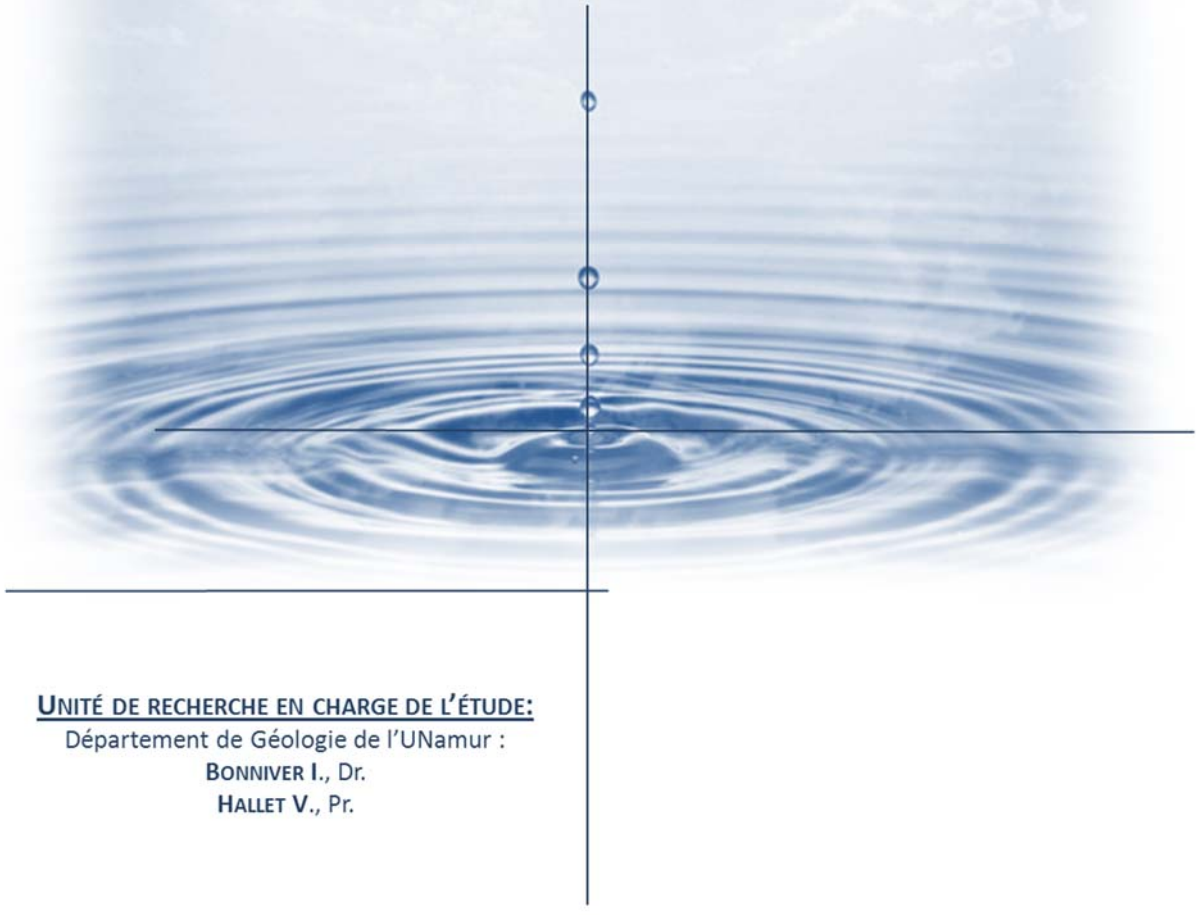
CONVENTION DE RECHERCHE D'INTÉRÊT GÉNÉRAL ET PLURIDISCIPLINAIRE RELATIVE À L'ÉVALUATION DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE DE LA WALLONIE

- RAPPORT FINAL -

01/06/2012 – 28/02/2013



UNITÉ DE RECHERCHE EN CHARGE DE L'ÉTUDE:

Département de Géologie de l'UNamur :

BONNIVER I., Dr.

