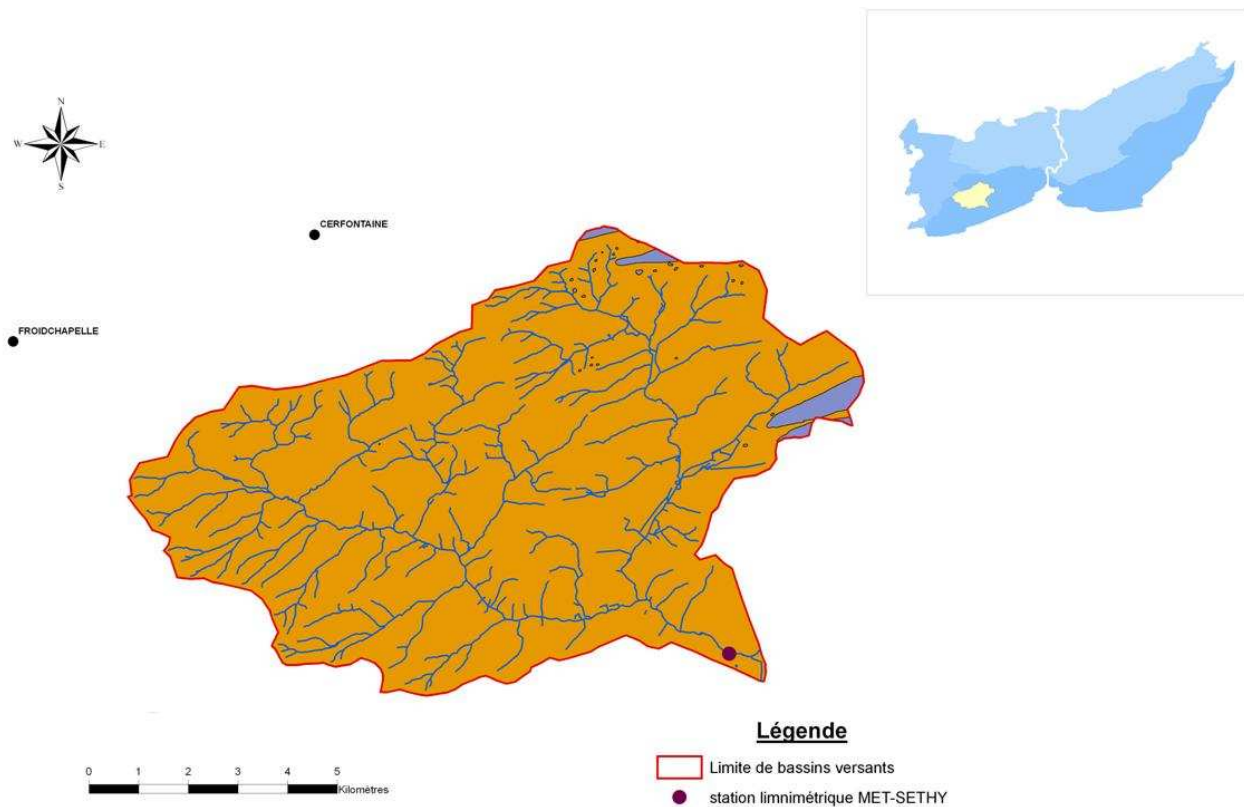


Figure 16. Bassin de la Brouffe (cf annexe pour consulter la légende des unités hydrogéologiques utilisées).

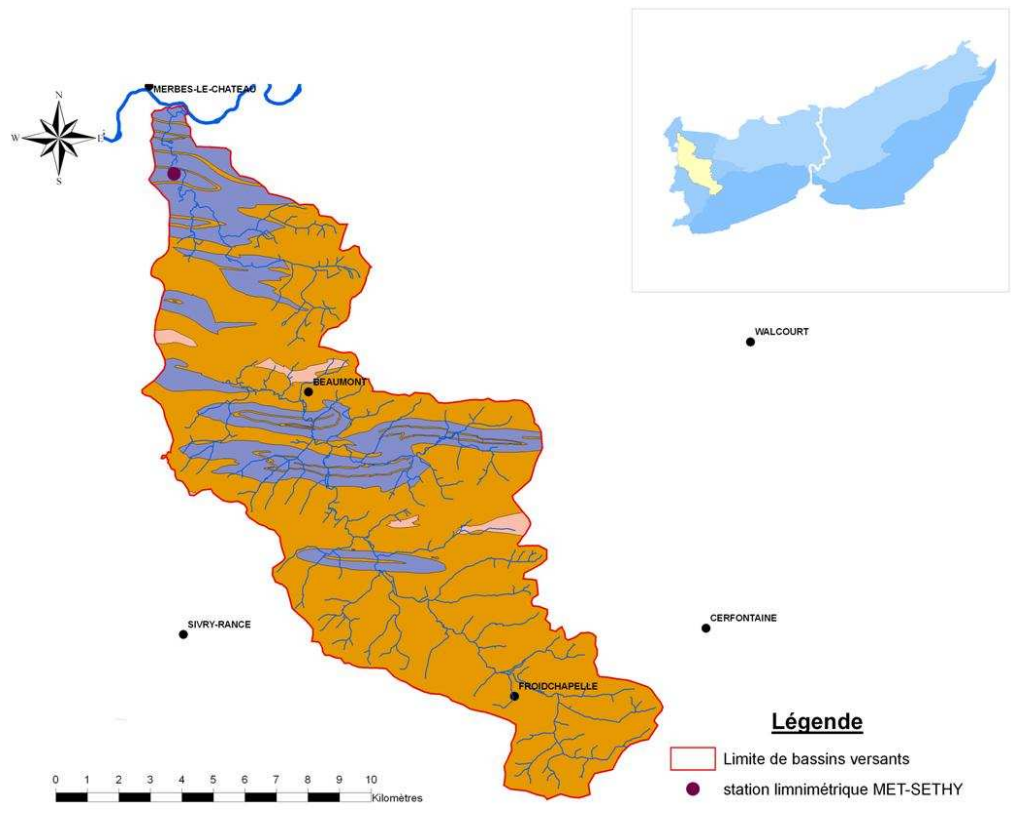


Figure 17. Bassin de la Hantes (cf annexe pour consulter la légende des unités hydrogéologiques utilisées).

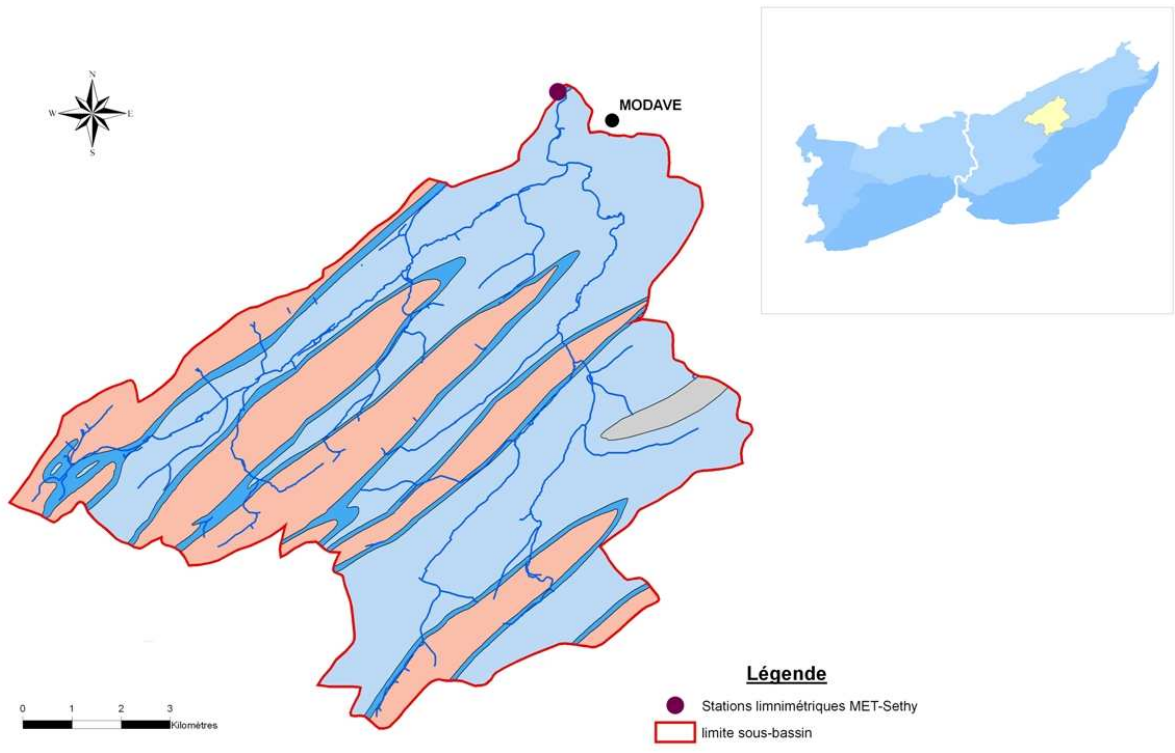


Figure 18. Sous-bassin du Hoyoux (cf annexe pour consulter la légende des unités hydrogéologiques).

### 3.2.2.3 Caractéristiques hydrologiques

Les caractéristiques géologiques de chaque bassin versant sont bien évidemment reflétées dans l'hydrologie des cours d'eau correspondant. La construction des courbes de durée spécifique de débit (FDC, « flow duration curve ») a été effectuée pour chacun des cinq bassins (**Figure 19**). Le débit est représenté en fonction de la probabilité P (%) qu'un débit donné soit égalé ou dépassé. Pour construire les courbes de durée, les débits journaliers sont classés par ordre de grandeur, en assignant pour chaque débit un rang m, allant de 1 (pour le débit le plus élevé) à n (pour le débit le plus faible). Le paramètre P est alors calculé comme suit (Fetter, 1994) :

$$P = 100 \frac{m}{n + 1}$$

Cette approche permet notamment de calculer un certain nombre de paramètres intéressants (Brodie, 2008) présentés dans le Tableau 2.

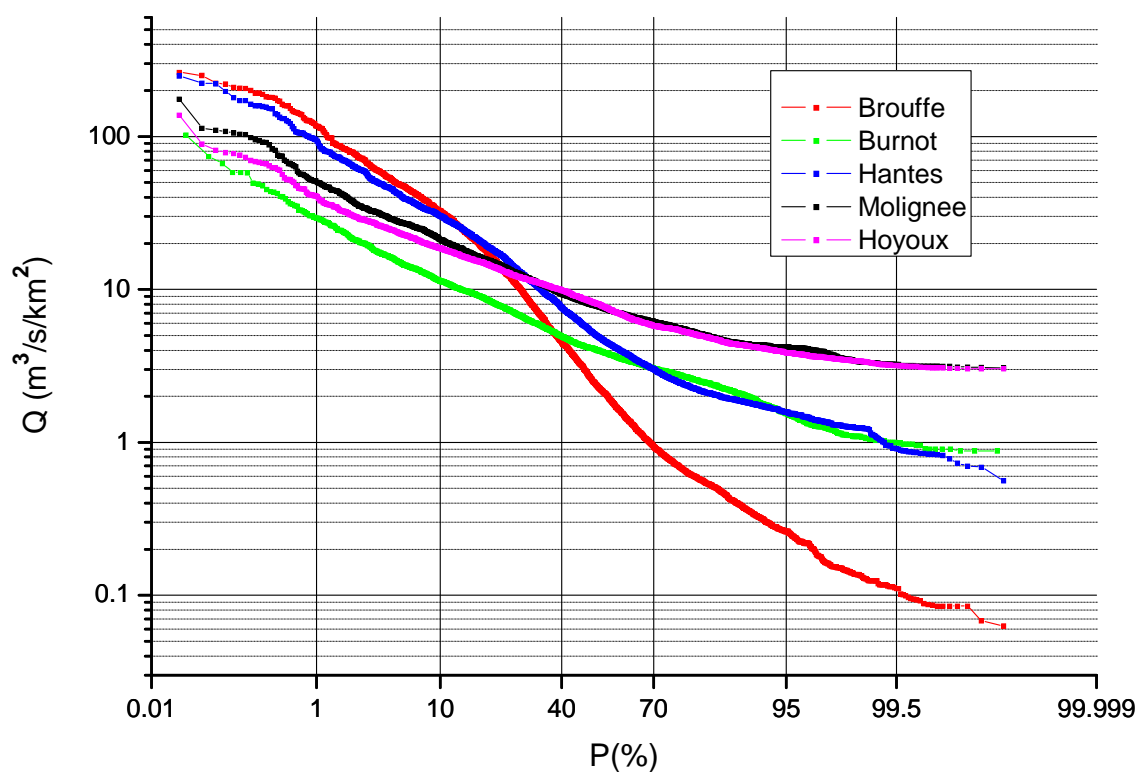


Figure 19. Courbes de durée spécifique de débit pour chaque cours d'eau. P(%) est la probabilité qu'un débit donné soit égalé ou dépassé. Les débits sont normalisés par rapport à la superficie du bassin versant (=débits spécifiques) afin de pouvoir comparer les différents cours d'eau.

paramètre	Molignée	Hantes	Burnot	Hoyoux	Brouffe
superficie (km2)	125,00	139,00	67,80	94,00	82,00
Q moyen (m3/s)	1,41	1,71	0,40	0,98	0,94
Qmoy/Qméd	1,42	2,32	1,45	1,26	4,41
Q90/Q50	0,56	0,35	0,50	0,52	0,14
CA	-0,31	-0,61	-0,30	-0,25	-0,93
% Q=0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tableau 2. Caractérisation des courbes de durée spécifique de débit présentées dans la Figure 18.

où :

- $Q_{moy}/Q_{50}$  est le rapport entre la valeur de débit moyen et la médiane (=  $Q_{50}$ ) de la série de données. Une valeur élevée indique une fluctuation élevée des débits ;
- $Q_{90}/Q_{50}$  est le rapport entre la valeur de débit dépassée dans 90% des cas et la valeur médiane. Le rapport est faible si le cours d'eau est perdant ou dans une zone de faible conductivité hydraulique (et caractérisé, par conséquent, par un débit de base plus faible) ;

- CA est la pente de la courbe de distribution calculée entre  $Q_{20}$  et  $Q_{80}$ . Les cours d'eau soutenus par un débit de base élevé ont une faible pente ;
- $\%Q=0$  est le pourcentage du temps où le débit mesuré est égale à 0. Les cours d'eaux perdants possèdent un pourcentage relativement élevé.

Comme pouvait l'indiquer la géologie, la Molinee et le Hoyoux d'une part et la Brouffe d'autre part se démarquent très clairement du point de vue des paramètres hydrologiques. En effet, la Molinee et le Hoyoux sont caractérisés par des régimes d'étiage soutenus, conséquence d'une alimentation importante par les calcaires carbonifères. Au contraire, la Brouffe, qui s'écoule principalement dans des terrains à faible conductivité hydraulique, n'est quasiment pas alimentée par des eaux souterraines. Il en résulte une courbe sigmoïdale, présentant une pente plus raide que celle de la Molinee et des valeurs extrêmes plus élevées (Figure 18).

Les deux cours d'eaux restant (Hanches et Burnot) affichent des tendances intermédiaires, mais des différences se reflètent bien dans les contrastes lithologiques des deux bassins : la Hantes affiche le profil d'une rivière clairement drainante, capricieuse ( $Q_{moy}/Q_{50}$  relativement élevé), mais avec un débit de base plus élevé que celle de la Brouffe. Le Burnot affiche un profil en tout point identique à celui de la Molinee (paramètres de courbes identiques), avec pour seule différence un débit spécifique moins élevé. Cette tendance est caractéristique pour des cours d'eaux situés dans des bassins versants à géologie perméable (Figure 18).

Le fait que le Burnot affiche des débits spécifiques plus faibles que ceux de la Molinee peut avoir plusieurs causes :

- soit la pluviosité des deux bassins est différente avec pour conséquence qu'un bassin serait mieux alimenté en eau que l'autre ; ceci est peu probable, les deux bassins étant mitoyens;
- soit cette différence est due à un déficit d'écoulement enregistré à la station de Rivière. Les bilans effectués tendent à confirmer cette hypothèse : le terme de bouclage étant clairement positif (avec un déficit d'écoulement estimé à 13% des précipitations), il est probable que le bassin versant hydrogéologique du Burnot diffère sensiblement du bassin hydrographique, principalement pour sa partie Sud-Est où des pertes en eaux en direction de la Meuse sont probables<sup>20</sup>. La Molinee à Warnant présente, quant à elle, un terme de bouclage quasi négligeable (3% de précipitation).

---

<sup>20</sup> Pour de plus amples informations sur ces bassins versants, nous invitons le lecteur à se référer au rapport « Caractérisation des masses d'eau RWM 021,012 et 011 ».

Remarquons qu'en respectant cette logique, la courbe de durée du Hoyoux, qui présente un excédent d'écoulement estimé à 19%<sup>5</sup>, devrait « idéalement » se trouver au-dessus du profil de la Mollignée. Au lieu de cela, le Hoyoux affiche des débits spécifiques équivalents à ce dernier. Nous ne sommes pas en mesure de fournir une explication satisfaisante sur ce point, malgré le fait que le bassin est fortement exploité par les producteurs d'eau.

Cette approche permet déjà de se faire une idée, toute relative, de la contribution des eaux souterraines pour chaque rivière. Sur base des paramètres  $Q_{90}/Q_{50}$  et CA, la Mollignée et le Hoyoux seraient, à priori, les cours d'eaux avec les débits de base spécifiques ( $Q_{\text{base}}/\text{Surface}$ ) les plus élevés, suivi du Burnot ou de la Hantes, et enfin de la Brouffe.

#### 3.2.2.4 Comparaison des techniques de séparation

Il n'existe évidemment pas de méthode simple et directe pour valider ou discréditer l'une ou l'autre technique de séparation. Nous pouvons néanmoins indirectement juger de la vraisemblance des valeurs obtenues, d'une part, en comparant les débits de base calculés en fonction des caractéristiques hydrogéologiques de chaque bassin versant et, d'autre part, en corrélant les volumes écoulés avec les niveaux piézométriques de la nappe aquifère.

Les résultats graphiques des séparations d'hydrogrammes réalisées sur les bassins tests sont représentés, à titre d'exemple, pour la Hantes sur une période d'un an (Figure 20). Parmi les techniques utilisées, on peut voir que la méthode VCN3 est celle qui indique le débit de base le plus faible, tandis que les méthodes PART et FRD indiquent des débits de base nettement plus élevés.

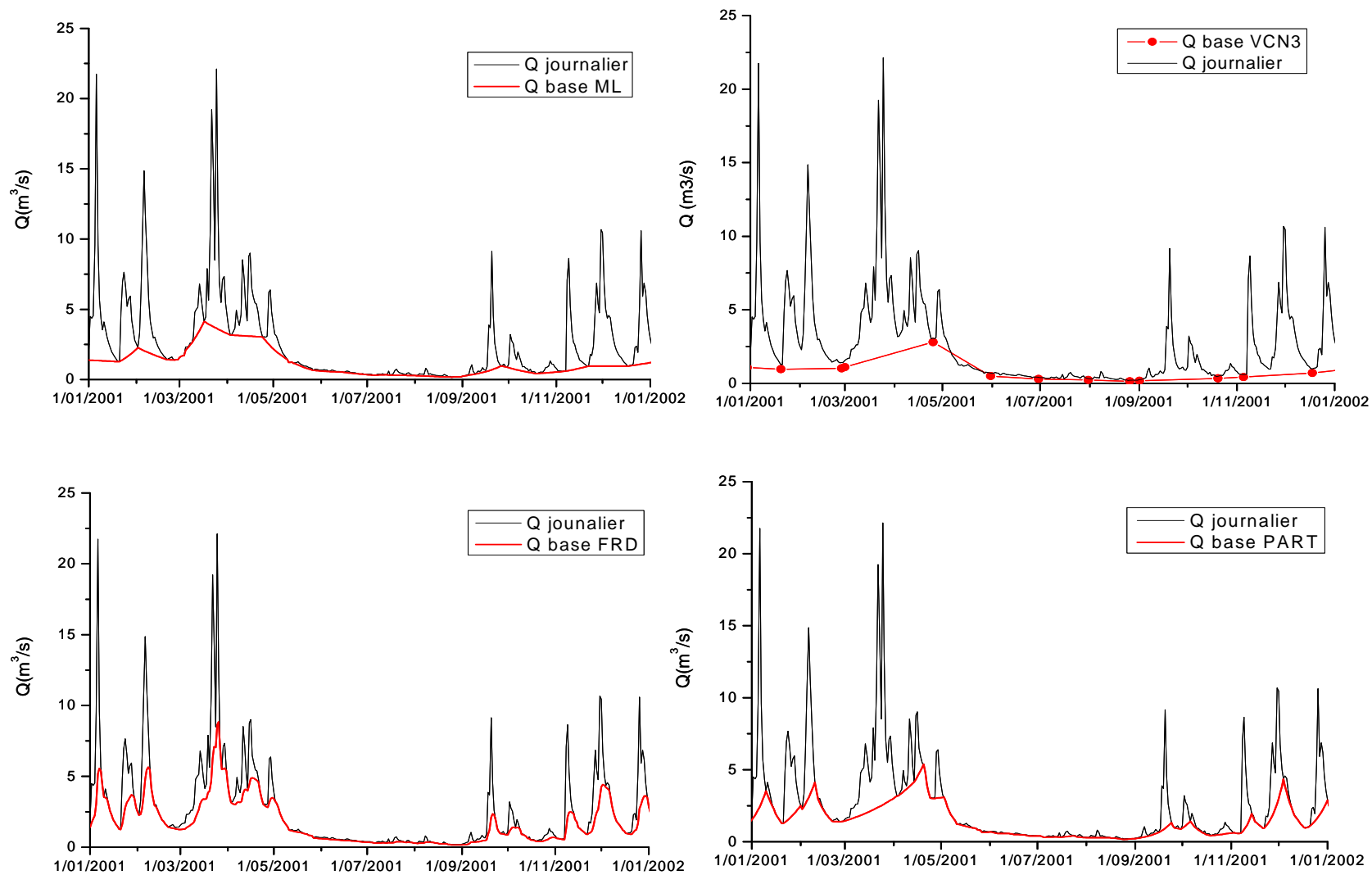


Figure 20. Techniques de séparation d'hydrogrammes appliquées à la Hantes (période 2001-2002).

Le Tableau 3 regroupe les moyennes annuelles des débits de base, exprimés en mm, calculés à partir des différentes techniques de séparation. On constate que seules les méthodes VCN3 et ML suivent la logique imposée par la géologie des bassins versants (i.e.  $Q_b$ Molignée >  $Q_b$ Burnot -  $Q_b$ Hantes >  $Q_b$ Brouffe). Les méthodes FRD et PART placent le débit de base de la Brouffe devant celui du Burnot, ce qui semble peu probable. On en conclut que les méthodes des filtres récursifs FRD et PART surestiment significativement les débits de base des cours d'eau « capricieux », c'est à dire caractérisés par un rapport  $Q_{50}/Q_{moy}$  élevé, tel la Hantes et la Brouffe. Parmi les 4 techniques de séparation d'hydrogramme testées, nous estimons que les méthodes PART et FRD sont les méthodes les moins adaptées au besoin du projet.

	période de mesure	VCN3 mm	ML mm	FRD mm	PART mm	CV
<b>Molignee</b>	1995-2005	249,6	276,4	278,0 (BFI <sub>max</sub> =0.8)	312,0	0,1
<b>Hoyoux</b>	1995-2005	255,7	296,7	259,6 (BFI <sub>max</sub> =0.8)	299,2	0,1
<b>Burnot</b>	1997-2005	116,9	126,6	141,5 (BFI <sub>max</sub> =0.8)	155,3	0,1
<b>Hantes</b>	1995-2005	168,8	188,2	266,5 (BFI <sub>max</sub> =0.8)	273,4	0,2
<b>Brouffe</b>	1995-2005	71,4	93,5	155,1 (BFI <sub>max</sub> =0.5)	172,5	0,4

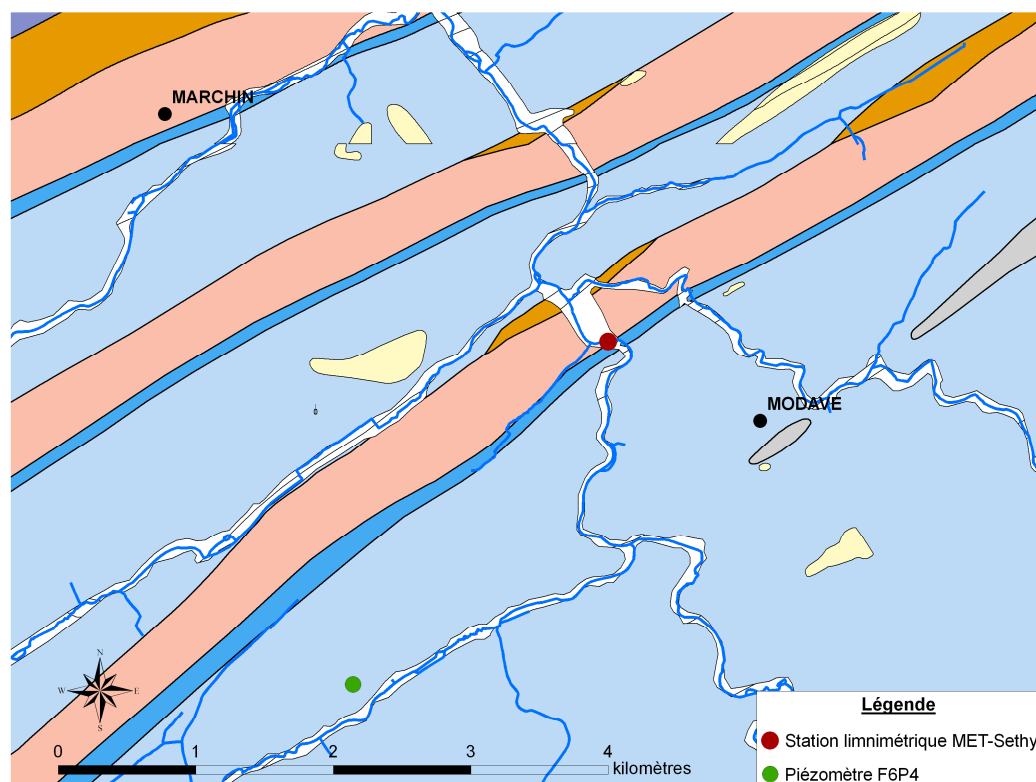
**Tableau 3. Comparaison des valeurs de débit de bases théoriques calculées grâce aux différentes méthodes de séparation d'hydrogramme appliquées aux quatre bassins tests. La variabilité est exprimée sous forme de coefficient de variation (CV= écart-type/moyenne).**

A noter que la technique des filtres est une technique fort intéressante : parmi les méthodes présentées, la courbe de débit de base FRD est la plus réaliste, i.e. la plus proche du modèle théorique brièvement expliqué plus haut (cf § 3.2.1 et Figure 13). Cependant, contrairement aux autres méthodes, la technique FRD est dépendante de deux paramètres : le coefficient de récession, qui peut aisément être calculé par la méthode des corrélations ou des « matching strip » (Nathan & McMahon, 1990), et BFI<sub>max</sub>, qui est le rapport théorique maximal entre le débit de base et le débit total. Ce dernier varie avec la perméabilité du terrain, mais n'est pas mesurable et introduit un élément subjectif influençant fortement le calcul du débit de base. C'est un désavantage considérable si l'on cherche à comparer les débits de base de deux bassins versants avec deux contextes géologiques contrastés. La méthode semble néanmoins indiquée pour une étude plus approfondie d'un bassin versant dont la pédologie et la géologie est bien connue.



### 3.2.2.5 Corrélation entre les niveaux piézométriques et le débit de base des cours d'eau en période d'étiage

Dans nos régions, pour les aquifères calcaires à faible couverture limoneuse, le niveau piézométrique de fin mai peut être considéré comme globalement représentatif de l'état de remplissage de l'aquifère après la période de recharge. Pour effectuer une corrélation entre le niveau de recharge de la nappe et les volumes écoulés dans le cours d'eau, une longue chronique piézométrique associée à une longue série de données limnimétriques sont nécessaires. Nous avons recherché une corrélation entre la cote piézométrique de fin mai du piézomètre F6P4 et les volumes de base écoulés dans la rivière du Hoyoux à la station de Modave (MET-Sethy) (Figure 22), sur les n mois suivants juin 1998. Les volumes de base écoulés sont estimés à partir des méthodes VCN3 et des Minima Lissés (ML), le but étant également de comparer les coefficients de corrélation selon la technique utilisée.



**Figure 21. Localisation du piézomètre F6P4 et de la station limnimétrique de Modave (MET-SETHY) dans le bassin du Hoyoux (cf annexe pour consulter la légende des unités hydrogéologiques).**

La Figure 22 représente les points expérimentaux et les droites d'ajustement pour une période de mesure allant de 1998 à 2005. Dans cette représentation graphique, les volumes de base ont été estimés par la méthode VCN3. Nous avons, dans ces corrélations, éliminé les valeurs de 2000, qui sont manifestement surestimées.

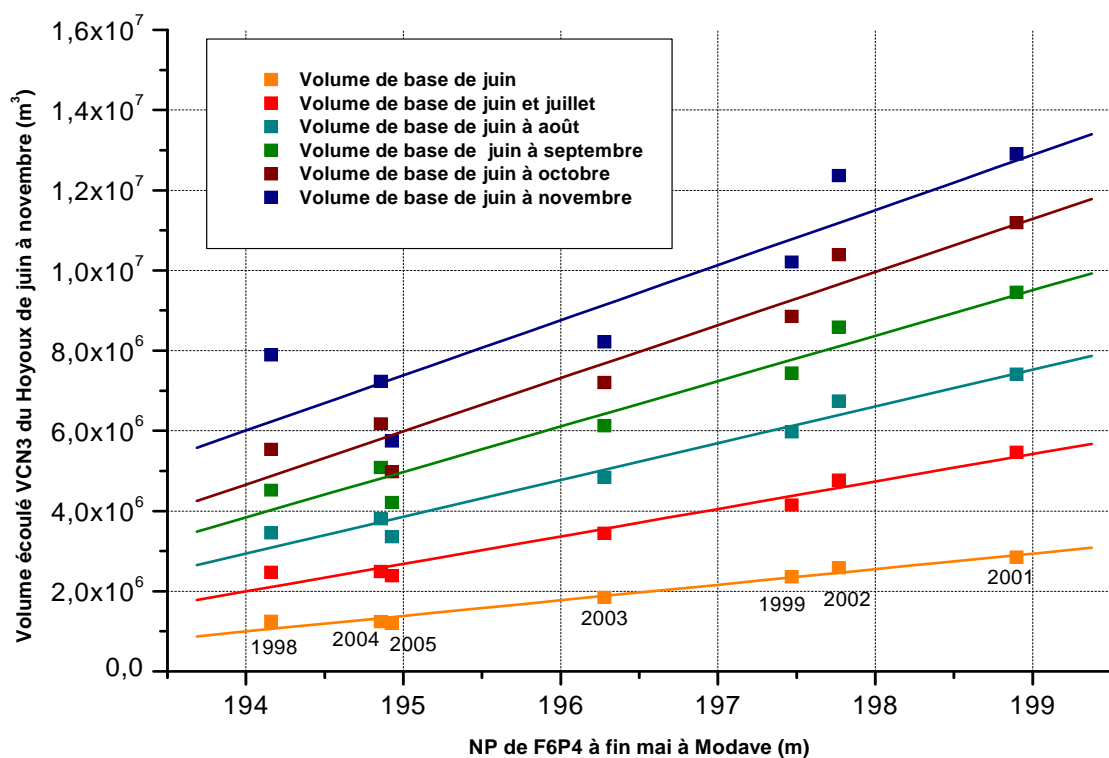


Figure 22. Corrélation entre le niveau piézométrique (NP) en F6P4 de fin mai et les volumes de base VCN3 écoulés du Hoyoux à Modave sur les n mois (1 à 6) à venir.

Volume écoulé sur la période n (=Y)	VCN3				ML
	pente a	ordonnée à l'origine b	Ecart-type de l'estimation de Y SD	Coeff. de corrélation R <sup>2</sup>	Coeff. de corrélation R <sup>2</sup>
juin	388510,49	-7,44E+07	134060	0,985	0,982
juin et juillet	685014,89	-1,31E+08	249280	0,983	0,983
juin => août	915753,59	-1,75E+08	318947	0,984	0,983
juin => septembre	1,13E+06	-2,16E+08	490901	0,976	0,975
juin => octobre	1,32E+06	-2,52E+08	686882	0,966	0,963
juin => novembre	1,37E+06	-2,61E+08	1244560	0,906	0,897

Tableau 4. Corrélation entre le volume de base écoulé dans le Hoyoux à Modave sur n mois, à partir du niveau piézométrique F6P4 de fin mai (période 1998 – 2005).

Les coefficients de corrélation sont particulièrement significatifs pour n variant de 1 à 5 mois (où le coefficient de corrélation varie entre 0,98 et 0,96), mais se dégradent lorsqu'on tient compte du mois de novembre, ce qui est probablement lié à l'arrivée de la période de recharge. Ces corrélations ne permettent pas de discriminer réellement les différentes méthodes de séparation de débit de base, même si la méthode VCN3 affiche des coefficients de corrélation légèrement supérieurs à celles des minima lissés.

Remarquons cependant que :

- les forts coefficients de corrélation prouvent bien que le débit de base du Hoyoux à Modave (estimé en période d'étiage) provient essentiellement des apports en eau souterraine de l'aquifère des calcaires carbonifères, où se situe le piézomètre F6P4.
- les VCN3 et ML peuvent être utilisés pour améliorer la prévision des apports du Hoyoux en période d'étiage, soit de juin à novembre. En effet, on obtient au final une relation de type (Normand *et al.*, 2003) :

$$V_{base} \text{ sur } n \text{ mois}_{HoyouxModave} = aNP_{F6P4} + b \pm t_{\alpha}SD_{volume}$$

Avec  $a$  le coefficient angulaire de la droite de régression

$b$  l'ordonnée à l'origine de la droite de régression

$t_{\alpha}$  est la variable de Student

$(t_{\alpha} SD_{volume})$  est l'intervalle de confiance.

Exemple : si le niveau piézométrique de fin mai est de 198 m, le volume de base VCN3 moyen pour les 4 mois à venir sera égal à  $8,37E+06 \text{ m}^3 \pm 9,13E+05$  avec l'intervalle de confiance à 95%. Ce qui représente un débit moyen de  $0,79 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Si les corrélations entre le niveau piézométrique F6P4 et le débit de base du Hoyoux en période d'étiage montrent des résultats satisfaisants, la méthode n'a cependant pu être testée que sur un seul bassin versant. En effet, celle-ci nécessite des suivis piézométriques et limnimétriques relativement longs (plusieurs années si l'on veut construire une droite de régression valable) et demande également d'être attentif aux paramètres suivants : position du piézomètre par rapport à la station limnimétrique, caractère drainant/perdant du cours d'eau, contexte hydrogéologique du piézomètre par rapport à celui du cours d'eau, etc.

### 3.2.2.6 Calcul des périodes de retour VCN3

L'établissement de cet indicateur consiste à classer les débits de base VCN3 ( $Q_{VCN3}$ ) obtenus pour chaque mois de l'année sur toute la durée de la chronique. Cette classification est faite selon les périodes de retour, c'est-à-dire à une certaine probabilité d'apparition donnée. Par exemple, la décennale sèche est un débit d'étiage dont la période de retour (ou récurrence) est de dix ans.

Ces périodes de retour sont généralement calculées à partir d'une loi statistique ajustée par rapport à la distribution des données, grâce auquel nous pouvons définir plusieurs classes selon la période de retour désirée.

#### **3.2.2.6.1** *Contrôle des données*

Avant d'utiliser une série de données, il est nécessaire de se préoccuper de leur qualité et de leur représentativité. En effet, les calculs statistiques reposent sur un certain nombre d'hypothèses qui doivent, en principe, être préalablement vérifiées (Musy A., 2005).

- La série de données doit être aléatoire et simple. Cela signifie que tous les individus de la population ont la même probabilité d'être prélevés et que le prélèvement d'un individu n'influe pas la probabilité d'apparition des individus suivants. Autrement dit, toutes les observations de la série sont issues de la même population et sont indépendantes entre-elles.
- La série d'observations doit être suffisamment longue. Ainsi, il est généralement admis qu'un minimum de 20 observations est nécessaire, ce qui correspond dans notre cas à une chronique d'une durée de 20 ans.
- La série de données doit être stationnaire, ce qui signifie que les propriétés de la loi statistique qui régit le phénomène (moyenne, variance, ...) sont invariants au cours du temps. Dans notre cas, il s'agit de tout phénomène pouvant influencer le régime de débits (déforestation, reboisement, variations climatiques, interventions humaines,...) au cours de l'enregistrement des données.
- Les données doivent être homogènes, c'est-à-dire qu'elles ne peuvent pas refléter deux ou plusieurs phénomènes différents. Le régime d'une rivière à l'aval de la confluence de deux sous bassins dont le comportement hydrologique est très contrasté constitue un bon exemple de non-homogénéité.

Dans notre cas, le paramètre traité statistiquement ( $Q_{VCN3}$ ) correspond à des minima mensuels, établis sur plusieurs années. Ainsi, l'espacement temporel entre chaque valeur  $Q_{VCN3}$  est de l'ordre de l'année, ce qui nous permet d'affirmer sans trop de risques que l'effet de persistance est nul, et que, par conséquent, les variables sont indépendantes entre-elles. Par-contre, l'homogénéité et la stationnarité des données sont, à priori, des paramètres plus difficiles à vérifier. Cependant, il existe un certain nombre de tests d'hypothèses non-paramétriques (c'est-à-dire des tests supposant que la série de données ne suivent pas une distribution théorique particulière) permettant de valider ces conditions, tel le test de Mann-

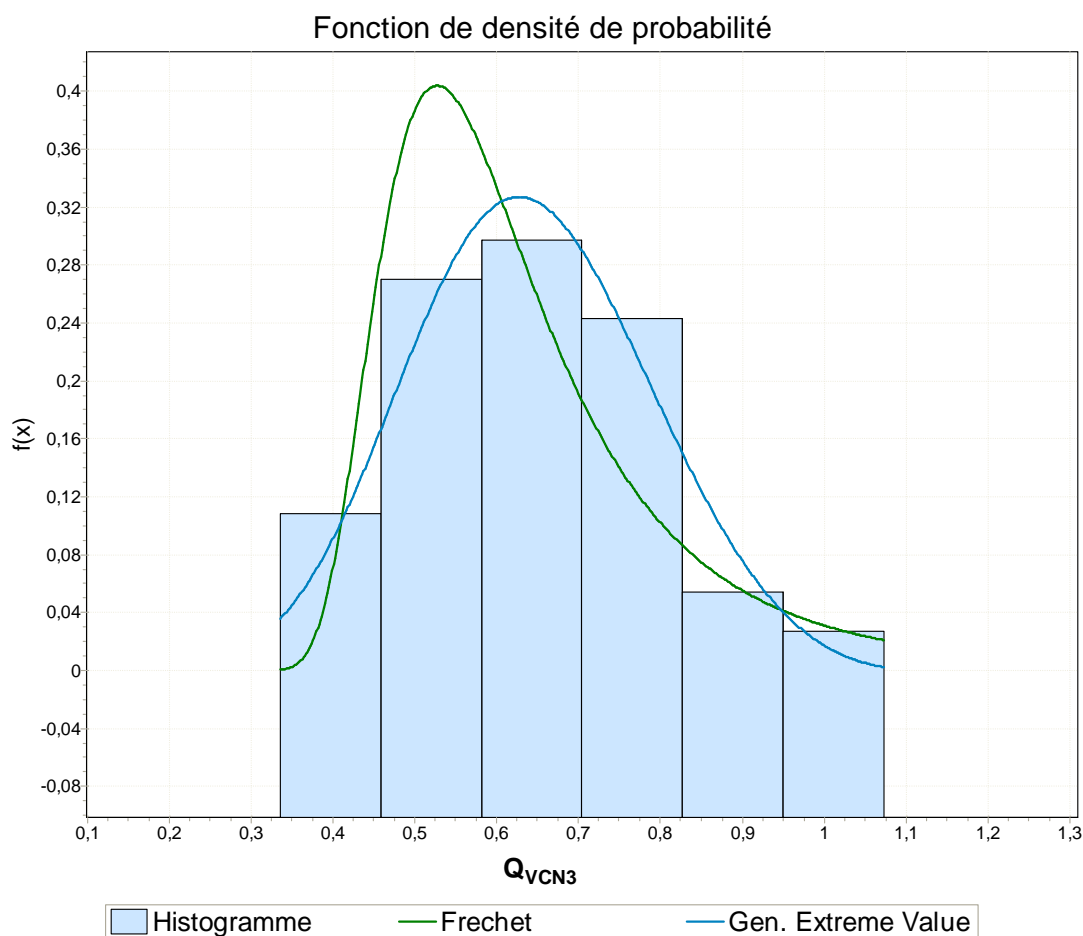
Whitney ou Wilcoxon, de même que les tests d'autocorrélations permettent de vérifier si une dépendance existe au sein d'une série d'observations (Helsel & Hirsch, 1992).

#### **3.2.2.6.2 Analyse fréquentielle des débits de base VCN3**

L'analyse fréquentielle d'une série de données permet d'estimer le temps de retour d'une valeur particulière. Cette prédiction repose sur la définition et la mise en œuvre d'un modèle fréquentiel (ou distribution théorique), c'est à dire une équation décrivant le comportement statistique d'un processus. Ces modèles décrivent la probabilité d'apparition d'un évènement de valeur donnée, mais sont également utiles lorsqu'il s'agit d'établir la fréquence d'apparition d'un phénomène rare, tel une forte crue ou un étiage extrême, et devant être extrapolée au-delà des limites d'observations. Dans notre cas, il s'agit d'ajuster ces modèles théoriques sur la distribution annuelle des  $Q_{VCN3}$  pour chaque mois, afin de pouvoir déterminer, in fine, la probabilité d'un étiage quinquennal, décennal ou même vingtennal.

Cependant, malgré les nombreux travaux effectués sur le sujet (Nathan et McMahon, 1990 ; Vogel et Wilson, 1996 ;... dans Smathkin, 2001), la loi théorique régissant les valeurs de débits d'étiage est encore inconnue (Smathkin, 2001), ce qui nous amène à devoir tester plusieurs types de lois et décider quelle distribution s'adapte le mieux à notre série de données. Cette étape est critique et doit être effectuée avec beaucoup de précaution. En effet, si l'on veut que les seuils de vigilance (définis par les périodes de retour) soient réalistes et représentatifs du régime d'étiage du cours d'eau, la loi de distribution statistique théorique doit être choisie avec rigueur et discernement. Les modèles fréquents existants sont nombreux (au moins 30) et les tests d'adéquation sont généralement fastidieux à effectuer. Il est donc fortement conseillé d'utiliser des programmes de traitements statistiques (Statistica, R,...). Dans le cadre du projet, le programme utilisé est la version d'évaluation d'Easyfit 4.3.

Pour juger de la fiabilité d'une loi, l'utilisateur dispose de plusieurs outils graphiques et analytiques. En règle générale, l'examen visuel du graphique représentatif de l'ajustement réalisé, même s'il peut paraître rudimentaire, reste un des meilleurs moyens pour juger de la qualité d'un ajustement. La figure 22 est un exemple appliqué aux débits de base VCN3 du mois d'août de la Mognée : l'ajustement par la loi des extrêmes généralisée (voir plus loin) semble plus satisfaisant que par la loi de Fréchet.



**Figure 23. Distribution et ajustement statistique des  $Q_{VCN3}$  du mois d'août pour la station de Warnant sur la Mollignée par deux modèles fréquentiels différents (période 1969-2005).**

Ensuite, les tests d'adéquation aident à choisir les lois les mieux adaptées aux échantillons. Le programme utilisé permet d'effectuer 3 tests :

- le test Khi-carré (peu adapté pour l'analyse de variables aléatoires continues) ;
- le test de Kolmogorov-Smirnov (KS) ;
- le test d'Andersen-Darling (AD).