HALLET V., Pr.

Unité de recherche en charge de l'étude:

Département de Géologie de l'UNamur :

BONNIVER I., Dr.

HALLET V., Pr.

Membres du comité de pilotage:

BRAHY V. (DGARNE - DEMNA – Direction de l'Etat Environnemental)

BUCCELLA I. (DGARNE - DEMNA – Direction de l'Etat Environnemental)

DEROUANE J. (DGARNE – DEE – Direction des Eaux Souterraines)

FERMIN N. (DGARNE – DEE – Direction des Eaux de Surface)

GAILLIEZ S. (DGARNE – DRCE – Direction des Cours d'Eau Non Navigables)

KEULEN C. (DGARNE – DEMNA – Direction de la Nature et de l'Eau)

LATOUR C. (DGARNE – DPEAI – Direction de la Politique Environnementale)

PAULUS F. (DGARNE – DEE – Direction des Eaux de Surface)

RENTIER C. (DGARNE – DEE – Direction des Eaux Souterraines)

Merci à :

L'ensemble des membres du comité de pilotage pour l'intérêt porté à cette étude lors des diverses réunions d'accompagnement ;

et à :

- Vincent BRAHY du SPW – DGO3 – Direction de l'Etat Environnemental ;
- Catherine LATOUR du SPW – DGO3 - Direction de la Politique Environnementale ;
- Sébastien GAILLEZ du SPW – DGO3 - Direction des Cours d'Eau Non Navigables
- Cristina POPESCU, Céline RENTIER et Philippe MEUS du SPW – DGO3 – Direction des Eaux Souterraines ;
- Quentin MATHY du SPW – DGO2 – SETHY ;
- Catherine SOHIER de l'Unité des Sciences et Technologies / Système Sol-Eau de Gembloux Agro-Bio Tech (Université de Liège) ;
- Julie BASTIEN de l'unité de Géologie Fondamentale et Appliquée du groupe Mines de l'Université de Mons (UMons) ;
- Philippe ORBAN du département d'Architecture, Géologie, Environnement & Constructions (ArGEnCo) du secteur GEO³ /Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement de l'Université de Liège ;
- Etienne EVERBECQ et Jean-François DELIÈGE de l'Aquapôle ;

pour le temps consacré à diverses discussions et le prêt des données et documents nécessaires à la réalisation de ce travail.

Acronymes et abréviations non détaillés dans le texte	
CIS	Common Implementation Strategy
DCE	Directive-Cadre sur l'Eau
DEMNA	Département du l'Etude du milieu naturel et agricole
DGARNE	Direction Générale Opérationnelle de l'Agriculture, des Ressources Naturelles et de l'Environnement
DGO2	Dircetion Générale Opérationelle 2 (Mobilité et Voies hydrauliques)
DGO3	Direction Générale Opérationelle 3
DHI	District Hydrographique International
EEA	European Environment Agency
FPMs	Faculté Polytechnique de Mons
MOHICAN	MOdèle Hydrologique Intégré pour le calcul des Crues et l'Amplitude des Niveaux d'Eau
MOHISE	MOdèle Hydrologique Intégré de Simulation du Cycle de l'Eau
MOIRA	MOdèle Intégré pour les Ressources Aquatiques
PIRENE	Programme Intégré de Recherche ENvironnement-Eau
QUALVADOS	QUALité de la zone VADOSe
SETHY	Service d'ETudes HYdrologiques
SPW	Service Public de Wallonie
TWG	Technical Working Group
WFD	Water Framework Directive
WS&D	Expert group on Water Scarcity and Droughts

Table des matières

I. Evaluation de la ressource en eau souterraine en Wallonie 13

I.1. Introduction générale 13

I.2. Définition des termes « réserve » et « ressource » en eau souterraine 13

I.3. Théorie simplifiée concernant la quantification de la réserve en eau souterraine, des ressources en eau souterraine annuellement renouvelables et des ressources en eau souterraine exploitables 16