Les tests d'adéquation permettent, pour chaque série de données  $Q_{VCN3}$ , de classifier les modèles fréquentiels théoriques proposés par le programme selon leurs degrés d'exactitude par rapport à la distribution expérimentale.

Un résumé des ajustements effectués sur nos échantillons (12 séries/rivière, 1 série = 1 mois) en fonction des résultats des tests est représenté dans le Tableau 5. Les chiffres représentent le nombre de mois dont la distribution des  $Q_{VCN3}$  fut ajustée par la loi la plus adaptée. Celle-ci est retenue selon les critères des deux tests d'adéquation. Pour le Burnot, 5

sur les 12 mois VCN3 ont été ajustés par la loi GEV selon les critères du test KS, et 9 selon le test AD.

	GEV	Gamma	Weibull	Log-Normal	Log-logistic	Fatigue Life	Inv Gaussian	Rayleigh	Frechet
<b>Kolmogorov-Smirnoff</b>									
Burnot	5	3			1	1	1	1	
Molignee	7	2	2				1		
Brouffe	5			2		3	1	1	
Hantes	8				1		1		2
<b>Anderson-Darling</b>									
Burnot	9					1		2	
Molignee	7	2				1	1		1
Brouffe	6			2	1	1	2		
Hantes	6		1			2	2		1

**Tableau 5. Résumé des ajustements statistiques réalisés sur les échantillons VCN3.**

Dans les études liées à la distribution des débits d'étiage *annuels*, les lois de Weibull, de Pearson III (ou Gamma), de Gumbel ou de Galton (ou Log-normal) semblent les plus utilisées (Smathkin, 2001). Cependant, n'oublions pas que nous traitons ici des étiages *mensuels*. Le Tableau 5 montre que la majorité des échantillons VCN3 (respectivement 52 et 58% selon les tests KS et AD) suivent une distribution spécifique appelée « loi des extrêmes généralisées (GEV) », dont la fonction de répartition et le domaine d'existence sont définis de la manière suivante :

$$F(x) = P(X \leq x) = \begin{cases} \exp\left(-\left(1+k\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{1/k}\right), & k \neq 0 \\ \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right), & k = 0 \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} 1+k\frac{x-\mu}{\sigma} > 0 & \text{pour } k \neq 0 \\ -\infty < x < +\infty & \text{pour } k = 0 \end{cases}$$

où  $\mu$  est le paramètre de position,  $\sigma$  le paramètre d'échelle et  $k$  le paramètre de forme.

C'est grâce à la fonction de répartition d'une loi qu'il est possible de calculer les débits ( $=X$ ) en fonction des périodes de retour souhaitées. Pour cela il suffit simplement d'utiliser la fonction inverse de la fonction de répartition, et calculer, pour une probabilité donnée (i.e. la période de retour) la valeur de débit correspondante.

Remarquons que, dans le cas d'estimations de valeurs d'étiages, il est impératif de contraindre le domaine d'existence du modèle aux valeurs positives seulement. Si on reprend l'exemple de la loi GEV, le paramètre de forme  $k$  doit être différent de 0 afin d'éviter que la variable  $x$  (dans notre cas,  $Q_{VCN3}$ ) puisse prendre une valeur négative, ce qui n'aurait aucun

sens. A noter que le fait de contraindre le domaine d'existence de la variable diminue fortement le choix des modèles théoriques disponibles pour l'ajustement.

Les périodes de retour les plus fréquemment utilisées, notamment dans les bulletins hydrologiques des DIREN françaises, sont les quinquennales ( $P(X < x) = 0,2$ ) et les décennales sèches ( $P(X < x) = 0,1$ ). A titre d'exemple, les débits correspondants aux périodes de retour calculées pour la Molinee sont représentés dans le Tableau 6.

	<b>moyenne VCN3</b>	<b>décennale sèche VCN3</b>	<b>quinquennale sèche VCN3</b>	<b>quinquennale humide VCN3</b>
	<b>m<sup>3</sup>/s</b>	<b>m<sup>3</sup>/s</b>	<b>m<sup>3</sup>/s</b>	<b>m<sup>3</sup>/s</b>
<b>janvier</b>	1,18	0,61	0,75	1,56
<b>février</b>	1,34	0,73	0,87	1,75
<b>mars</b>	1,36	0,75	0,88	1,72
<b>avril</b>	1,29	0,76	0,89	1,63
<b>mai</b>	1,05	0,64	0,77	1,33
<b>juin</b>	0,88	0,59	0,68	1,07
<b>juillet</b>	0,77	0,50	0,59	0,91
<b>août</b>	0,68	0,47	0,54	0,83
<b>septembre</b>	0,64	0,44	0,51	0,75
<b>octobre</b>	0,64	0,45	0,50	0,77
<b>novembre</b>	0,77	0,44	0,50	0,95
<b>décembre</b>	0,95	0,47	0,58	1,24

**Tableau 6. Débits des périodes de retour mensuels calculés pour le bassin de la Molinee sur une période entre 1969 et 2005.**

### 3.2.2.6.3 Représentation graphique

La représentation graphique utilisée ici est largement inspirée des bulletins hydrologiques des DIREN françaises. Il s'agit d'un graphique semi-logarithmique où apparaît la courbe des quinquennales sèches et humides, les décennales sèches et l'hydrogramme de ou des années en cours. Les Figure 24 et Figure 25 représentent l'évolution des débits journaliers des bassins tests en fonction des périodes de retour.



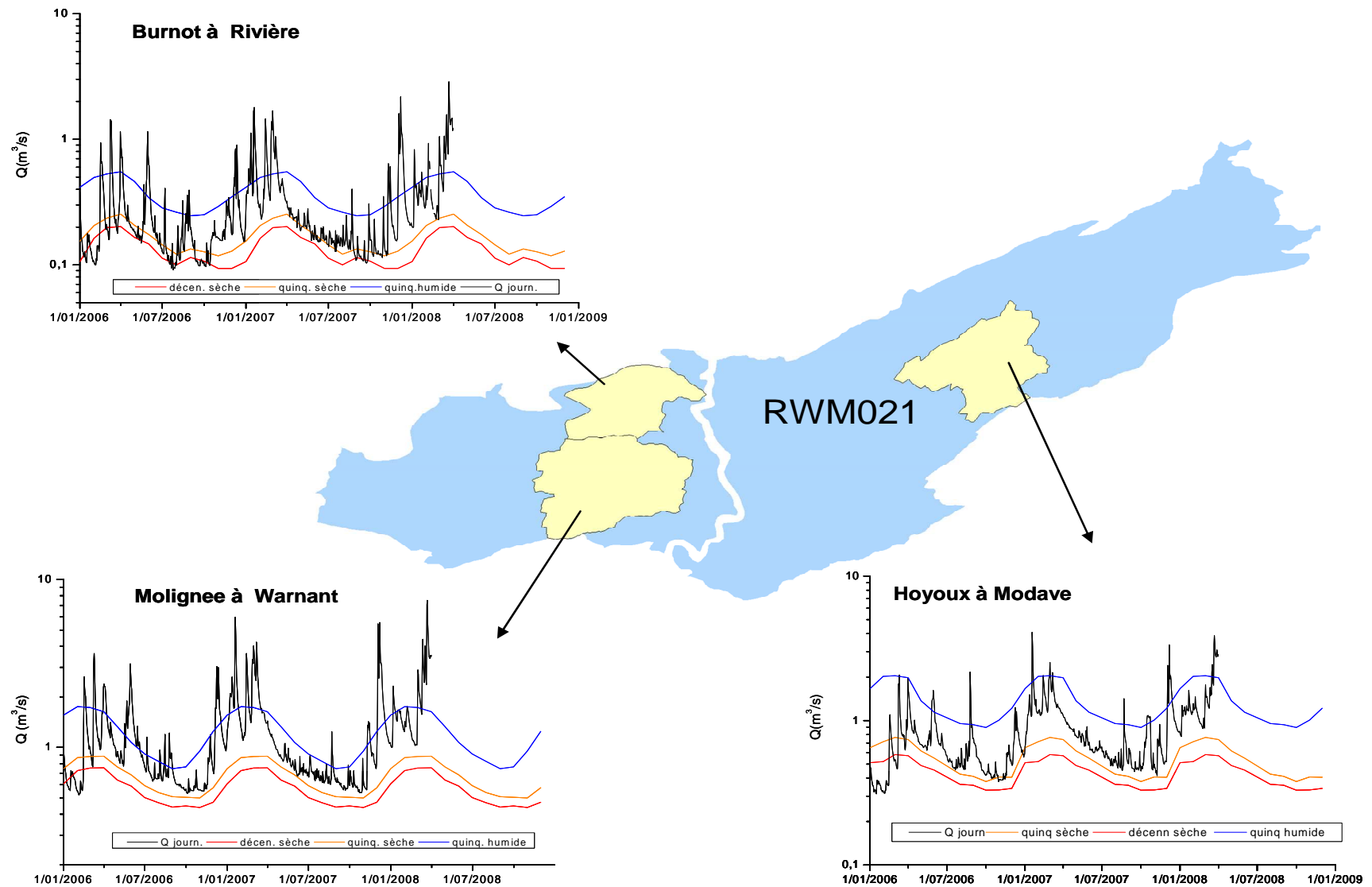


Figure 24. Indicateur VCN3 appliqué aux bassins tests de la masse d'eau RWM021 pour les années 2006, 2007 et 2008.

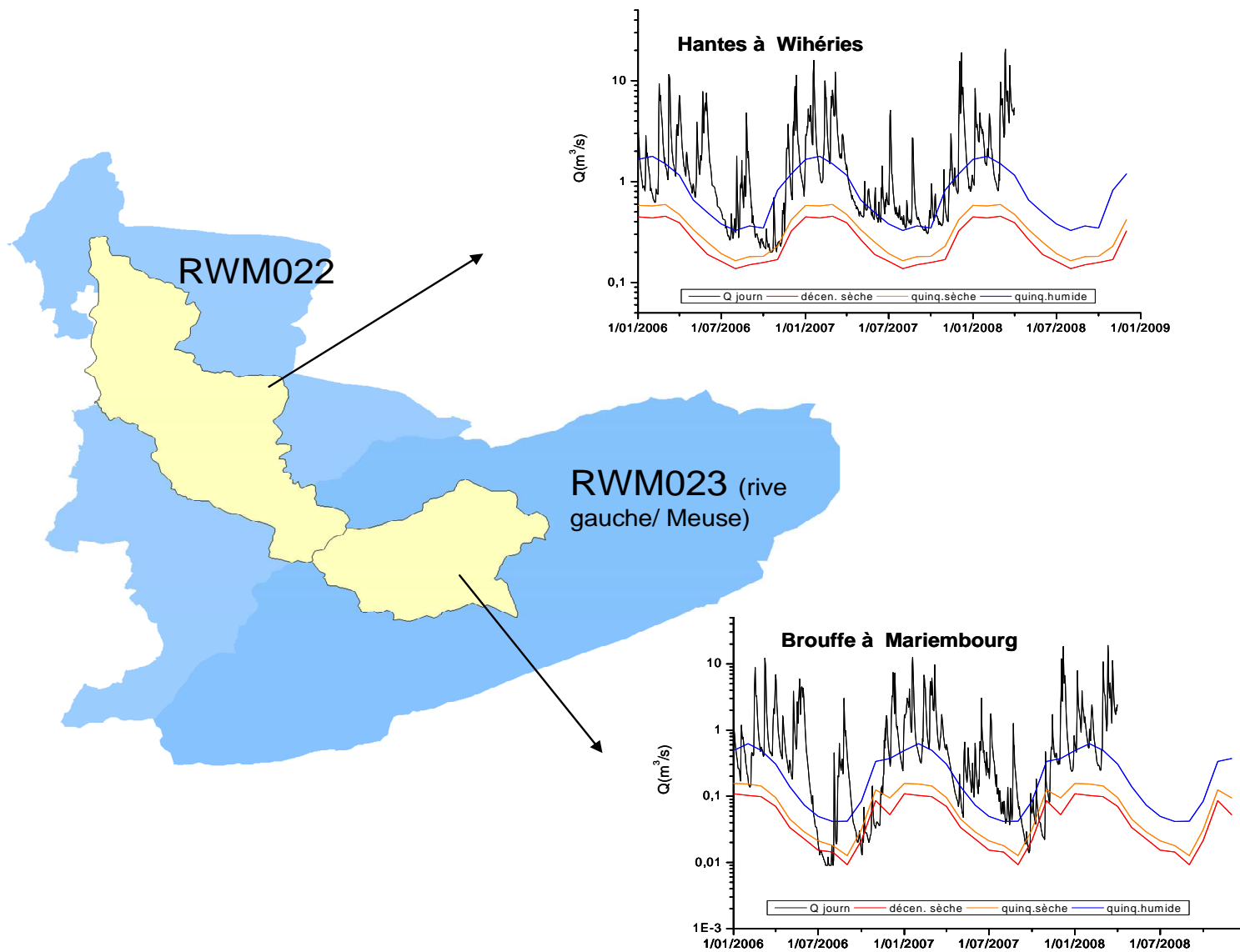


Figure 25. Indicateur VCN3 appliqué aux bassins tests de la masse d'eau RWM021 pour les années 2006, 2007 et 2008.

Remarquons que :

- Le but des Figure 24 et Figure 25 est surtout de comparer les débits journaliers *pendant les périodes de récession*, c'est-à-dire de mai à novembre. Comme nous l'avons vu plus haut, le débit de base est difficile à estimer en période de crue et les VCN3 calculés en hautes eaux ne sont sans doute pas suffisamment fiable pour que les seuils de vigilance calculés aient une quelconque réalité physique.
- Plus la série de données est longue et complète, plus l'ajustement des modèles théoriques sera efficace et permettra, par conséquent, de calculer des seuils de vigilance « réalistes ». Dans le cas contraire, on obtient des courbes « irrégulières », dont les points d'inflexions seront accentués pour les périodes de retour plus élevées (ex. 10, 15 ans). C'est le cas du Burnot et de la Brouffe, tous deux sous-échantillonnés (n étant respectivement égal à 8 et 15 ans).
- Enfin, la méthode ne s'applique qu'aux cours d'eaux avec des débits de base soutenus. Dans le cas contraire, tel celui de la Brouffe (Figure 25), les périodes de récession sont très peu prononcées sur l'hydrogramme (car fortement influencées par les écoulements rapides de surface) et compliquent la comparaison entre débits journaliers et les périodes de retour VCN3.

Une amélioration peut également être apportée en déterminant, pour chaque rivière, des « seuils critiques ». En effet, les seuils de vigilance VCN3 sont calculés à partir de modèles purement statistiques et ne tiennent pas compte de paramètres humains et environnementaux. On définit le débit réservé comme le débit minimum, suffisant pour concilier le maintien des communautés biologiques aquatiques et les besoins anthropiques. Si la recherche de débits réservés d'un cours d'eau dépasse largement le cadre de cette étude, son estimation pour chaque bassin versant pourrait s'avérer fort intéressante et facile à insérer comme seuil de vigilance ultime ou seuil « critique » dans l'optique d'améliorer l'indicateur VCN3. Dans les diagrammes, il serait alors représenté sous forme d'une horizontale puisqu'il s'agirait d'une valeur unique (contrairement aux courbes des seuils de vigilance). Un exemple d'un seuil critique imaginaire est représenté à la Figure 26.

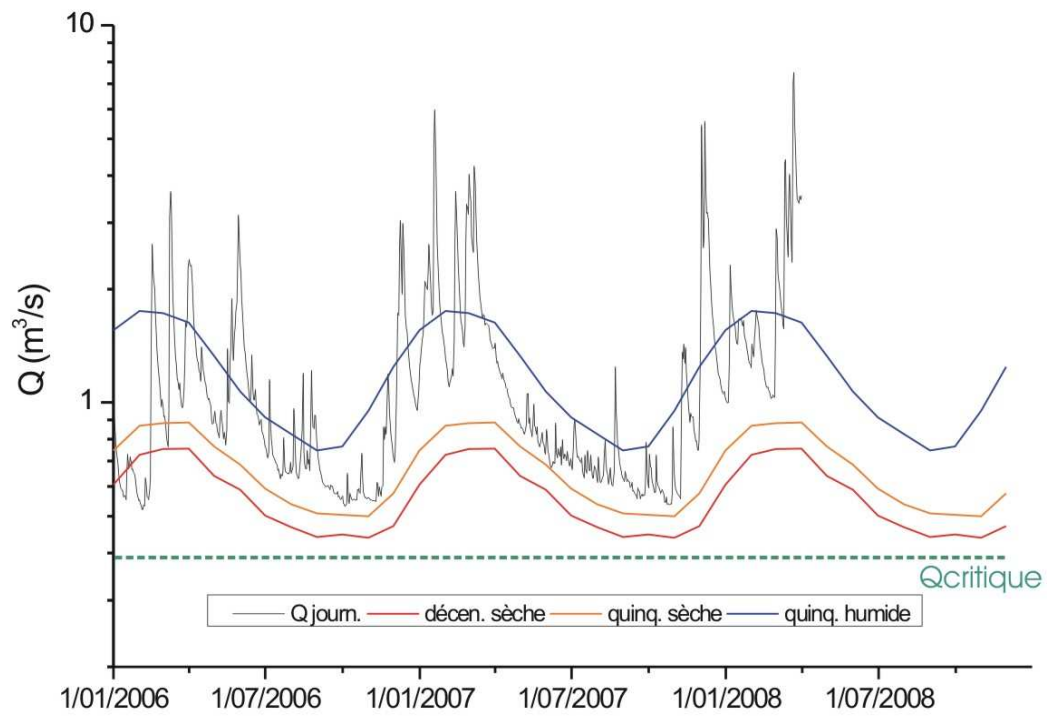


Figure 26. Représentation d'un seuil critique imaginaire dans le cadre des indicateurs VCN3.

### 3.3 Indicateur « Tempo »

#### 3.3.1 *Description de l'indicateur*

##### 3.3.1.1 Introduction

Comme mentionné en introduction de ce livrable, en théorie, l'indicateur quantitatif le plus pertinent pour le volet « ressource » eau souterraine repose sur l'évaluation du volume des réserves en eau souterraine et leur évolution au cours du temps, voire l'écoulement de base au seuil hydrogéologique du bassin étudié. A cela peuvent s'ajouter des indicateurs « sources » visant à évaluer l'évolution du système hydrogéologique (et des conséquences de cette évolution sur les systèmes associés) en certains points particuliers du bassin, par exemple l'évolution du niveau piézométrique au voisinage d'une zone humide ou l'évolution du débit de base sur une section protégée de cours d'eau (i.e. problématique des débits réservés).

L'établissement de tels indicateurs repose en théorie sur des mesures potentiellement nombreuses et sur une connaissance et une quantification relativement précises des conditions hydrogéologiques, voire sur des outils élaborés comme des modèles numériques d'écoulement. Cela pouvant potentiellement alourdir le travail d'élaboration des indicateurs, l'idée développée dans ce chapitre est d'établir, pour le bassin étudié, des fonctions de transfert plus simples permettant d'estimer, de manière rapide et suffisamment précise, un indicateur quantitatif ayant pour objectif d'évaluer l'état et la dynamique de l'hydrosystème étudié (nappe d'eau souterraine) sur base de l'établissement et l'ajustement d'une fonction de transfert « alimentée » par un nombre limité de mesures et d'observations acquises dans l'hydrosystème visé. Cet indicateur repose sur l'établissement d'une relation causale entre une série de données d'entrées, distribuées dans le temps et constituant des forces « motrices » du système hydrogéologique (ex : pluie, température, prélèvements...) et une information de sortie, également variable au cours du temps, reflétant l'état et l'évolution du système hydrogéologique, localement ou globalement, en réponse aux forces motrices appliquées.

L'établissement et l'ajustement de la fonction de transfert sont réalisés par l'intermédiaire du logiciel de traitement et de modélisation de séries temporelles « Tempo » développé par le BRGM. Une fois la fonction de transfert ajustée, elle peut être utilisée à des fins prévisionnelles, sur une échéance plus ou moins longue, dépendant de l'inertie du système hydrogéologique étudié. L'utilisation « pratique » de cet indicateur requiert un suivi régulier des points de mesures relatifs aux variables d'entrée de la fonction de transfert. Elle permet d'établir et de prédire l'évolution de la nappe d'eau souterraine localement (exemple : évolution du niveau piézométrique

dans une zone humide) ou globalement (exemple : débit à l'exutoire du bassin hydrogéologique). La démarche peut aisément être couplée à des seuils de référence (niveau piézométrique ou débit d'étiage critique) dans l'optique d'une prise de décision sur la gestion de la ressource (diminution des prélèvements, etc).

En fonction du temps de réponse du système, la fonction de transfert calibrée permet de prédire l'évolution du système soit sur base de données d'entrée actualisées (mesures récentes), soit de scénarios hypothétiques (diminution des précipitations, augmentation des prélèvements,...).

### 3.3.1.2 *Approche théorique*

D'un point de vue théorique, le calcul en sortie des données de débit ou de niveau piézométrique repose sur des techniques de modélisation inverse et d'analyse de signal. La relation causale entre entrées et sorties du système est exprimée par une ou plusieurs fonctions de transfert (ou réponses impulsionnelles) décrivant les différents processus en jeu (ruissellement, infiltration, écoulement souterrain) (Pinault, 2007).

La modélisation inverse des écoulements repose sur le calcul de deux réponses impulsionnelles :

- une réponse impulsionnelle lente  $\Gamma_l$ , généralement associée aux processus d'infiltration et d'écoulement souterrain ;
- une réponse impulsionnelle rapide  $\Gamma_r$ , généralement associée au ruissellement de surface (modèle de transfert pluie-débit), ou à un effet de chasse au sein de la zone non saturée (modèle de transfert pluie-niveau piézométrique).

La sortie de l'hydrosystème  $S(t)$  (débit, niveau piézométrique) est exprimée par une relation non dimensionnelle de type :

$$S(t) = (\Gamma_r * P_r + \Gamma_l * P_l) + a.t + b$$

où \* représente le produit de convolution discret,  $t$ , le temps, le terme  $a.t + b$ , la tendance,  $P_r$  et  $P_l$ , les composantes de la pluie associées à un transfert rapide et lent,  $\Gamma_r$  et  $\Gamma_l$ , les réponses impulsionnelles normalisées (aire unité) et donc sans dimension.