I.3.1. Réserve en eau souterraine 16

I.3.2. Ressources en eau souterraine annuellement renouvelables 17

I.3.3. Ressources en eau souterraine exploitables 19

I.4. Valeur de référence actuelle de la ressource en eau souterraine exploitable en Wallonie 22

I.4.1. Introduction 22

I.4.2. Méthodologie 22

I.4.3. Résultats 25

I.4.4. Nécessité de mettre à jour la valeur de référence de la ressource en eau souterraine exploitable en Wallonie 31

I.5. Complexité de l'évaluation de la réserve et de la ressource en eau souterraine en Wallonie 32

I.6. Outils actuellement disponibles ou envisageables en vue d'une quantification de la ressource en eau souterraine en Wallonie 35

I.6.1. Introduction 35

I.6.2. Quantification de la ressource en eau souterraine annuellement renouvelable de la Wallonie – Modèle hydrologique sol et zone vadose EPIC-grid 36

I.6.2.1. Introduction 36

I.6.2.2. Description du modèle EPIC-grid 37

I.6.2.3. Estimation de la recharge globale des nappes d'eau souterraine de Wallonie pour la période 1995 - 2010 44

I.6.2.4. Comparaison entre la ressource annuellement renouvelable simulée par EPIC-grid et celle évaluée dans le cadre du projet Synclin'Eau (Brouyère, 2009) pour les masses d'eau souterraine RWM011, RWM012 et RWM021. 49

I.6.3. Quantification de la ressource en eau souterraine exploitable de la Wallonie 73

I.7. Conclusions générales 79

II. Rapportage des grandeurs intervenant dans le calcul des indicateurs quantitatifs globaux de la ressource en eau à l'échelle de la Wallonie. 85

II.1. Introduction 85

II.1.1. Rapportage « Inland Waters » Eurostat – OCDE 85

II.1.2. Rapportage « Water Exploitation Index + » 86

II.2. Indicateurs quantitatifs globaux de gestion de la ressource en eau actuellement utilisés : WEI et WEI^+ 90

II.2.1. WEI 90

II.2.2. WEI+ 97

II.3. Indicateurs quantitatifs de la ressource en eau souterraine 100

II.4. Conclusions générales 101

PREMIERE PARTIE :

Evaluation de la ressource en eau souterraine en Wallonie

I. EVALUATION DE LA RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE EN WALLONIE

I.1. INTRODUCTION GÉNÉRALE

La valeur de la ressource exploitable en eau souterraine en Wallonie servant actuellement de référence est de 550 millions de m³ (Derycke et Fried, 1982).

A la demande de la Cellule Etat de l'Environnement wallon (DEMNA - DGO3), une analyse de cette valeur a été réalisée dans le cadre de la présente étude afin de déterminer s'il était nécessaire de la réviser. Cela étant le cas, plusieurs pistes de révision de cette évaluation sont abordées dans ce travail.

Un des objectifs de la Directive-Cadre sur l'Eau 2000/60/CE (DCE) étant d'acquérir une vue concrète de l'état quantitatif de la ressource en eau souterraine à l'échelle de la masse d'eau, il était nécessaire de sélectionner des outils permettant cette réévaluation à l'échelle de la Wallonie tout en offrant la possibilité d'une évaluation à moindre échelle.

Qui plus est, vu l'urgence de cette révision, liée à la nécessité d'un rapportage annuel EUROSTAT - OCDE adéquat des grandeurs hydrologiques intervenant dans le cycle de l'eau en Wallonie, l'idéal était que ces outils soient déjà opérationnels pour l'ensemble de la Région. Notons que, dans un premier temps, ce sont des ordres de grandeur de ces paramètres qui sont souhaités et qu'un affinage des valeurs sera probablement nécessaire.