### 3.3.1.3 Fonction de transfert pluie – niveau piézométrique

La structure de l’algorithme est la suivante :

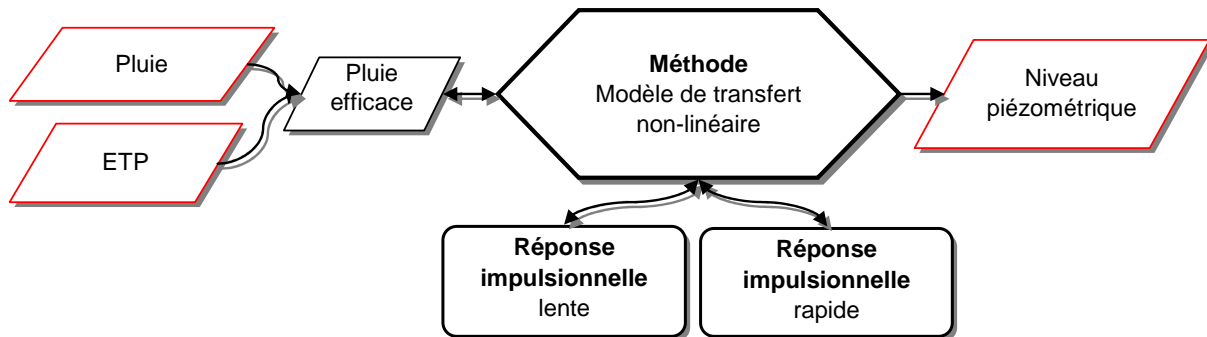


Figure 27 : Processus de transfert déterminant le niveau piézométrique à partir de la recharge (Pinault, 2007).

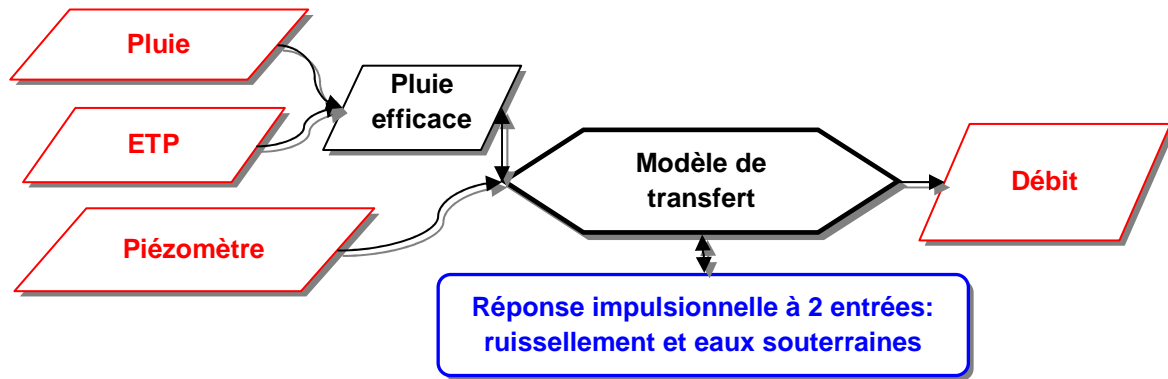
Le processus de transfert fait intervenir deux réponses impulsionnelles, une réponse impulsionnelle rapide associée à la vidange gravitaire de la nappe par « effet de chasse » correspondant à une mise en connexion hydraulique entre la zone non saturée et la zone saturée (fractures en milieu karstique) et une réponse impulsionnelle lente associée aux processus d’infiltration. La part relative de la pluie efficace associée au transfert rapide est donnée par une fonction  $\alpha(t) = P_r / (P_r + P_l)$  dont les valeurs varient entre 0 et 1. Cette fonction est établie sur base de la pluie efficace selon la relation :

$$\alpha(t) = \Gamma_{P_{eff}} * P_{eff} = \Gamma_{Eff} * (P_r + P_l)$$

Elle atteint son maximum à la fin de l’hiver lorsque l’état de saturation en eau des sols est élevé.

#### 3.3.1.4 Fonction de transfert pluie – niveau piézométrique - débit

L'architecture du processus de transfert est décrite à la figure suivante, un ou plusieurs niveaux piézométriques d'une nappe alimentant le cours d'eau peuvent être considérés en données d'entrée :



**Figure 28 : Processus de transfert déterminant le débit du cours d'eau sur base de la contribution du ruissellement (composante rapide de la pluie efficace) et des eaux souterraines (composante lente de la pluie efficace et composante de la nappe) (Pinault, 2007).**

Le processus de transfert fait intervenir deux réponses impulsionnelles, une réponse impulsionnelle rapide associée au ruissellement de surface et une réponse impulsionnelle lente associée aux écoulements souterrains : recharge et composante provenant de la nappe. La pluie efficace correspond à la hauteur d'eau minimale susceptible d'engendrer un débit à l'exutoire. La part relative de la pluie efficace associée au ruissellement est donnée par la fonction  $\alpha(t)$ .

Au stade actuel, un indicateur associé à l'évolution des réserves en eau souterraine n'a pas pu être construit ou testé, faute de disposer d'estimations réelles précises d'évolution de ces réserves dans l'un ou l'autre bassin test pour l'ajustement d'une telle fonction de transfert. A moyen terme, une telle approche pourrait toutefois être développée, en se basant par exemple sur les évolutions de réserves calculées à l'aide du modèle mathématique développé dans le cadre du projet Synclin'EAU pour les masses d'eau RWM011, RWM012 et RWM021.

#### 3.3.1.5 Calibration des fonctions de transferts

A titre d'essai et de première illustration, la méthode a été appliquée au bassin du Hoyoux. Quatre modèles de transfert ont été calibrés à un pas de temps décadaire sur une période de 10 ans (1994-2003). Deux modèles de transfert expriment respectivement l'évolution du niveau de la nappe ou du débit total (composante des galeries comprise) du cours d'eau en fonction de la pluie et de l'ETP. Un modèle exprime l'évolution du débit total du cours d'eau à partir de données



d'entrée de pluie, d'ETP et de piézométrie. Un quatrième modèle exprimant le débit du cours d'eau seul sur base de la pluie et de l'ETP, indépendamment de la composante des galeries, a également été testé.

Les données suivantes ont été utilisées :

- les précipitations journalières enregistrées à la station pluviométrique de Modave ;
- des ETP journalières calculées à la station de Bierset (à défaut des données d'ETP journalières calculées par bassin, commandées auprès de la DCENN mais non reçues à ce jour) ;
- le débit journalier total mesuré à la station limnimétrique de Modave (MET-SETHY) ;
- le débit journalier total mesuré à l'exutoire des galeries de Modave (données Vivaqua) ;
- les données piézométriques mensuelles mesurées dans le piézomètre PP1 à Clavier (données Vivaqua) et interpolées au pas de temps journalier.



### 3.3.1.6 Modèle de transfert pluie – niveau piézométrique

La Figure 30 présente les premiers résultats de la modélisation appliquée à la chronique piézométrique de l'ouvrage PP1 Clavier. La comparaison des résultats montre que le niveau piézométrique calculé apparaît surestimé par rapport aux observations en période de récession, en tout cas sur la première moitié de la chronique.

L'écart type  $S$  et les coefficients  $R^2$  et Nash mesurent la qualité de l'ajustement du modèle  $M(t)$  sur la série observée  $O(t)$ . L'écart type exprime l'écart entre les hauteurs piézométriques calculées et observées. Le paramètre  $R^2$ , sans dimension, correspond au rapport  $(\text{var2} - \text{var1})/(\text{var1} + \text{var2})$  où  $\text{var1}$  et  $\text{var2}$  sont respectivement les moments d'inertie du nuage de points  $[O(t), M(t)]$  par rapport à la première et la seconde bissectrice (Pinault, 2007). Celles-ci représentent les axes principaux d'inertie du nuage de points.  $R^2$  caractérise l'organisation des points par rapport aux deux bissectrices. Il varie entre -1 et 1 :

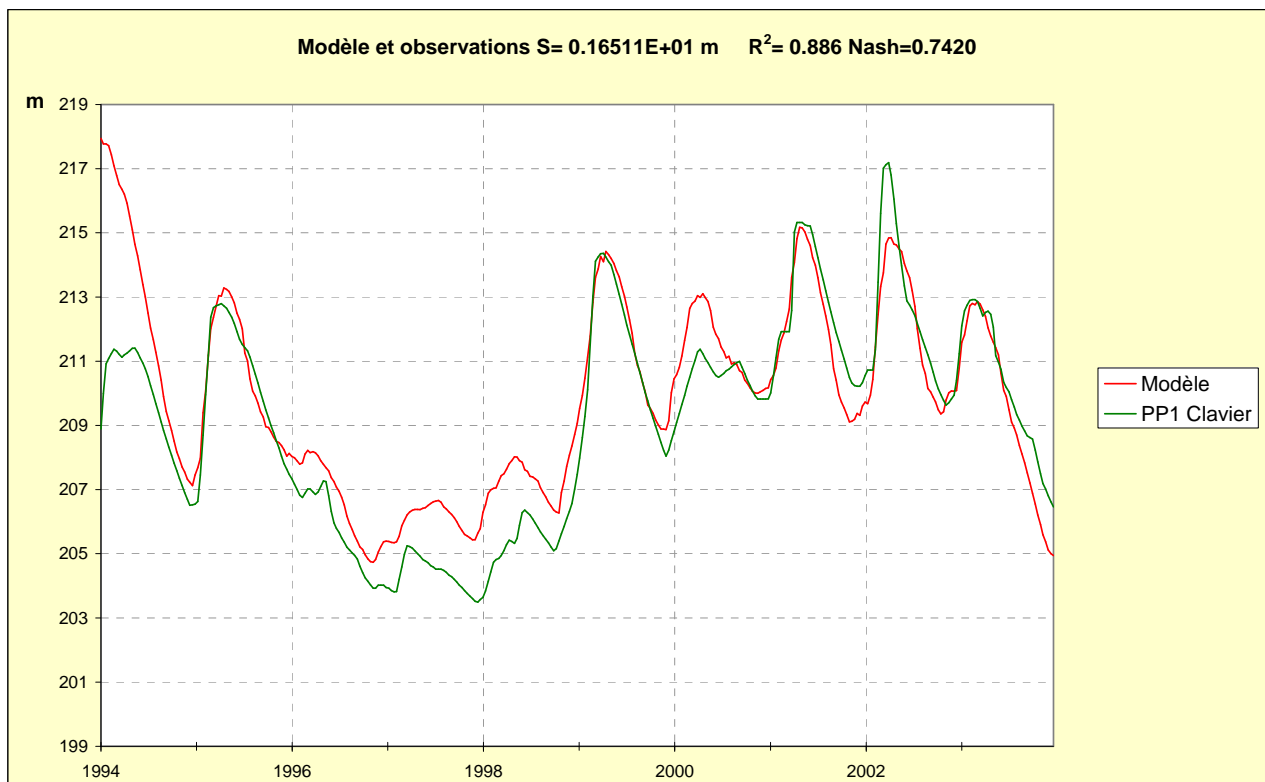
- $R^2 = 1$  lorsque  $\text{var1} = 0$ , tous les points sont alignés sur la première bissectrice
- $R^2 = -1$  lorsque  $\text{var2} = 0$ , tous les points sont alignés sur la seconde bissectrice

Le modèle est d'autant mieux ajusté que la valeur de  $R^2$  est proche de 1. Une valeur nulle signifie l'absence de corrélation.

Le paramètre de Nash, également sans dimension, correspond au rapport de la somme des carrés du résidu sur la variance de la série observée (Pinault, 2007) :

$$\text{Nash} = 1 - \frac{\sum_{n=1, N} [S(n) - M(n)]^2}{\sum_{n=1, N} [S(n) - \bar{S}]^2}$$

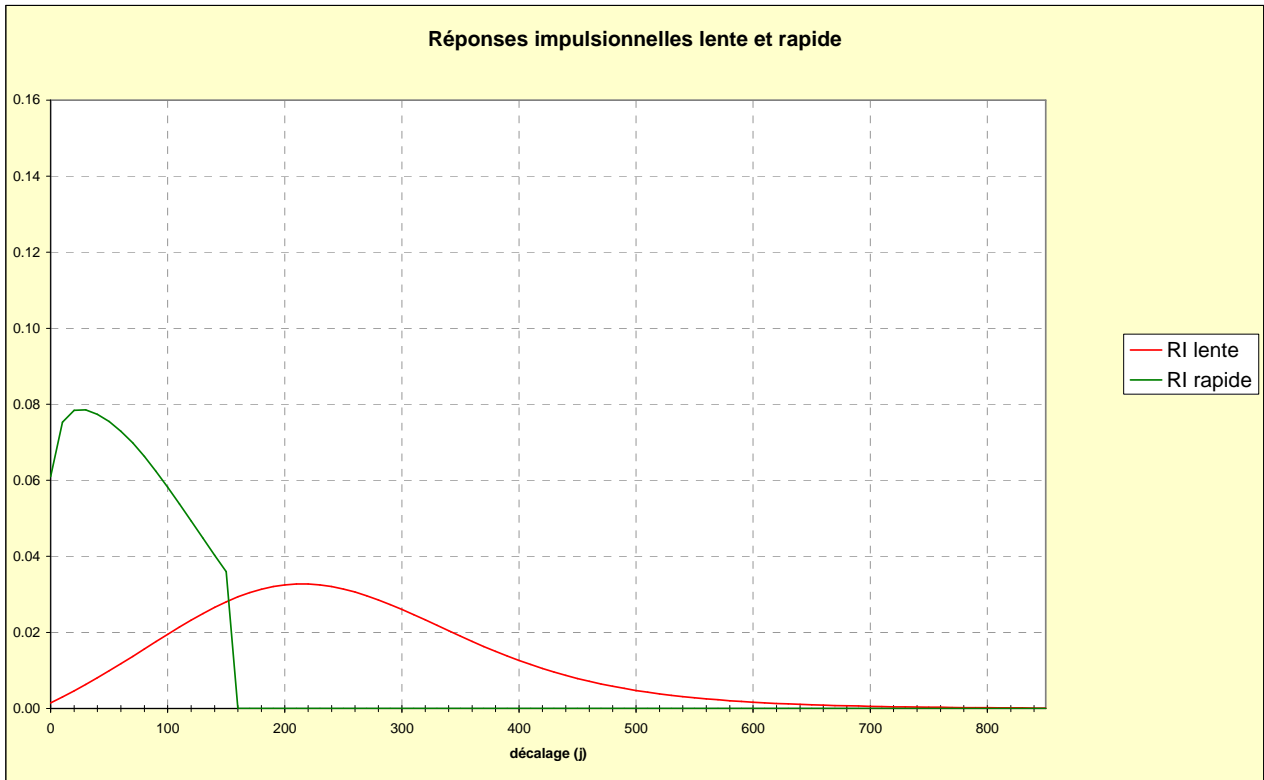
où  $\bar{S}$  est la moyenne de la série observée  $S(n)$  et  $N$ , la taille de l'échantillon. L'ajustement est d'autant meilleur que la valeur de ce paramètre est proche de 1.



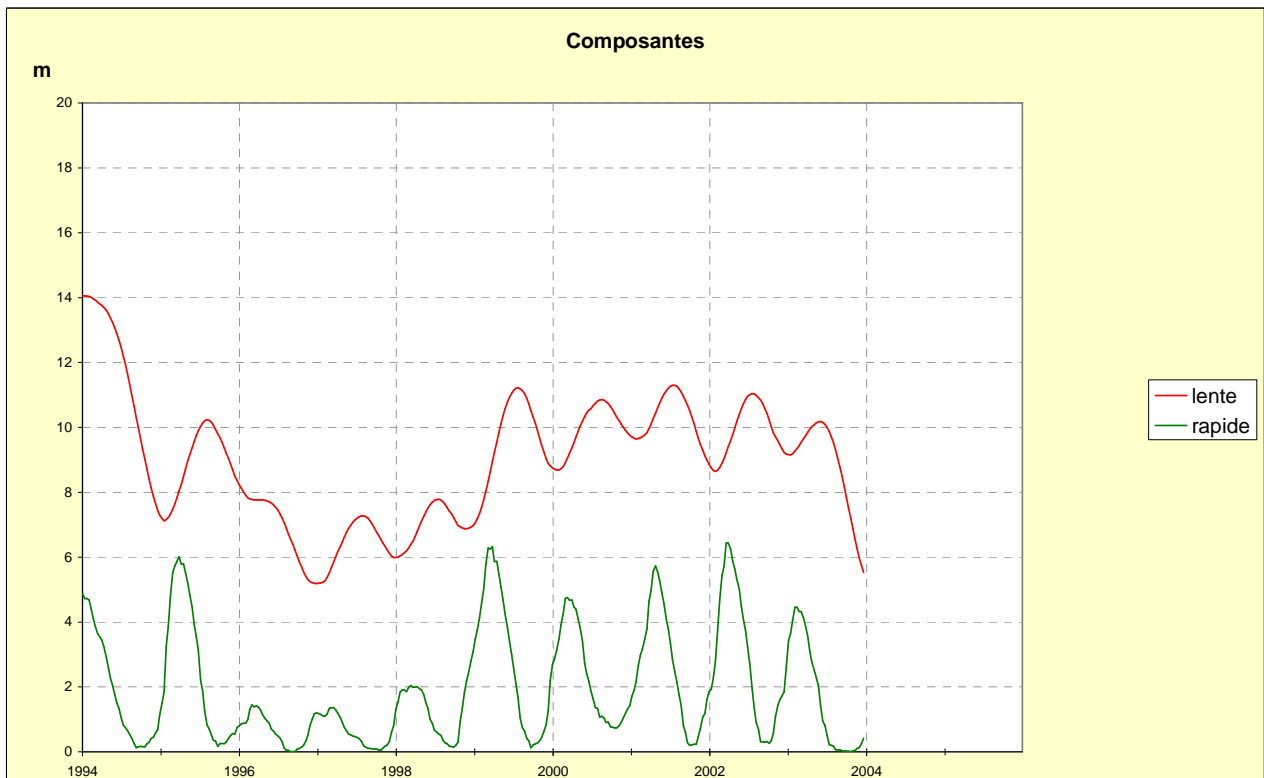
**Figure 30 : Comparaison du modèle aux observations piézométriques.**

La longueur maximale des réponses impulsionnelles a été ajustée à 160 jours pour la R.I. rapide et 820 jours pour la R.I. lente (Figure 31). La contribution moyenne de la pluie à la pluie efficace a été ajustée à 60 % par rapport à une valeur implicite fixée par le code à 50 %, qui prend arbitrairement 50 % de la pluie pour la pluie efficace (valeur constante au cours de l'année). Le choix d'une valeur de 60 % améliore la qualité de l'ajustement du modèle.

La part relative de la pluie efficace associée au transfert rapide, déterminée par la fonction  $\alpha(t)$  (cf. 3.3.1.3), apparaît significative à la fin de l'hiver ou au début du printemps, période où l'état de saturation des sols atteint son maximum (voir Figure 31 et Figure 32) et où, compte tenu du milieu karstique, des phénomènes sporadiques de vidange gravitaire peuvent intervenir, le milieu se comportant comme un milieu saturé.



**Figure 31 : Réponses impulsionnelles lente et rapide.**



**Figure 32 : Contribution des composantes lente et rapide. Les hauteurs d'eau sont exprimées par rapport à un niveau de référence (niveau de basses eaux) calculé par la fonction de transfert.**

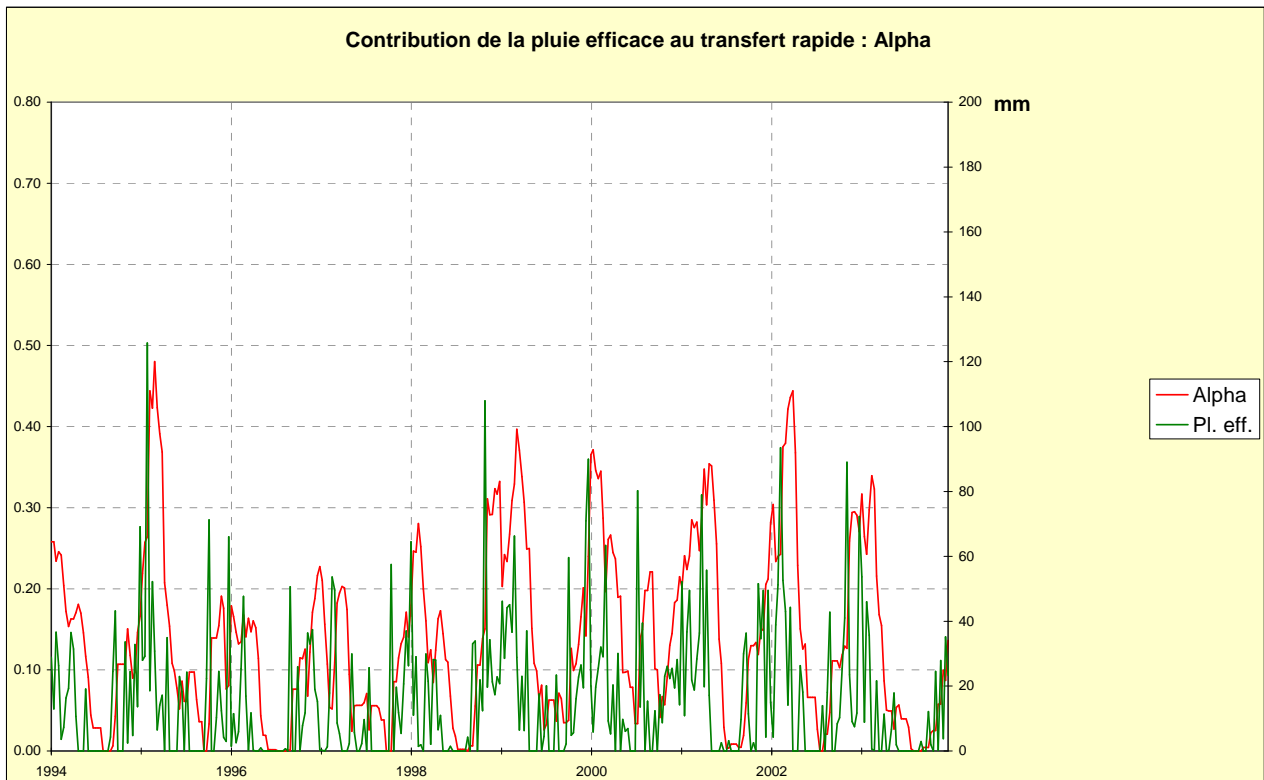


Figure 33 : Contribution de la pluie efficace au transfert rapide  $\alpha$ .

### 3.3.1.7 Modèle de transfert pluie-débit total

Le débit considéré ( $Q_{Total}$ ) pour calibrer la fonction de transfert est la somme des composantes suivantes (voir Figure 34) :

- débit journalier du cours d'eau ( $Q_{Hoyoux}$ ) mesuré à la station limnimétrique de Modave (données MET-SETHY) ;
- débit d'exhaure journalier ( $Q_{Galleries}$ ) mesuré à l'exutoire des galeries de Modave (données Vivaqua) ;
- éventuel rejet réalisé à la Roche aux Corbeaux ( $Q_{RAC}$ ) en cas de nécessité de maintien du débit d'étiage du Hoyoux ou de mise en décharge pour raisons techniques (données Vivaqua).

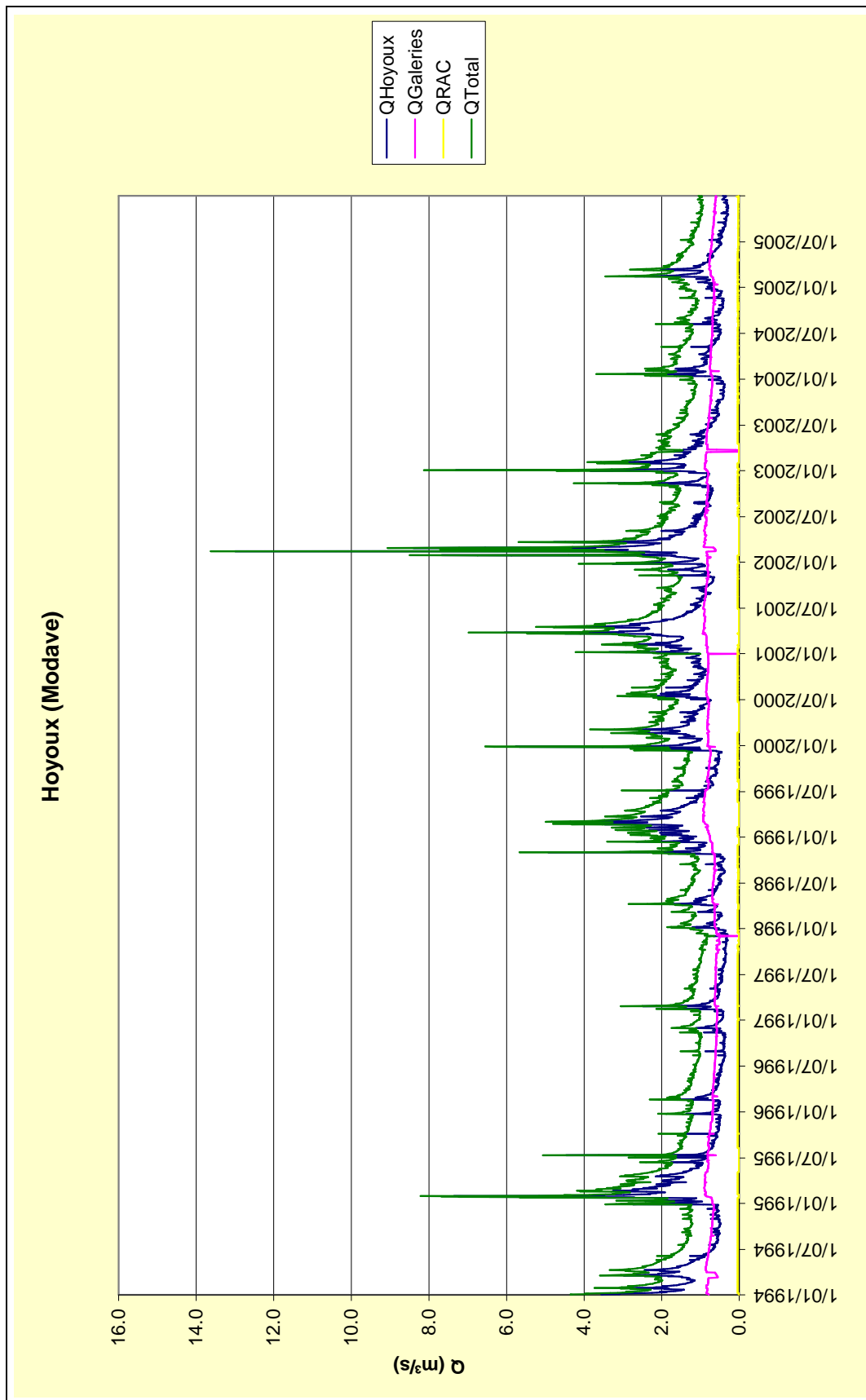
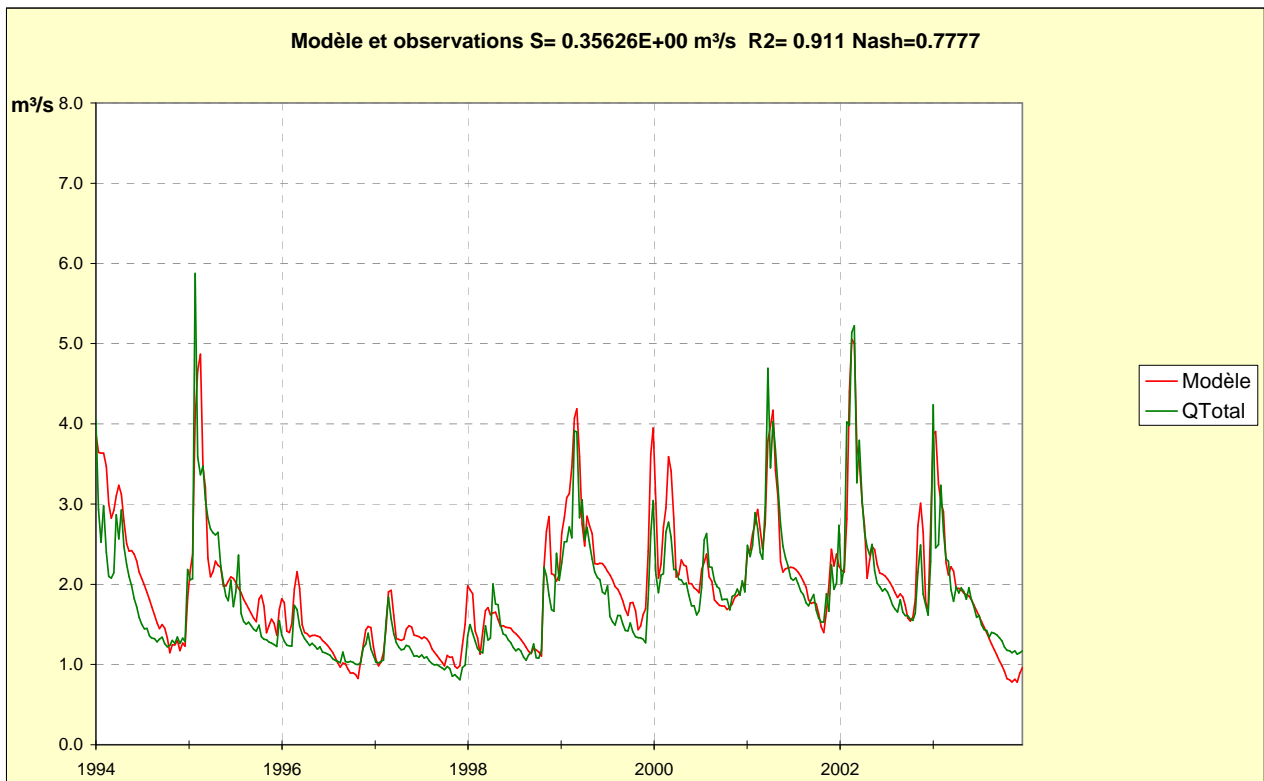


Figure 34 : Débit du Hoyoux ( $Q_{Hoyoux}$ ) mesuré à l'exutoire (station MET-SETHY de Modave), débit total mesuré à l'exutoire des galeries ( $Q_{Galeries}$ ), débit libéré à la Roche aux Corbeaux ( $Q_{RAC}$ ) en cas de nécessité de soutien du débit d'étiage du Hoyoux et débit total ( $Q_{Total}$ ) exprimant la somme de ces différentes composantes.

Le modèle considéré ici est un modèle pluie-débit. Aucun piézomètre n'a été pris en compte en donnée d'entrée. La Figure 35 montre un bon ajustement du modèle sur la série observée. Le débit modélisé apparaît légèrement surestimé en période d'étiage.

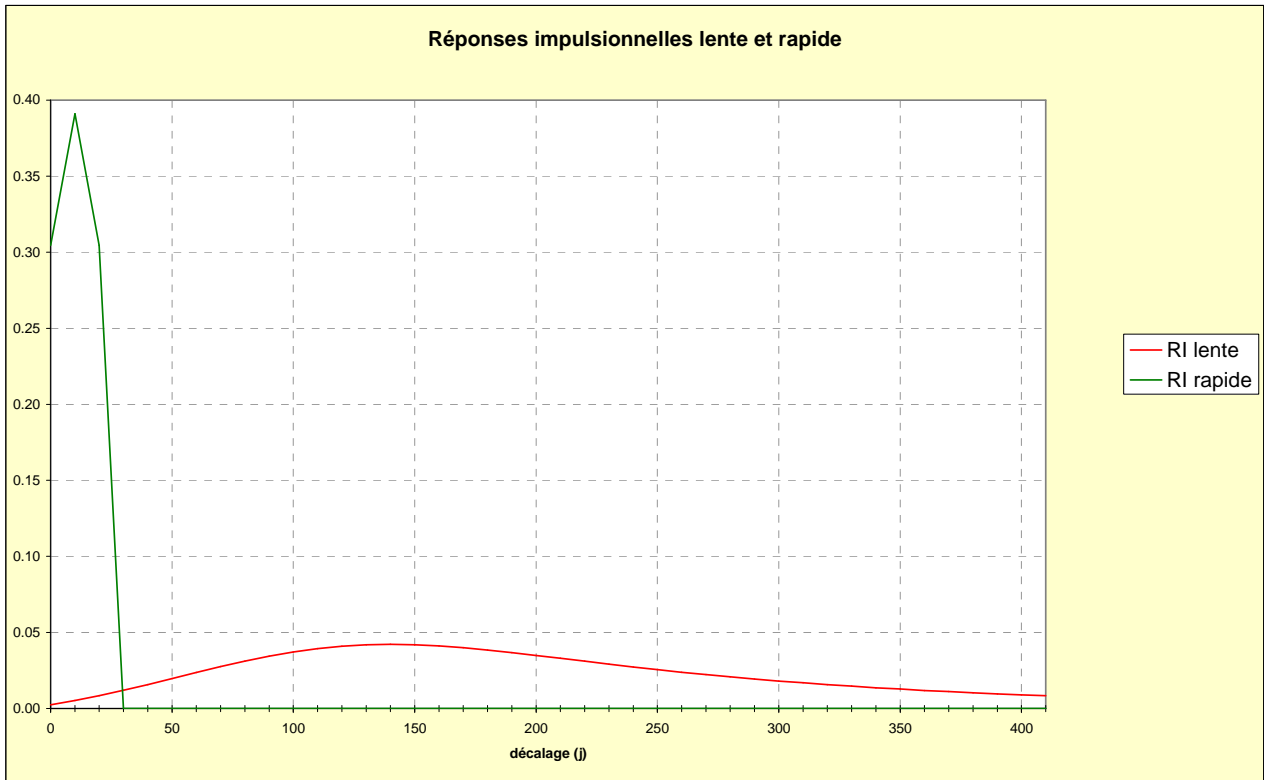


**Figure 35 : Comparaison des résultats du modèle à la série observée.**

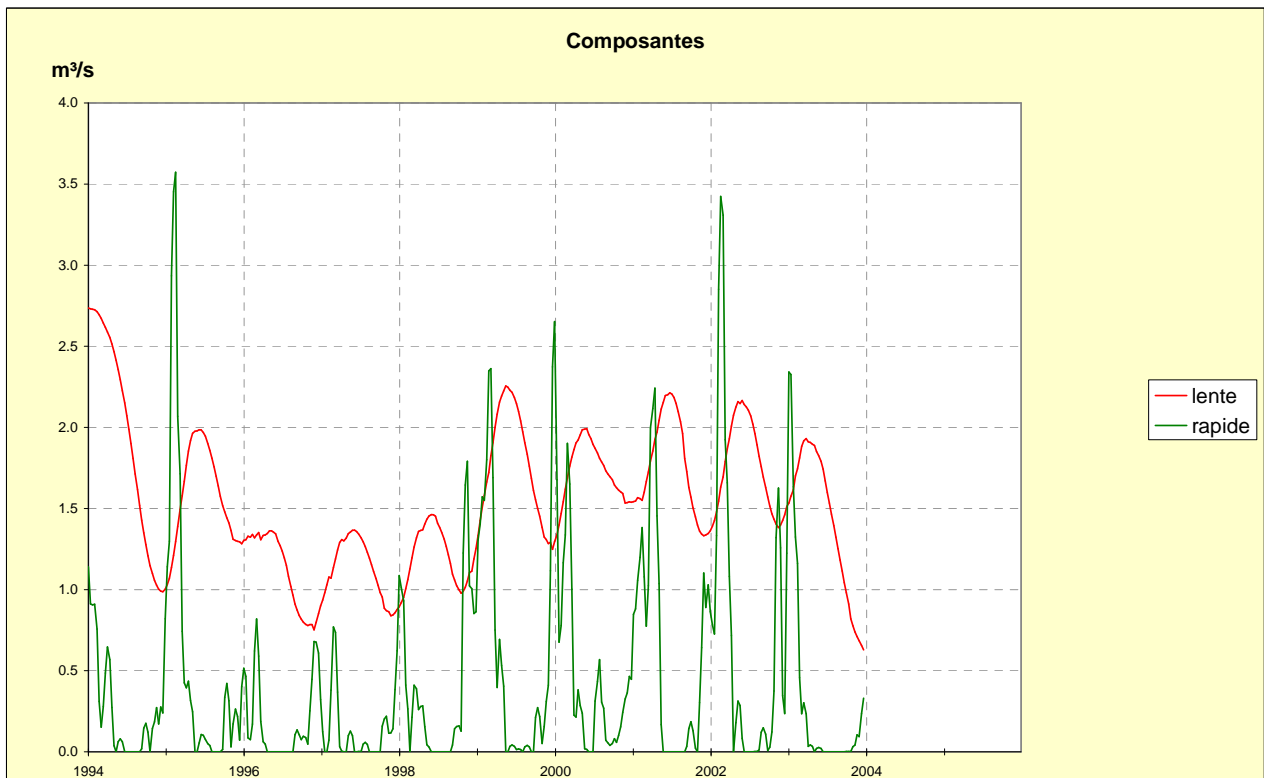
Les longueurs maximales des réponses impulsionnelles de la pluie efficace ont été ajustées respectivement à 410 jours pour la R.I. lente et 30 jours pour la R.I. rapide. La contribution moyenne de la pluie à la pluie efficace est de 50 %.

La composante rapide liée au ruissellement présente une série de pics à la fin de l'hiver ou au début du printemps, période où l'état de saturation des sols atteint son maximum (Figure 37) et où le ruissellement est dès lors prépondérant sur l'infiltration. En dehors de ces périodes, comme le montre la Figure 37 le débit est essentiellement soutenu par la composante lente qui réalimente les eaux souterraines.





**Figure 36 : Réponses impulsionnelles lente et rapide.**



**Figure 37 : Contribution des composantes lente et rapide au débit total du cours d'eau.**

### 3.3.1.8 Modèle de transfert pluie – débit du cours d'eau

Le modèle de transfert a été calibré sur le débit du ruisseau seul. Les longueurs maximales des réponses impulsionnelles de la pluie efficace ont été ajustées respectivement à 300 jours pour la R.I. lente et 20 jours pour la R.I. rapide. La contribution moyenne de la pluie à la pluie efficace a été maintenue à 50 %.

Les résultats présentent une plus grande variabilité et l'ajustement du modèle à la série observée apparaît moins bon que dans le modèle de transfert pluie-débit total. Ceci provient vraisemblablement du fait que le débit des galeries n'est pas considéré et que, dès lors, l'ensemble des paramètres susceptibles de décrire l'hydrosystème ne sont pas pris en compte.

L'observation de la Figure 38 montre que le débit d'étiage du cours d'eau apparaît fréquemment inférieur au débit d'exhaure des galeries, principalement lors de la période 1996-1998 caractérisée par une pluviométrie plus faible.

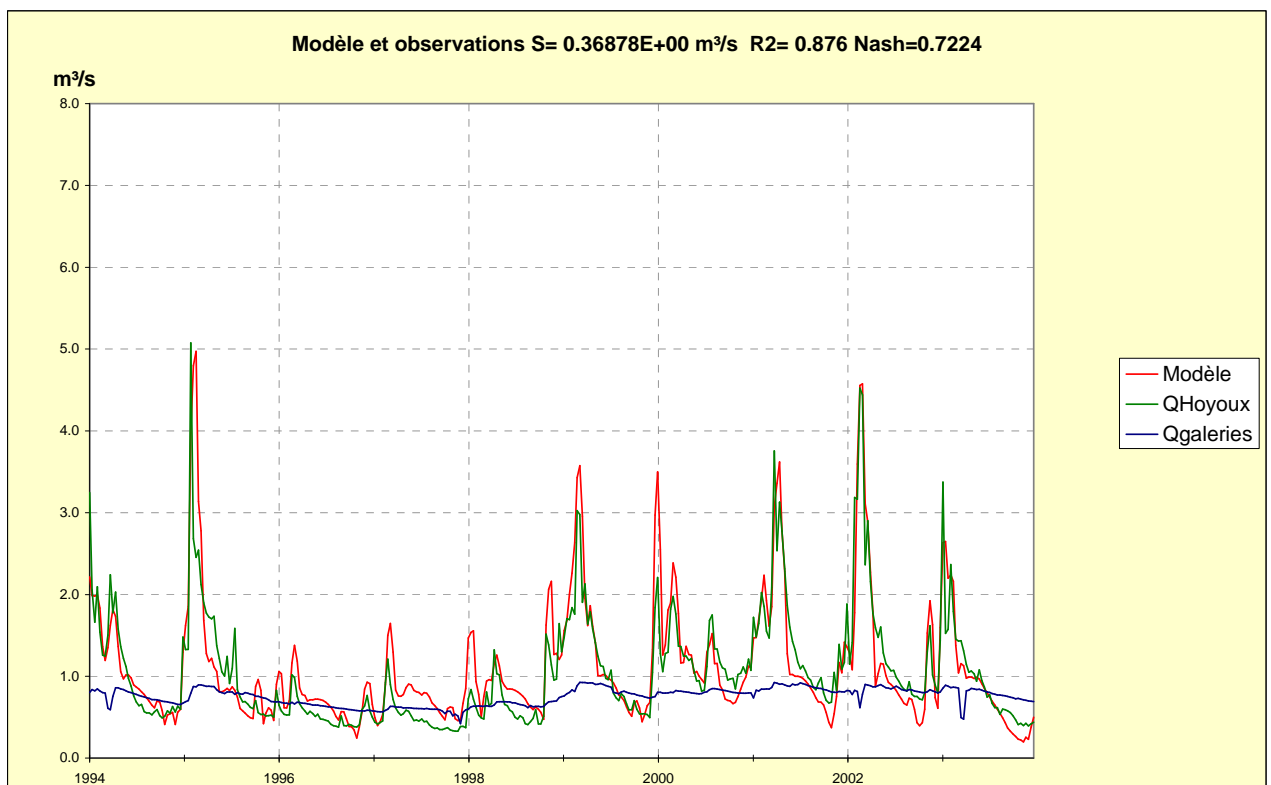
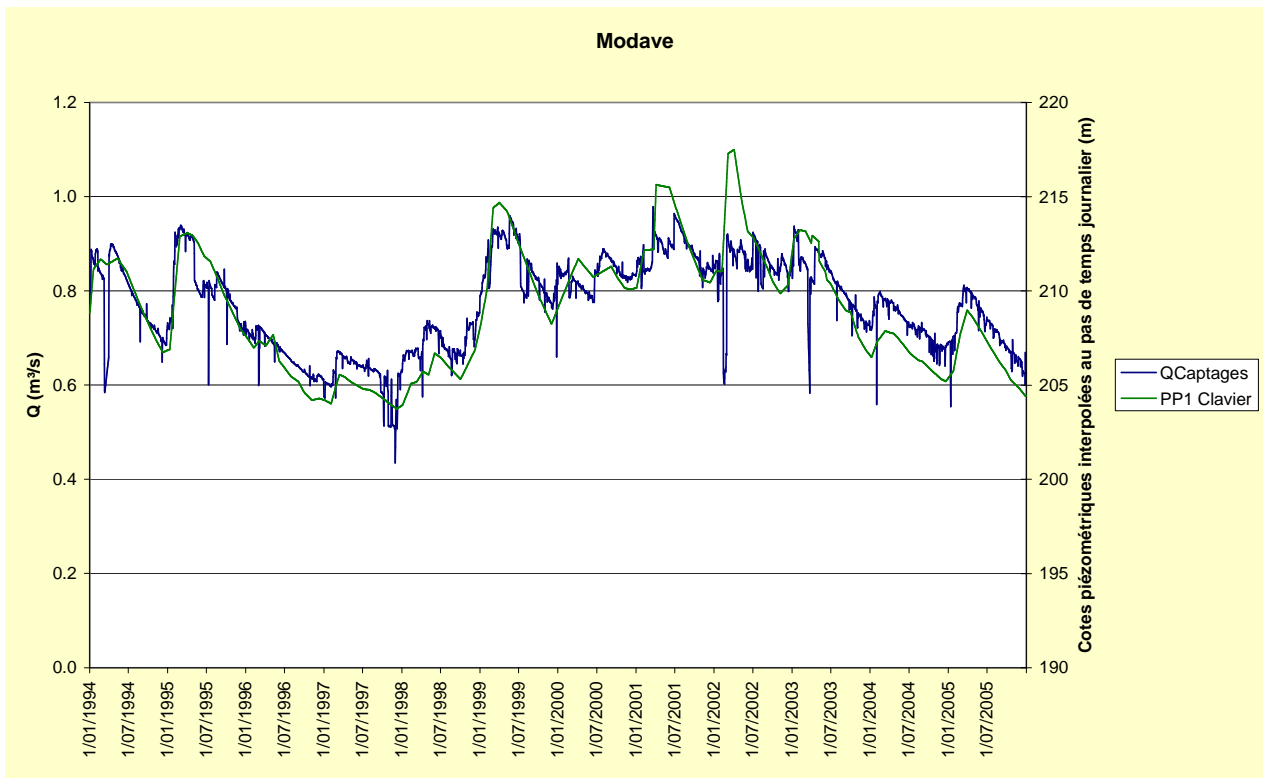


Figure 38 : Comparaison des résultats du modèle à la série observée.