Le terme de ressource en eau souterraine est fréquemment utilisé, parfois même au sens de la notion de réserve ou inversement. Une clarification de ces termes est abordée dans ce rapport avant même de décrire les outils et méthodes retenus en vue d'une révision de la valeur de référence de la ressource en eau souterraine.

Cette révision doit passer par la réévaluation de deux grandeurs :

- La ressource en eau souterraine annuellement renouvelable correspondant à la recharge des nappes d'eau souterraine ;
- La ressource en eau souterraine exploitable correspondant à la ressource annuellement renouvelable diminuée des volumes d'eau réservés au maintien du bon état écologique du réseau superficiel.

Le présent rapport propose une analyse et une comparaison des outils jugés pertinents pour répondre aux objectifs de cette étude et dégage un premier ordre de grandeur des paramètres à évaluer.

I.2. DÉFINITION DES TERMES « RÉSERVE » ET « RESSOURCE » EN EAU SOUTERRAINE

La **réserve en eau souterraine** est définie comme la quantité ou le volume d'eau gravitaire contenu à une date donnée, ou stocké au cours d'une période moyenne annuelle, dans un système hydrologique. Elle résulte de la fonction capacitive du réservoir aquifère. Elle est exprimée en unités de volume (Castany, 1998). Bien que définie de manière très objective, son évaluation quantitative demeure problématique en raison de la complexité géologique des aquifères, de l'évolution temporelle de la recharge, des prélèvements qui y sont opérés et de la grande variabilité du niveau des nappes induits par ces derniers (DGARNE, 2012).

Plusieurs catégories de réserves en eau souterraine peuvent être définies selon la portion d'aquifère considérée (Castany, 1998) (Figure I.1 et Figure I.2). Les niveaux piézométriques retenus peuvent être des valeurs minimales et maximales moyennes ou des valeurs minimales et maximales extrêmes (Figure I.1):

- La réserve totale est la quantité d'eau gravitaire contenue dans le volume d'aquifère délimité, à la base, par un substratum peu perméable et, au sommet, soit par la surface piézométrique maximale moyenne ou extrême (H) dans le cas d'une nappe libre (Figure I.1), soit par le toit imperméable dans le cas d'une nappe captive (Figure I.2) ;
- La réserve régulatrice correspond au volume d'eau gravitaire contenu dans la zone de fluctuation de la surface piézométrique (Δh) d'une aquifère à nappe libre. Elle est calculée par rapport à une période définie. En climat tempéré, cette réserve est généralement renouvelée selon un cycle annuel. Pour les aquifères à nappe captive, la réserve régulatrice n'est pas définie;
- La réserve permanente est définie comme la part de la réserve totale qui n'est pas renouvelée. Pour l'aquifère à nappe libre, elle est limitée au sommet par la surface piézométrique minimale moyenne ou extrême. Elle est également nommée réserve géologique ou réserve fossile.

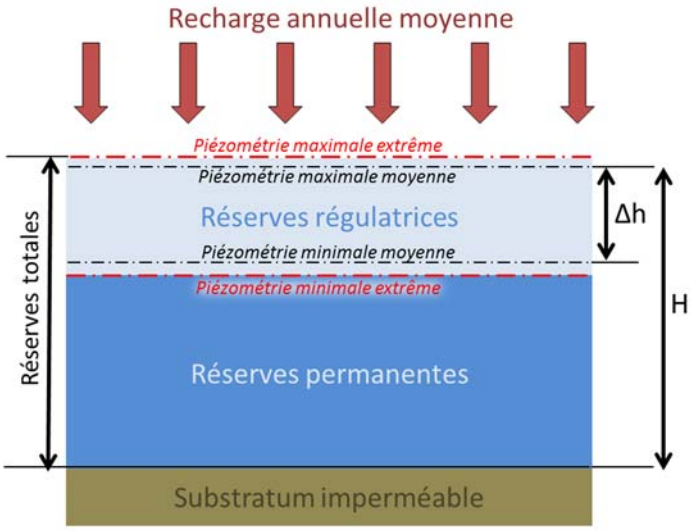


Figure I.1: Catégories de réserves de l'aquifère à nappe libre (d'après Castany, 1998).