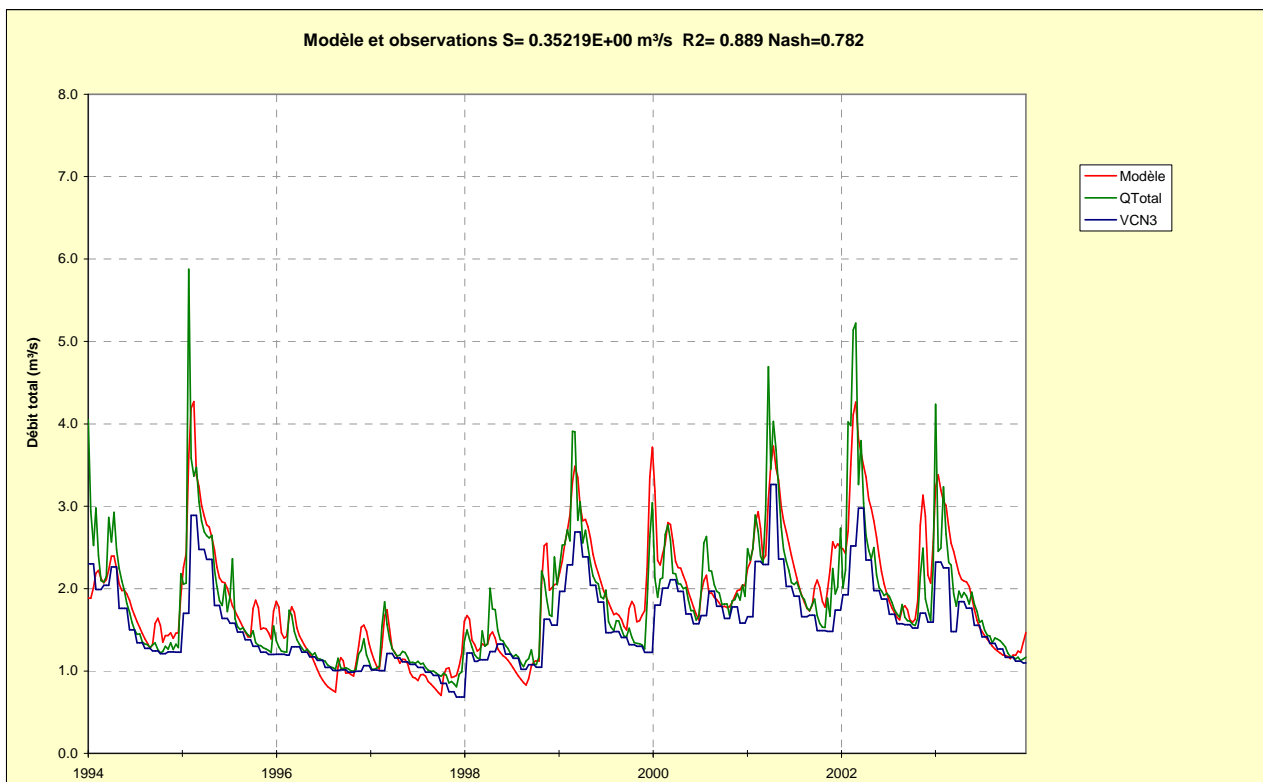
### 3.3.1.9 Modèle de transfert pluie – niveau piézométrique – débit total

Trois données d'entrée sont ici considérées : les précipitations enregistrées à Modave, l'ETP calculée à la station de Bierset et la chronique piézométrique d'un ouvrage, PP1 Clavier, suivi mensuellement par Vivaqua et situé 1300 mètres du Hoyoux, vers l'Est, à proximité d'une section où le cours d'eau est considéré du point de vues des interactions eaux de surface-eaux souterraines comme étant en pseudo-équilibre (voir délivrable D3.52). Comme le montre la Figure 39, il existe une forte corrélation entre les variations du débit mesuré à l'exutoire des galeries de Modave et les variations du niveau piézométrique mesuré dans le PP1 (données mensuelles interpolées au pas de temps journalier). Ce piézomètre est donc a priori un bon indicateur de l'état de la nappe et de son débit de base.



**Figure 39 : Comparaison de l'évolution du débit mesuré à l'exutoire des galeries de Modave à celle du niveau piézométrique de l'ouvrage PP1, interpolée à un pas de temps journalier.**

La comparaison des résultats du modèle et des mesures (Figure 40) montre une tendance à la sous-estimation du débit en période d'étiage et lors des pics de crue. L'ajustement du signal apparaît meilleur vers la fin de la chronique. A titre indicatif, le débit de base, estimé sur base de la méthode du VCN3 (débit minimal du cours d'eau enregistré pendant 3 jours consécutifs sur le mois considéré), est également représenté sur la figure.



**Figure 40 : Comparaison des résultats du modèle à la série observée. La courbe bleue représente l'évolution de l'indicateur de débit de base (VCN3).**

Les longueurs maximales des réponses impulsionnelles de la pluie efficace ont été ajustées respectivement à 180 jours et 30 jours pour les R.I. lente et rapide liées à la pluie efficace (Figure 41). La contribution moyenne de la pluie à la pluie efficace a été maintenue à 50 %. A première vue, la comparaison des Figure 35 et Figure 40 semble indiquer que la prise en compte de la chronique piézométrique disponible au PP1 n'est pas de nature à améliorer fortement l'ajustement et la précision de la fonction de transfert (les coefficients S, R2 et Nash sont sensiblement les mêmes). Si on y regarde de plus près, on peut néanmoins constater que l'ajustement obtenu dans le deuxième cas (en intégrant l'information piézométrique) est sensiblement meilleur en période d'étiage, notamment en fin de chronique, le modèle ayant moins tendance à sous-estimer le débit de base.

La comparaison des contributions des différentes composantes (Figure 42) indique que durant les périodes hivernales, les composantes rapide et lente de la pluie efficace dominent. Un décalage d'environ un mois est observé entre les pics de la composante rapide liée au ruissellement et les pics de la composante lente liée à la recharge de la nappe. Par contre, en période d'étiage, la composante piézométrique (représentée par le PP1) est dominante dans l'estimation du débit du cours d'eau. Ceci confirme qu'en période estivale, le niveau de la nappe et la composante

horizontale d'écoulement est le facteur déterminant pour le soutien du débit d'étiage et qu'il peut s'avérer utile d'incorporer dans la fonction de transfert des informations piézométriques. Ceci sera certainement d'autant plus vrai que la superficie et la complexité du bassin seront croissantes.

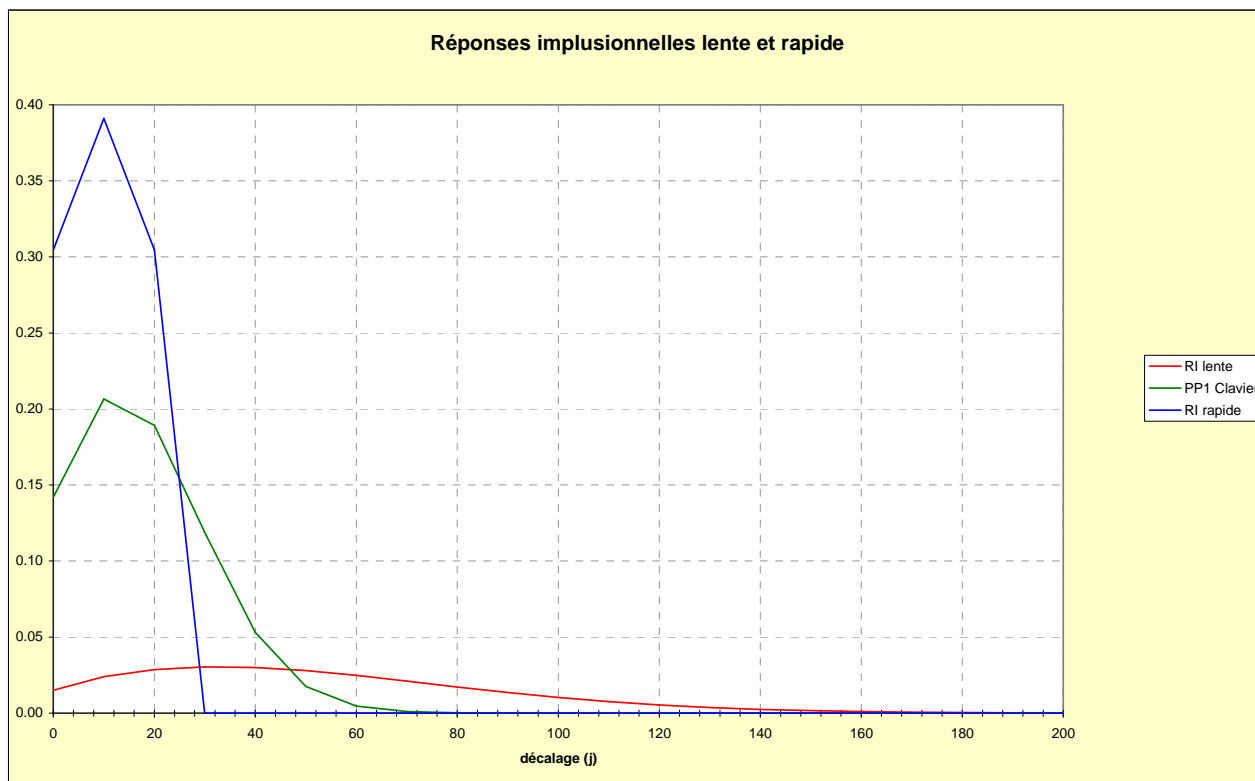
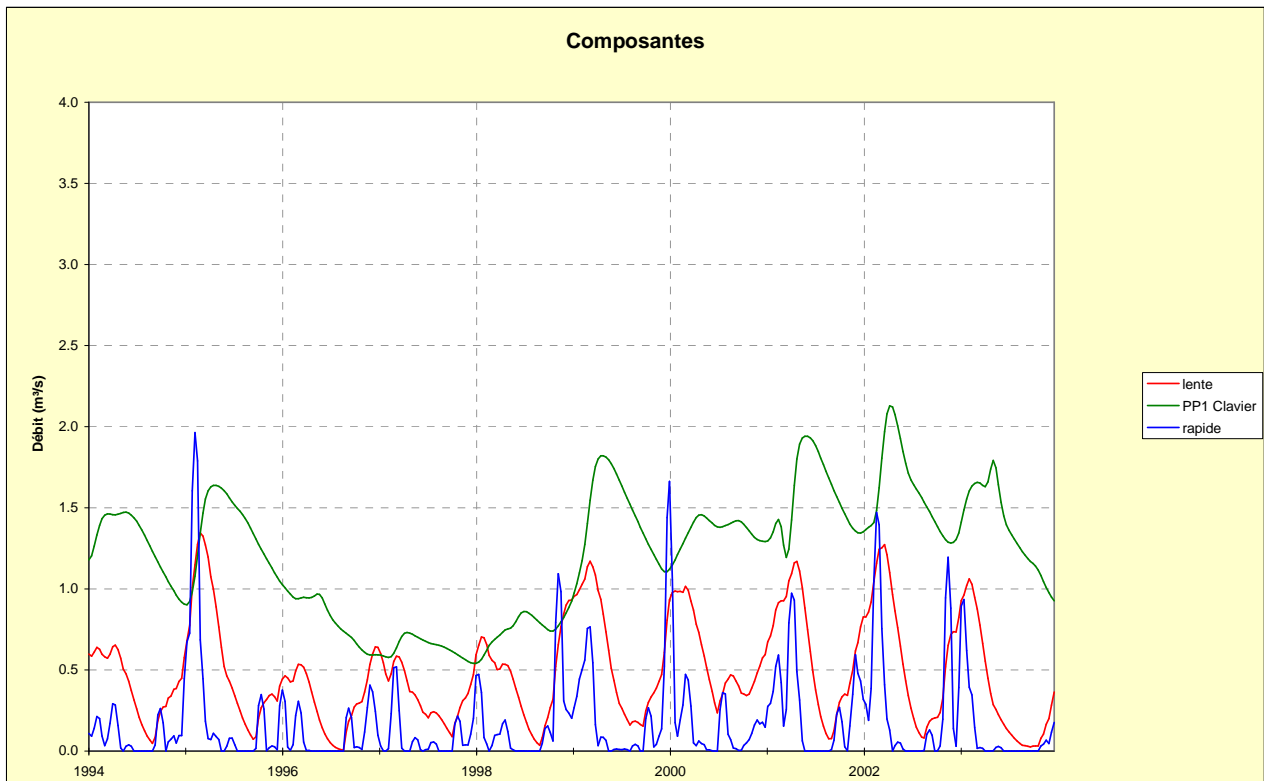


Figure 41 : Réponses impulsionnelles lente et rapide liées à la pluie efficace et à la nappe.



**Figure 42 : Contribution des composantes lente et rapide de la pluie efficace et de la nappe au débit total du cours d'eau.**

### 3.3.1.10 Evaluation du temps de réponse du système pour atteindre une valeur seuil de débit d'étiage ou de hauteur piézométrique

Une fois les modèles de transfert pluie-débit et pluie-niveau piézométrique calibrés, ceux-ci ont été testés en modifiant le paramètre pluie en entrée. Les chroniques de pluie ont été modifiées en simulant une absence de précipitation sur les 6 derniers mois de la série (juin à décembre 2003) afin de tester le temps de réponse du système pour atteindre une valeur repère de débit d'étiage ou de hauteur piézométrique. Une autre approche, plus locale, consiste dans le cas du modèle pluie-niveau piézométrique-débit à tester l'influence d'un pompage dans l'ouvrage PP1 et d'évaluer son impact sur le débit du cours d'eau. Cette approche reste à tester. L'interface ne permet à ce stade de modifier, une fois le modèle de transfert calibré, que les données de pluie et d'ETP.

#### **3.3.1.10.1 Modèle pluie – débit total**

Concernant le débit, une première valeur seuil a été fixée arbitrairement à 1 m<sup>3</sup>/s afin de tester le système. Le modèle calibré a été testé sur une plage de temps plus réduite du 1/1/2001 au 31/12/2004, l'apport des précipitations étant nul à partir du 1/6/2003. Les résultats montrent que le débit décroît de l'ordre de 0,0068 m<sup>3</sup>/s par jour (voir Figure 42 et Figure 43). Il faudrait au système environ 103 jours en l'absence de précipitations pour atteindre un tel débit d'étiage (Figure 44), ceci apparaît comme une estimation maximaliste dans la mesure où le modèle, comme le montre la Figure 35, tend à surestimer le débit de base.

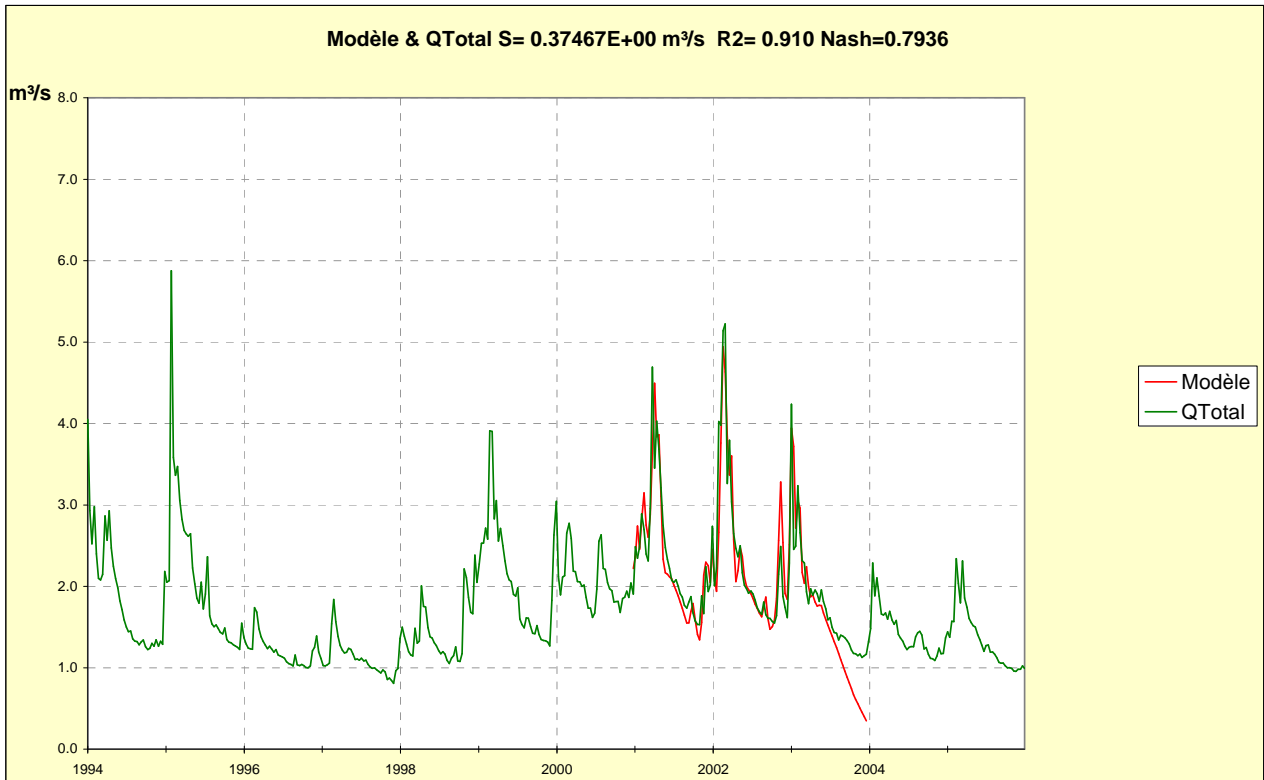


Figure 43 : Modélisation du débit total sur base d'une chronique de pluie modifiée (absence de précipitations de juin à décembre 2003).

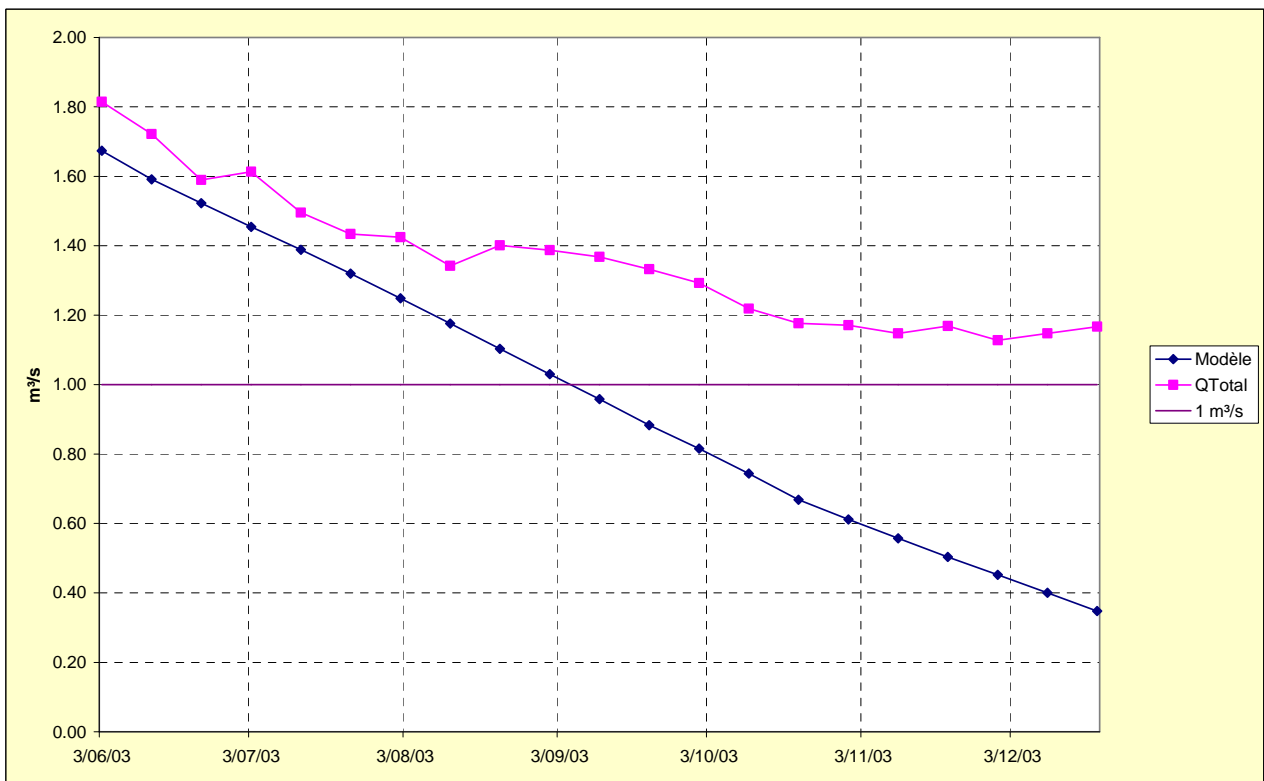
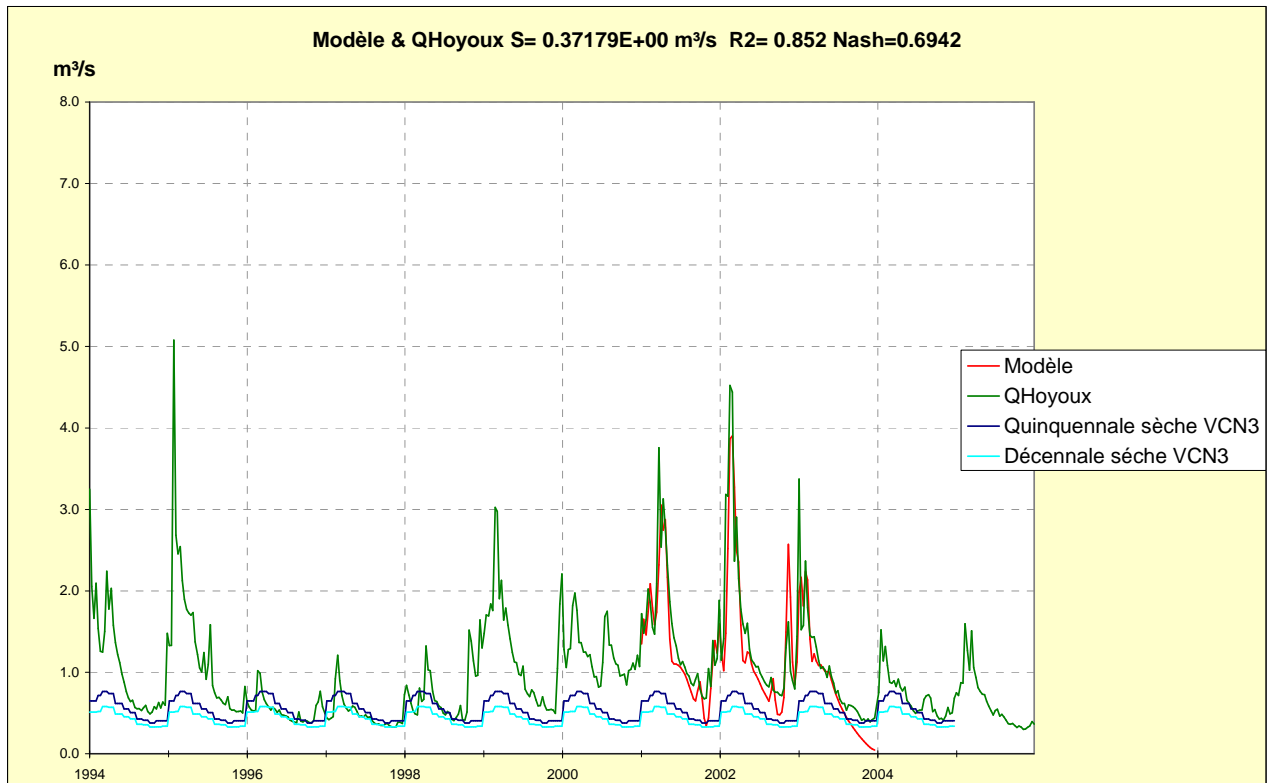


Figure 44 : Détail de la Erreur ! Source du renvoi introuvable. (période du 3/6/2003 au 31/12/2003), comparaison du débit total observé au débit calculé par le modèle en l'absence de précipitation.



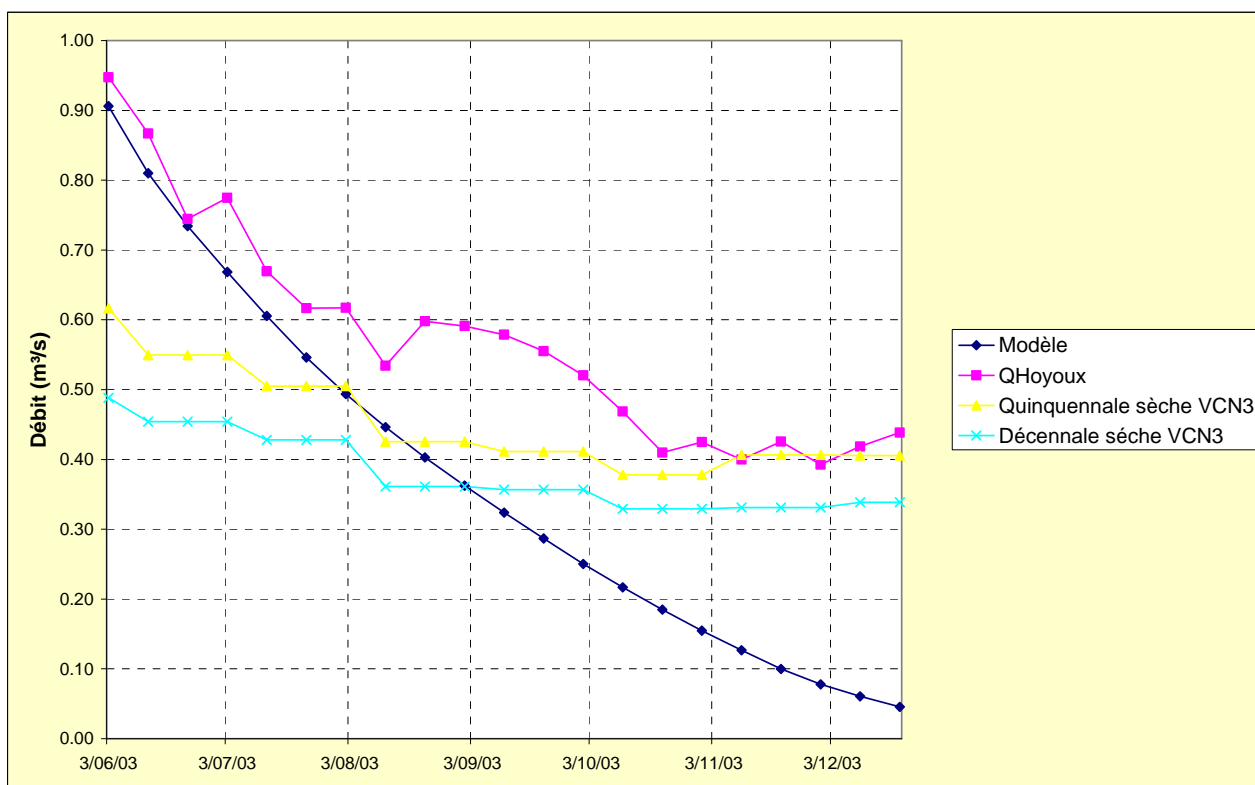
### 3.3.1.10.2 Modèle pluie-débit du cours d'eau

Le modèle est ici mis en comparaison avec les quinquennale et décennale sèches de l'indicateur débit de base VCN3, calculées sur l'ensemble de la chronique des mesures de débit réalisées à la station du MET-SETHY de Modave (1987-2005).



**Figure 45 : Modélisation du débit du cours d'eau sur base d'une chronique de pluie modifiée (absence de précipitations de juin à décembre 2003). Les quinquennales et décennales sèches du VCN3 calculé sur le débit du cours d'eau sont également représentées.**

La Figure 45 montre que le débit d'étiage du cours d'eau présente au cours de la période 1996-1998 des périodes de retour situées entre la quinquennale et la décennale sèche du VCN3, mettant en évidence une situation pluviométrique déficitaire. Le test du modèle de transfert, en l'absence de précipitations sur les 6 derniers mois de la chronique, indique (voir Figure 44 et Figure 45) une décroissance du débit de l'ordre de 0.004 m³/s par jour. Il faudrait au système deux mois pour atteindre un débit d'étiage de type « quinquennale sèche » et trois mois pour atteindre celui de type décennale sèche.

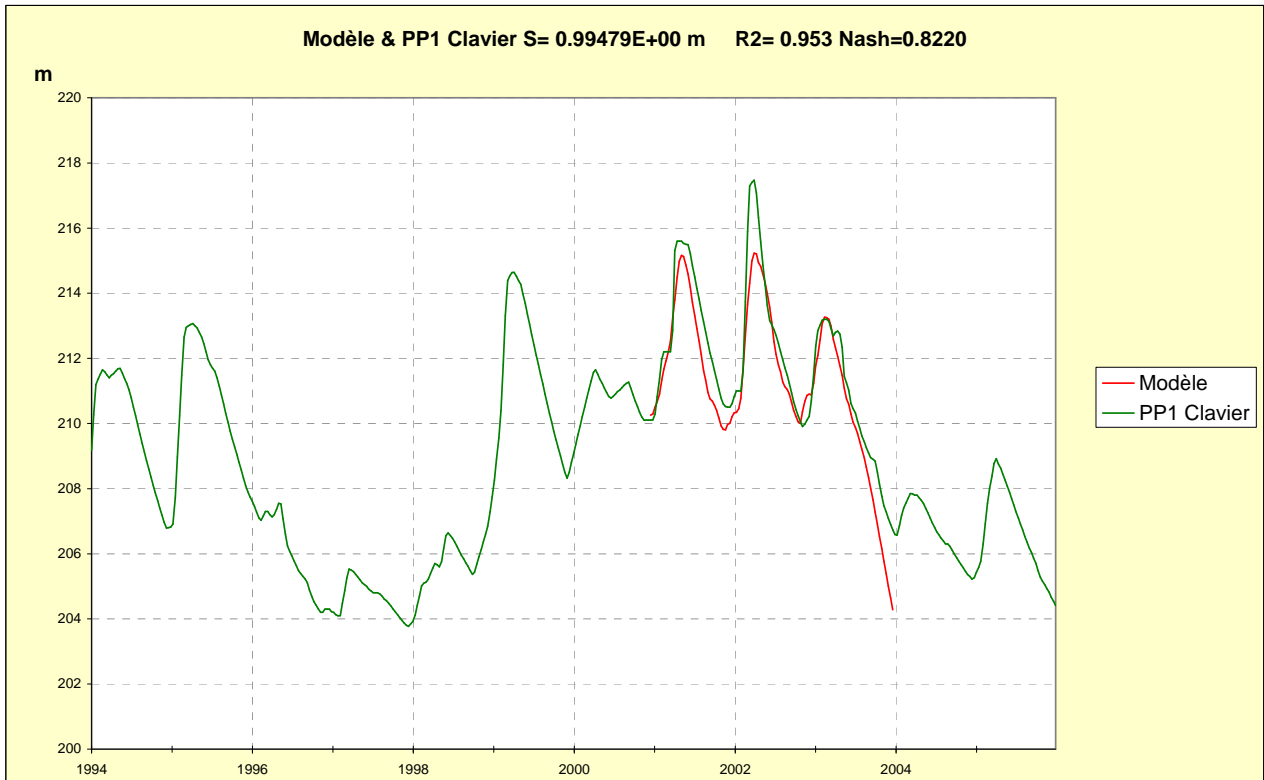


**Figure 46 : Détail de la Figure 45 (période du 3/6/2003 au 31/12/2003), comparaison du débit mesuré dans le cours d'eau au débit calculé par le modèle en l'absence de précipitation. Les quinquennales et décennales sèches du VCN3 calculé sur le débit du cours d'eau sont également représentées.**

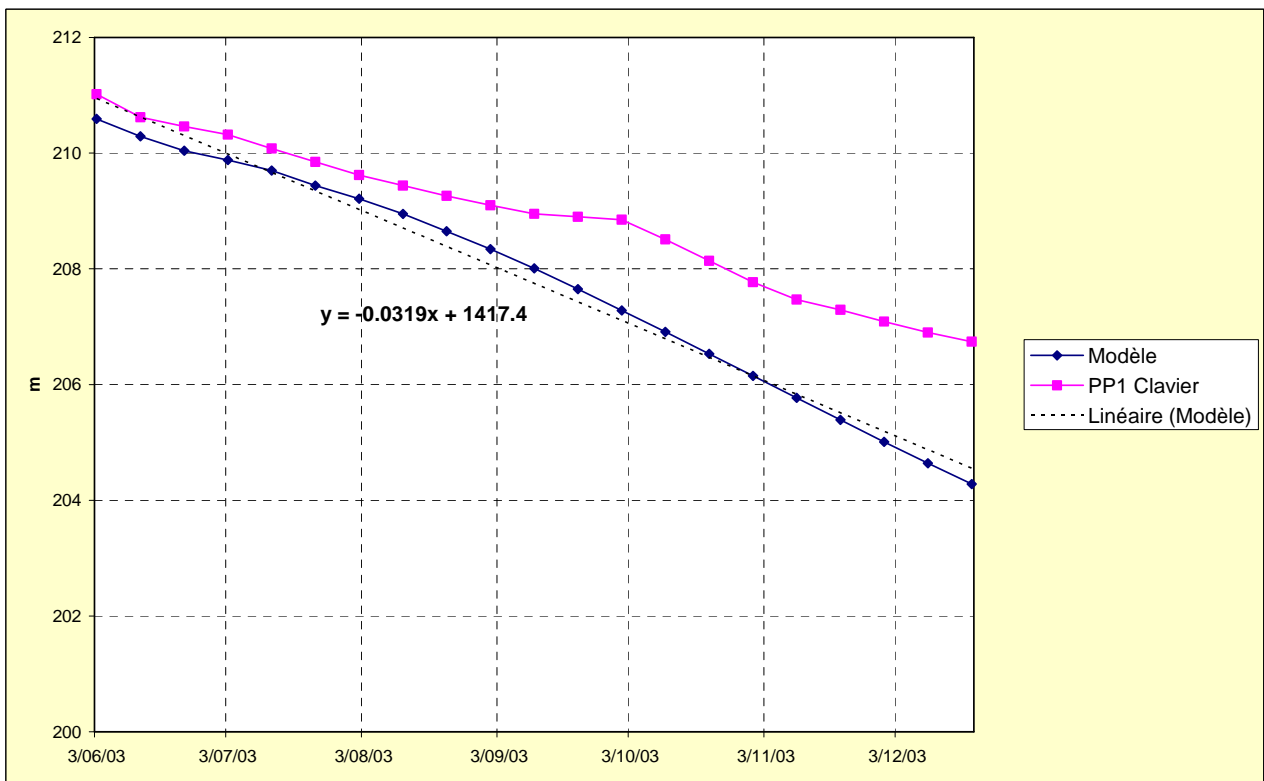
### 3.3.1.10.3 Modèle pluie-niveau piézométrique

Le modèle pluie-niveau piézométrique calibré a été testé sur la même période (1/1/2001 au 31/12/2004), l'apport des précipitations étant nul à partir du 1/6/2003. La valeur seuil utilisée a été fixée arbitrairement à la cote 204 m correspondant à la valeur minimale de cote piézométrique observée au cours de la chronique considérée (1994-2003). Une mesure de cote altimétrique du lit du Hoyoux a été réalisée par GPS différentiel aux Avins, en aval hydrogéologique du piézomètre. Elle indique une cote de 210.47 m. La Figure 46 montre que le niveau de la nappe se situe fréquemment sous le niveau du ruisseau, principalement lors des années 1996-1998 et 2003-2005 caractérisée par une pluviométrie plus faible.

Le test de la fonction de transfert en l'absence de précipitations montre une décroissance du niveau piézométrique de l'ordre de 3,19 cm par jour (voir Figure 47 et Figure 48). Il faudrait au système 7 mois en l'absence de précipitations pour atteindre un niveau piézométrique de 204 m.



**Figure 47 : Comparaison des résultats du modèle (absence de précipitations les 6 derniers mois de la chronique) aux observations.**



**Figure 48 : Détail de la Figure 47 (période du 3/6/2003 au 31/12/2003), comparaison de la hauteur piézométrique observée au niveau piézométrique calculé par le modèle en l'absence de précipitation.**

### 3.3.1.11 *Conclusions et perspectives*

Les tests effectués sur l'établissement et l'ajustement de fonctions de transfert, même si la méthode nécessite encore d'être affinée, confirment néanmoins la faisabilité de l'approche comme outil de développement d'un indicateur quantitatif à partir d'un nombre limité de mesures et observations.

A ce stade, l'usage de Tempo, choisi pour la facilité, nous a partiellement limité dans certains choix et tests, par exemple ceux relatifs à l'influence de rabattements sur le débit de sortie de l'hydrosystème. Le même type d'approche pourrait être développé avec d'autres outils statistiques dont l'usage s'avérerait plus adéquat.

Une fois la méthode affinée, l'utilisation de modèles de transfert pourrait être associée à la définition de réseau de surveillance quantitative de type « patrimoniale » (réserves – ressources) mais aussi de type « usages et fonctions » (hauteurs piézométriques critiques, débits réservés), notamment dans le cadre du suivi d'écosystèmes associés aux eaux souterraines. Cette approche fonction de transfert à l'avantage de fournir un indicateur dynamique, à la fois d'état et de tendance, qui peut être directement relié à l'évolution des forces directrices influençant la dynamique des eaux souterraines (pluie, température...). Les résultats peuvent être exploités de deux façons :

- En mode prédictif : connaissant les conditions hydrologiques, la fonction de transfert permet d'obtenir aisément une prédiction à moyen terme de l'évolution du système hydrogéologique (réserves, débit de base en un point donné du cours d'eau ou du niveau piézométrique dans un secteur critique) et donc d'aider le décideur à prendre dans les temps les mesures qui s'imposent pour minimiser les problèmes éventuels (restriction des prélèvements...).
- En mode comparatif : dans ce cas, les observations sont comparées aux prédictions obtenues au même moment avec la fonction de transfert et tout écart significatif (seuil à établir en fonction de la précision de la fonction de transfert et estimée sur base de sa capacité de prédiction des données historiques) met le gestionnaire de la ressource en eau souterraine en « alerte » par rapport à cette anomalie.

Les limites atteintes dans l'ajustement des modèles de transfert montrent que ceux-ci, outre le fait qu'ils sont définis pour un usage bien précis (assez univoque entrée – sortie), présentent une précision et une capacité d'extrapolation limitées. Ces modèles ne remplacent pas un modèle numérique qui bien que plus lourd à mettre en œuvre et à utiliser, offre une flexibilité et des

potentialités beaucoup plus grandes, notamment dans le cadre de l'évaluation des réserves en eaux souterraines.

## 4 Synthèse et conclusions

Ce dernier chapitre reprend les conclusions globales sur l'ensemble des indicateurs sélectionnés et appliqués dans le cadre du projet Synclin'EAU : les avantages et inconvénients de chaque méthode, le ou les critères d'applications, l'utilité de chaque indicateur, sa complexité, son applicabilité à d'autres contextes hydrogéologiques en région wallonne, et pour terminer les perspectives. Un tableau de synthèse compare ensuite les différentes techniques envisagées.

### 4.1 Méthode des « Moyennes Mensuelles »

Cette méthode permet d'avoir un regard rapide sur l'état de la nappe à un endroit précis (celui du piézomètre). En intégrant les résultats de l'ensemble des piézomètres du réseau, il est possible d'apprécier l'état de la masse d'eau. Les tendances peuvent également être identifiées.

Cet indicateur permet de définir deux niveaux : le premier niveau est celui à partir duquel une baisse significative est observée et à partir de laquelle il est intéressant de suivre en détail l'évolution de la nappe (ORANGE) ; le second niveau est un niveau critique (ROUGE) à partir duquel les niveaux sont les plus bas jamais enregistrés.

Les avantages de cette méthode sont nombreux. Elle est simple à utiliser, et est entièrement réalisable en Excel (une macro a été réalisée afin de réduire le temps de calcul). Ensuite, la méthode ne nécessite pas de chroniques piézométriques régulières et complètes. Elle permet une compréhension rapide et une visualisation aisée de l'état actuel du piézomètre. Enfin, elle intègre directement les mesures réalisées dans le cadre du projet et est facilement adaptable à d'autres applications (durées moyennes mensuelles variables : 10 ans, 15 ans, 20 ans ; choix de ou des année(s) comparée(s) : 2007, 2008,...). L'indicateur peut être affiné au fil des années de son utilisation.

Ses inconvénients majeurs résident dans le fait que la méthode est non quantitative et que l'indicateur est « ponctuel », i.e. non intégrateur de l'ensemble de la nappe. Ce dernier inconvénient est néanmoins diminué en appliquant la méthode sur un maximum de piézomètres de la nappe.

Dans le cas de la masse d'eau RWM011, où la piézométrie est continue dans la partie ouest, une perspective envisageable à court terme serait de pondérer chaque indicateur par une surface de l'aquifère considéré (par exemple en utilisant par exemple les polygones de « type » Thiessen autour de chaque piézomètre) permettant de quantifier empiriquement un indicateur global de la masse d'eau..Pour les autres masse d'eau, (piézométrie discontinue ou fortement variables), les indicateurs locaux ne peuvent être globalisé.

Quelques années de suivi piézométrique suffisent déjà à alimenter la méthode. Le réseau patrimonial mis en place prend ici toute son importance (mesures mensuelles, répartition des ouvrages uniforme, pas d'influence directe des captages d'eau,...).

#### 4.2 Méthode des « Périodes de retour – VCN3 »

L'indicateur VCN3 est une technique simple pour évaluer le débit journalier d'un cours d'eau en fonction des données historiques disponibles pour une station de jaugeage donnée. Les avantages de la méthode sont les suivants :

- elle ne nécessite « que » des données limnimétriques à une station de jaugeage ;
- elle permet de faire un suivi journalier du cours d'eau étudié ;
- la représentation graphique est simple et facile à interpréter ;
- les valeurs de  $Q_{VCN3}$  sont directement corrélables avec les variations piézométriques de la nappe en période d'étiage et permettent d'améliorer la prévision des apports en volumes d'eau.

Cependant, comme pour la plupart des indicateurs quantitatifs, l'indicateur VCN3 nécessite une longue chronique de données, nécessaires pour établir des seuils de vigilances fiables. De plus, pour les raisons citées précédemment, cet indicateur ne permet pas d'étudier l'évolution des réserves à l'échelle pluriannuelle. Il permet juste d'évaluer l'état « instantané » de la nappe grâce au débit du cours d'eau.