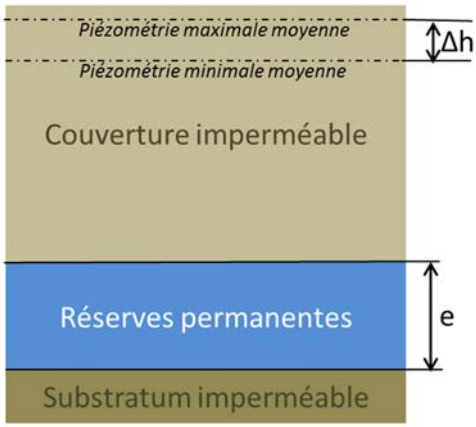


Figure I.2 : Catégories de réserves de l'aquifère à nappe captive (d'après Castany, 1998).

La **ressource en eau souterraine** est définie comme la quantité ou le volume d'eau souterraine pouvant être extrait d'un domaine circonscrit, pendant une période donnée, compte tenu de contraintes évolutives dans le temps et dans l'espace (Castany, 1998). Elle n'est donc pas immuable et nécessite d'être réactualisée périodiquement. Ces contraintes sont de type:

- physique et technique : structure hydrogéologique, paramètres hydrodynamiques et hydrochimiques, caractéristiques du complexe aquifère/ouvrage de captage, etc ;
- socio-économique : coûts de production admissibles, productivité des ouvrages, etc ;
- environnemental : répercussions inacceptables sur le milieu telles que la réduction excessive du débit d'étiage des cours d'eau, la détérioration de la qualité des eaux et des sols, le rabattement inadmissible de la surface piézométrique et ses conséquences sur l'agriculture ;
- politique : politique volontariste de l'eau et du développement.

La ressource est un flux et est exprimée en termes de débit moyen. L'évaluation de la ressource repose sur les comportements hydrodynamiques et hydrochimiques de l'aquifère. Selon les bassins, la ressource en eau souterraine peut être limitée par la quantité d'eau disponible dans l'aquifère, mais également par des critères de qualité ou encore par le rendement des ouvrages de pompage (Sophocleous, 2000). Elle doit satisfaire aux exigences d'une demande d'utilisation exprimée en quantité et en qualité (Castany, 1998).

Dans le cadre du projet Synclin'Eau (Brouyère et al., 2009), le terme de **ressources en eau souterraine annuellement renouvelables** est utilisé. Il est défini comme le flux moyen d'eau qui s'infiltre annuellement dans le sol pour atteindre la zone saturée des terrains. Cette définition n'intègre pas les diverses contraintes énoncées dans les définitions précitées. Les ressources en eau souterraine annuellement renouvelables correspondent à la **recharge** des nappes d'eau souterraine, soit la fraction des précipitations qui s'infiltre efficacement vers les nappes.

Elles sont alors distinguées des **ressources en eau souterraine exploitables**. Celles-ci constituent la fraction des ressources en eau souterraines annuellement renouvelables disponible pour l'exploitation, compte tenu des différentes contraintes hydrogéologiques, hydrologiques, écologiques, environnementales, technico-économiques, politiques et sociales (Brouyère et al., 2009). De par cette définition, les ressources exploitables correspondent à la ressource en eau souterraine telle que définie par Castany (1998) et utilisée dans le document de synthèse de l'Etat des nappes d'Eau souterraine de la Wallonie (DGARNE, 2012).