#### 4.3 Méthode « Tempo »

Les tests effectués sur l'établissement et l'ajustement de fonctions de transfert confirment la faisabilité de l'approche comme outil de développement d'un indicateur quantitatif à partir d'un nombre limité de mesures et observations. TEMPO est un outil statistique performant mais dont l'utilisation est en partie bridée par le fait qu'il tourne au sein d'une application graphique qui a été développée pour des applications très spécifiques en France. Si en théorie le choix des données d'entrée et de sortie d'une approche systémique reste entièrement à la discrétion de l'utilisateur, dans l'application graphique qui accompagne ce logiciel, ces choix sont limités. Le même type d'approche pourrait être développé avec d'autres outils statistiques dont l'usage s'avérerait plus adéquat.

Par comparaison avec les deux autres approches testées dans le cadre du projet Synclin'EAU, l'approche TEMPO est en apparence plus lourde à mettre en œuvre même si cela reste loin d'atteindre la complexité d'une modélisation numérique spatialement distribuée. L'avantage de l'approche TEMPO, dans sa philosophie, est qu'elle peut être adaptée aux données

disponibles et surtout qu'elle peut intégrer des données de types très divers (chroniques de pluie, températures, piézométrie, prélèvements...), généralement simples à mesurer et acquérir. Elle permet donc a priori de considérer l'influence de toute une série de facteurs moteurs du système hydrogéologique sur l'une ou l'autre grandeur physique (évolution des réserves en eau souterraine, niveau piézométrique, débit de base). Une fois la méthode affinée, l'utilisation de modèles de transfert pourrait être associée à la définition de réseau de surveillance quantitative de type « patrimoniale » (réserves – ressources) mais aussi de type « usages et fonctions » (hauteurs piézométriques critiques, débits réservés), notamment dans le cadre du suivi d'écosystèmes associés aux eaux souterraines.

Les limites atteintes dans l'ajustement des modèles de transfert montrent que ceux-ci présentent une précision et une capacité d'extrapolation limitées. Ces modèles ne remplacent pas un modélisation numérique qui, bien que plus lourde à mettre en œuvre et à utiliser, offre une flexibilité et des potentialités beaucoup plus grandes, notamment dans le cadre de l'évaluation des réserves en eaux souterraines. Un indicateur de type TEMPO ne doit donc être utiliser quand dans une approche de suivi de la ressource, dans le but de mettre en garde le gestionnaire et de lancer un processus de suivi plus élaboré quand des seuils critiques sont atteints.

#### 4.4 Comparatif des trois méthodes testées

Le Tableau 7 reprend en guise de conclusion une synthèse des caractéristiques, potentialités et spécificités des trois méthodes testées. De manière générale, les tests réalisés avec les trois méthodes se sont avérés concluants et ils ont montrés qu'elles étaient chacune, à leur manière, apte à servir d'indicateur quantitatif utile par l'information qu'elles synthétisent.



Critère	Méthode des Moyennes Mensuelles	Méthode VCN3	Méthode TEMPO
Données requises pour le développement de l'indicateur	Chroniques piézométriques sur minimum 10 années	Débit cours d'eau sur minimum 10 années	Chroniques pour les variables d'entrée considérées dans la fonction d'entrée (min. 10 ans)
Données requises pour le calcul de l'indicateur	Données piézométriques mensuelles	Débits journaliers	Mêmes données que pour l'ajustement, actualisées
Indicateur d'état ou d'évolution ?	État, avec idée de l'évolution	Les deux	Mode prédictif : évolution Mode comparatif : état
Indicateur global ou local ?	Local	Global	Global ou local, en fonction des données d'entrée et de sortie
Indicateur relatif ou quantitatif ?	Relatif	Quantitatif	Quantitatif
Représentation graphique	Graphique et code couleur	Chronique	Chronique
Outils requis	Tableur simple (ex : Excel) et macro	Tableur simple (ex : Excel) et macro	Logiciel Brgm TEMPO (mais développement Excel possible vu que repose sur des outils statistiques de « base »)

Potentiel de développement	Agrégation à l'échelle de la MESO	Séparation d'hydrogramme plus précise	Approche complètement adaptable au « cas par cas »
Applicabilité sur d'autres bassins	Possible moyennant la disponibilité de chroniques piézométriques	Possible moyennant la mise en place de stations limnimétriques au niveau de seuils hydrologiques	Possible moyennant disponibilité de chroniques des données d'entrée et de sortie

**Tableau 7. Comparatif synthétique des indicateurs quantitatifs testés dans le cadre de Synclin'EAU.**

Les trois méthodes sont également complémentaires. La méthode des Moyennes Mensuelles construit l'indicateur à partir de données piézométriques, la méthode VCN3 à partir d'hydrogrammes de rivières et l'approche TEMPO à partir d'une combinaison potentiellement laissée au libre choix du gestionnaire de la ressource en eau souterraine, généralement des chroniques de facteurs moteurs de l'hydrodynamique souterraine. La méthode des Moyennes Mensuelles est donc a priori plus « visuelle » et moins quantitative que les deux autres, la méthode TEMPO étant, de ce point de vue, celle qui valorise potentiellement au mieux les données et mesures disponibles.

Pour pouvoir être utilisées, les trois méthodes requièrent des données « d'entraînement » qui sont des chroniques historiques des mêmes variables que celles qui sont ensuite utilisées pour faire « tourner » l'outil. Ces données d'entraînement sont toutefois utilisées de manière différente par les trois approches proposées. La méthode des Moyennes Mensuelles utilise des chroniques piézométriques pour évaluer un état piézométrique de référence utilisé ensuite pour définir de manière relative l'état de la masse d'eau souterraine. La méthode VCN3 utilisent directement les chroniques de débits pour évaluer des périodes de retour de certains débits de référence et établir l'état, à un moment donné, du débit de base par rapport à ces états de référence. L'approche TEMPO utilise des chroniques pour ajuster la fonction de transfert avant de l'utiliser dans un mode prédictif ou comparatif (cf. § 3.3.1.11).

De manière générale, les trois méthodes proposées sont compatibles avec les principes de base qui avaient été retenus pour la définition des réseaux de surveillance quantitative au sein du projet Synclin'EAU (Cf. Délivrable D3.31, décembre 2006 et rappel en introduction de ce document). Le besoin de chroniques sur des durées assez grandes (grosso-modo 10 à 20 ans)

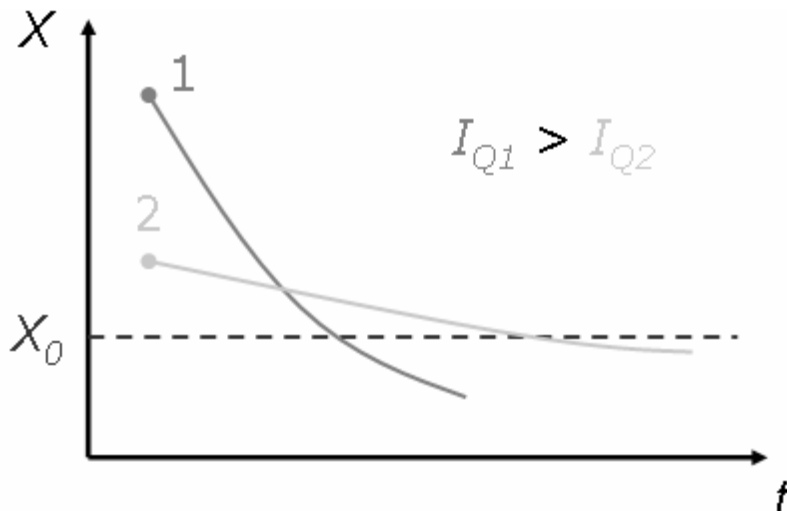
constitue cependant, mais temporairement, un frein ou une contrainte potentiels à l'application effective de ces indicateurs pour plusieurs masses d'eau souterraine en région wallonne, les réseaux de surveillance se mettant actuellement en place et les données historiques n'étant pas toujours suffisantes, voire adaptées pour faire tourner de tels indicateurs. Cependant, de l'inventaire des indicateurs réalisé (cf. Tableau 1 au §1), il ressort qu'il n'existe a priori pas vraiment d'indicateur qui puisse être appliqué sans avoir, au minimum, un état quantitatif de référence auquel se rapporter pour établir l'état et l'évolution de la masses d'eau souterraine, d'un point de vue quantitatif. Définir cet état de référence ne passe que par une caractérisation et des données historiques en suffisance.

#### 4.5 Perspective en matière d'établissement de réseaux et d'indicateurs quantitatifs

Sur base des réflexions et des tests menés dans le cadre du projet Synclin'EAU en liaison avec l'établissement d'indicateurs quantitatifs et de réseaux quantitatifs, à côté des outils proposés dans ce livrable, quelques pistes peuvent être esquissées, tant en ce qui concerne la réflexion relative à l'établissement et l'utilisation d'indicateurs quantitatifs que pour la mise en place des réseaux de surveillance quantitative.

##### 4.5.1 *Vers un indicateur quantitatif plus consistant*

Concernant l'indicateur, il ressort de toute la réflexion que celui-ci doit in fine refléter l'état des réserves en eau souterraine et de l'aptitude de ces eaux souterraines à subvenir à l'ensemble des besoins et usages qui lui sont liés, à l'échelle de la masse d'eau. Cet indicateur devrait également être à même de décrire l'évolution de cet état au cours du temps (va-t-on vers une situation qui s'améliore ou qui se dégrade). Cette évolution, selon qu'elle est rapide ou pas, peut en effet conduire plus ou moins rapidement à une état dégradé. A la Figure 49,  $X$  représente un indicateur général de l'état quantitatif de la masse d'eau souterraine (volume des réserves, niveau piézométrique...). La valeur  $X_0$  représente le seuil (par exemple volume d'eau souterraine non renouvelable) et les courbes 1 et 2 représentent l'évolution de l'indicateur. D'un point de vue « état strict » de la masse d'eau, la situation 1 (indicateur  $X=X_1$ ) est plus favorable que la situation 2 (indicateur  $X=X_2$ ) puisqu'elle s'écarte plus de la situation critique  $X=X_0$ . Pourtant, si l'évolution de la masse d'eau est conforme à la situation 1, elle sera plus vite dégradée que si elle est conforme à la situation  $X_2$  puisque le seuil  $X_0$  sera dans le premier cas plus vite atteint.



**Figure 49. Etat et évolution d'un indicateur quantitatif.**

Pour corriger cet effet « pernicieux », un indicateur de la forme suivante serait probablement plus appropriée :

$$I_{Quant} = \frac{\frac{\partial X}{\partial t}}{\frac{X}{X_0}}$$

La dérivée temporelle peut être une « simple » tendance temporelle piézométrique ou un paramètre plus élaboré tel que l'évolution des réserves en eau souterraine. Le terme  $X/X_0$  tient compte de l'écart de la masse d'eau par rapport à la situation critique. L'indicateur  $I_{Quant}$  sera donc d'autant plus grand (et plus critique) que la tendance (a priori à la baisse) est forte et que l'état de la masse d'eau souterraine est proche de l'état critique. A contrario, l'indicateur sera plus « souple » si la tendance n'est pas trop basse ou si l'on est loin de l'état critique.

Pour mettre en œuvre un tel indicateur, il serait nécessaire :

- de s'accorder sur une ou des variables d'état représentative à l'échelle de la masse d'eau souterraine (niveau piézométrique moyen ? Débit de base au niveau d'un seuil hydrogéologique ? Evolution des réserves ?) ;
- de s'accorder sur des valeurs de référence (seuils, pentes...) ;
- d'adapter les réseaux de surveillance en conséquence (sujet en partie abordé par la suite).

Un indicateur de ce type est en soit partiellement ou totalement compatible avec les approches testées dans le chapitre 2, ces outils pouvant dans une certaine mesure servir à calculer

l'indicateur « X » et son évolution, en particulier l'approche TEMPO qui permettrait de faire la liaison entre les « pressions » (pluie, prélèvement...) et l'état de l'eau souterraine (variable X).

#### 4.5.2 Mise en adéquation des réseaux quantitatifs

Pour appliquer les différents indicateurs testés dans ce livrable, il n'y a pas eu d'autre choix que de faire avec des données et des points de mesure existants (piézomètres et chroniques piézométriques associées, stations limnimétriques existantes...). Il en a résulté qu'aucun indicateur n'a vraiment pu être appliqué à l'échelle d'une masse d'eau (si ce n'est dans une certaine mesure la méthode des Moyennes Mensuelles sur la RWM021).

Sur base de cette analyse, quelques propositions concrètes peuvent être faites en matière d'adaptation/ aménagement des réseaux quantitatifs en vue d'une application des indicateurs décrits et testés au Chapitre 2 ou esquissé au § 3.5.1.

Au niveau des réseaux piézométriques, une bonne couverture des masses d'eau souterraine reste requise, en particulier dans des contextes géo-hydrogéologiques complexes comme celle de la RWM021 (alternances de synclinaux calcaires et d'anticlinaux schisto-gréseux) mais il serait probablement possible d'optimiser le nombre de points de surveillance requis en valorisant les possibilités d'approches de type VCN3 et TEMPO qui ont clairement établi des corrélations entre les variations piézométriques en certains points et le débit de base en d'autres points.

D'un point de vue suivi quantitatif des masses d'eau souterraines, les approches VCN3 et TEMPO ont bien démontré l'intérêt d'un suivi du débit des cours d'eau au niveau des seuils hydrogéologiques (sorties de bassins hydrogéologiques, voire sortie des masses d'eau souterraine) et de l'importance de pouvoir « extraire » le débit de base du débit total en vue de l'intégrer dans le calcul des indicateurs quantitatifs. Dans cette optique, deux recommandations peuvent être faites quant au placement de futures stations limnimétriques sur des cours d'eau :

- Privilégier des seuils hydrogéologiques (limites entre formations aquifères et aquitards) qui sont les seuls endroits où le débit de base est parfaitement représentatif et indicateur de l'état des réserves en eau souterraine dans le bassin hydrogéologique et de l'évolution de cet état au cours du temps.
- Même si les tests de comparaison de différentes techniques de séparation d'hydrogrammes ont fournis, tant sur base intuitive que sur celle des résultats des calculs réalisés, des indications intéressantes sur la fiabilité et la praticabilité des différents algorithmes testés (VCN3, ML, FRD et PART, cf. § 2.2.2.4), ces tests n'ont pas permis de vraiment trancher entre ces approches et encore moins d'établir

le degré de précision que l'on est en droit d'espérer de leur application pour l'évaluation du débit de base. Une alternative est en cours de test dans le cadre d'un suivi réalisé à la sortie du bassin du Hoyoux à Modave. Ce test consiste en un monitoring physico-chimique du Hoyoux, tant à l'étiage qu'en période de crue (suivi du niveau d'eau, de la conductivité électrique et prélèvement automatique d'échantillons pendant l'étiage et pendant les crues). Les premiers résultats indiquent que l'évolution de la conductivité électrique de l'eau est un excellent indicateur de la quantité relative d'eau souterraine s'écoulant dans le cours d'eau au droit du point de suivi (conductivité constante pendant l'étiage et baisse nette de conductivité pendant les crues). Une séparation d'hydrogramme beaucoup plus simple et précise pourrait donc être réalisée sur base du couplage d'un suivi de la conductivité électrique couplée au suivi limnimétrique. La recommandation qui en découle est d'installer, au niveau du réseau de stations limnimétriques, des sondes de monitoring de la conductivité électrique.

## 5 **Bibliographie**

BRODIE R.S., HOSTETLER S., SLATTER E., 2008. Comparison of daily percentiles of streamflow and rainfall to investigate stream-aquifer connectivity. *Journal of Hydrology* 349, 56–67

BRODIE R.S. and HOSTETLER S. A review of techniques for analysing Baseflow from stream hydrographs-Bureau of Rural Sciences Centre for Resource and Environmental Studies, Australian National University GPO Box 858 Canberra ACT, 2601 Australia [ross.s.brodie@brs.gov.au](mailto:ross.s.brodie@brs.gov.au)

Convention FPMs-UCL-RW, Mars 2006. Caractérisation des masses d'eau souterraine en région wallonne à partir des connaissances disponibles sur les aquifères.

ECKHARDT, K., 2005. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes* 19, 507–515.

FETTER, 1994. *Applied Hydrogeology*. Prentice-Hall, New jersey, 551pp.

GENIAUX Ghislain, novembre 2006. Indicateurs de développement durable : un panorama des principales références bibliographiques, cadres conceptuels et initiatives internationales. *Ecodeveloppement*, UR767, INRA, F84000 Avignon

HELSEL D.R., HIRSCH R.M., 2002. *Statistical Methods in Water Resources*. USGS, <http://water.usgs.gov/pubs/twri/twri4a3>.

HEPPNER Christopher S. and NIMMO John R., 2005. A Computer Program for Predicting Recharge with a Master Recession Curve-Scientific Investigations Report. 5172-U.S. Department of the Interior-U.S. Geological Survey

Institute of Hydrology, 1980. *Low Flow Studies report*. Wallingford, UK.

JUILLERET Jérôme, FENICIA Fabrizio, MATGEN Patrick, TAILLIEZ Cyrille, HOFFMANN Lucien et PFISTER Laurent. Soutien des débits d'étiage des cours d'eau du grand-duché du Luxembourg par l'aquifère du Grès du Luxembourg. Cellule de Recherche en Environnement et Biotechnologies, Centre de Recherche Public-Gabriel Lippmann, 41, rue du Brill, L-4422 Belvaux - [juillere@lippmann.lu](mailto:juillere@lippmann.lu)

LADOUCHE B., MARECHAL J-Ch., DORFLIGER N. et LACHASSAGNE P., 2006. Système karstique des Cent Fonds. Simulation de scénarios d'exploitation et de gestion de la ressource, Rapport final. BRGM/RP-54865-FR, 275 pp.

LAMB Robert and BEVEN Keith, 1997. Using interactive recession curve analysis to specify a general catchment storage model. Centre for research on environmental system , Lancater university. Hydrology and Earth system Science, 1, 101-103

MELARD Guy, 1990. Méthodes de prévision à court terme. Editions de l'université Libre de Bruxelles .Editions Ellipses

MUSY A., 2005. Cours d'hydrologie générale. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) <http://echo.epfl.ch/e-drologie/>

NATHAN, R. J., McMAHON, T. A., 1990, Evaluation of automated techniques for baseflow and recession analysis, *Water Resour. Res.* 26(7), 1465-1473.

NORMAND M., MARDHEL V., SCHOMBURGK S., 2003. Influence des eaux souterraines sur le débit des cours d'eau sur le bassin amont de la Seine. BRGM/RP-52582-FR, 150pp.

RIVERA-RAMÍREZ Héctor D., WARNER Glenn S., and SCATENA Frederick N., June 2002. Prediction of master recession of master recession curves and base flow recession in the luquillo mountains of Puerto Rico. American water resources association, Journal of the American water resources association Vol 38, n° 3

ROUXEL E., BICHOT F. et PINAULT J.L., 2007. Recherche d'indicateurs de gestion pour les eaux souterraines – Bassins vendéens au Nord du Marais Poitevin. Rapport final. BRGM/RP-5505-FR, 94 pp.

PINAULT J.L., 2007. Manuel utilisateur de Tempo : logiciel de traitement et de modélisation des séries temporelles en hydrogéologie et hydrogéochimie. BRGM/RP-55313-FR, 274 pp.

PINAULT J.L., 2007. Formation au logiciel Tempo. BRGM/DRH-Formation, 118 pp.

PINAULT J.L. and S. SCHOMBURGK, 2006. Inverse modeling for characterizing surface/groundwater exchanges, *Water Resour. Res.*, 42, 13 pp.

PINAULT J.L. et S. SCHOMBURGK, 2004. Méthodologie de définition des zones de remontée de nappe. Cartographie de l'aléa sur la plaine d'Alsace. BRGM/RP-53579-FR, 32 pp.

SMAKHTIN V.Y., 2001. Low flow hydrology : a review. *Journal of Hydrology* 240, 147–186.

SUJONO Joko, SHIKASHO Shiomi et HIRAMATSU Kazuaki , 2004. A comparison of techniques for hydrograph recession analysis -Hydrological. *Process.* 18, 403–413 (Laboratory of Drainage and Water Environment, Division of Regional Environment Science, Department of



Bioproduction Environmental Science, Kyushu University, Hakozaki 6-10-1, Higashi-ku, Fukuoka 812 -8581, Japan -Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). DOI: 10.1002/hyp.1247

VRBA Jaroslav and LIPPONEN Annukka, 2007. Groundwater Resources Sustainability Indicators. UNESCO, IAEA,IAH

#### Sites web

- Glossaire International d'Hydrologie :  
<http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/>
- Brodie R.S. & Hostetler S.:  
[http://www.connectedwater.gov.au/documents/IAH05\\_Baseflow.pdf](http://www.connectedwater.gov.au/documents/IAH05_Baseflow.pdf): A review of techniques for analysing baseflow from stream hydrographs
- PART : <http://water.usgs.gov/ogw/part/>
- BFI : [http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics\\_lab/twahl/bfi/bfidownload.html](http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics_lab/twahl/bfi/bfidownload.html).
- [http://www.champagne-ardenne.ecologie.gouv.fr/publications.pdf/Plaq\\_TdB\\_Nappe\\_craie5.pdf](http://www.champagne-ardenne.ecologie.gouv.fr/publications.pdf/Plaq_TdB_Nappe_craie5.pdf)
- [http://www.centre.ecologie.gouv.fr/Hydrologie/Situation\\_hydro.htm](http://www.centre.ecologie.gouv.fr/Hydrologie/Situation_hydro.htm)
- [http://www.aprona.net/pdf/piezometrie/Rapport\\_PIEZO\\_2004.pdf](http://www.aprona.net/pdf/piezometrie/Rapport_PIEZO_2004.pdf)
- <http://www.eaufrance.fr/docs/bsh/2007/11>
- [http://www.centre.ecologie.gouv.fr/Hydrogeologie/bulletin\\_de\\_situation\\_hydrogeol.htm](http://www.centre.ecologie.gouv.fr/Hydrogeologie/bulletin_de_situation_hydrogeol.htm)

## **Annexes**

### 1. Légende des formations hydrogéologique


















	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 SANTONIEN
	AQUIFERE DES TERRASSES FLUVIATILES
	AQUICLUDE A NIVEAUX AQUIFERES DU HOUILLER
	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

Figure 50 Unités hydrogéologiques