Notons que la moyenne, sur base pluriannuelle, de la ressource en eau souterraine exploitable correspond à la notion de **ressource disponible** mentionnée dans la DCE. Celle-ci est définie comme « *le taux moyen annuel à long terme de la recharge totale de la masse d'eau souterraine moins le taux annuel à long terme de l'écoulement requis pour atteindre les objectifs de qualité écologique des eaux de surface associées, afin d'éviter toute diminution significative de l'état écologique de ces eaux et d'éviter toute dégradation significative des écosystèmes terrestres associés* » (DCE, 2000 – Article 2 – Définition [27]).

Par souci d'homogénéité avec les études de caractérisation hydrogéologique récentes menées en Wallonie (projet Synclin'Eau – Brouyère et al., 2009) et afin de faciliter les comparaisons, les notions de ressources en eau souterraine annuellement renouvelables et de ressources en eau souterraine exploitables seront employés dans le présent rapport.

Les méthodes d'évaluation, selon un critère de durabilité, de la gestion des ressources en eau souterraine exploitables seront abordées dans la seconde partie de ce rapport.

I.3. THÉORIE SIMPLIFIÉE CONCERNANT LA QUANTIFICATION DE LA RÉSERVE EN EAU SOUTERRAINE, DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE ANNUELLEMENT RENOUVELABLES ET DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE EXPLOITABLES

I.3.1. Réserve en eau souterraine

La réserve en eau souterraine peut être évaluée par le traitement d'un couple de données :

- Le volume V de la tranche d'aquifère considérée ;
- La porosité efficace n_e des aquifères à nappe libre ou le coefficient d'emmagasinement S des aquifères à nappe captive.

Volume

Le volume d'aquifère équivaut à sa superficie A multipliée par l'épaisseur de la tranche d'aquifère considérée (H, Δh ou e) :

- Pour le calcul de la réserve totale d'un aquifère à nappe libre : $V_{Tot} = A * H$ (Figure I.1) ;
- Pour le calcul de la réserve totale ou permanente d'un aquifère à nappe captive : $V_{Tot} = A * e$ (Figure I.2) ;
- Pour le calcul de la réserve régulatrice d'un aquifère à nappe libre : $V_{Régul} = A * \Delta h$ (Figure I.1).

La définition du volume contenant la réserve régulatrice repose sur la mesure des extrêmes piézométriques. Sur le terrain, les cotes piézométriques sont obtenues de manière ponctuelle au niveau de puits ou de piézomètres. Selon l'intérêt hydrogéologique d'une région, la densité de mesures effectuées peut considérablement varier, mais leur nombre demeure, quoi qu'il en soit, limité.

L'interprétation de ces données permet l'établissement de cartes piézométriques. Pour une nappe régulière, de plaine alluviale par exemple, une surface moyenne et une amplitude de fluctuation piézométrique moyenne Δh peuvent être envisagées. Mais généralement, les déformations de la surface piézométrique ne sont pas uniformes et il est nécessaire de tenir compte de la complexité des réservoirs aquifères influençant cette piézométrie. Cela nécessite de considérer les hétérogénéités, les variations spatiales, les anisotropies induites par les caractéristiques géologiques du réservoir (Dassargues, 2000).

La modélisation numérique des réservoirs souterrains permet d'intégrer ces données, d'évaluer de façon logique et fiable les données manquantes et de fournir une réponse globale montrant toutes les tendances de la nappe en régime permanent ou transitoire (Dassargues, 2000).

Porosité efficace et coefficient d'emmagasinement

La porosité efficace, n_e, est la porosité disponible pour l'écoulement gravitaire d'un fluide. Elle est reliée à la notion d'emmagasinement de l'eau dans un matériau (Chapuis, 2007). Elle peut être calculée par essai de pompage et, dans certains cas extrêmement favorables (ou simplifiés), elle peut être évaluée par l'analyse de la fluctuation piézométrique pour une infiltration efficace donnée, pour un volume d'eau sorti à l'exutoire ou pour une variation des réserves d'eau souterraine calculée à partir des courbes de tarissement (Monjoie, 1981 in Dassargues, 2000).

Le coefficient d'emmagasinement S correspond au volume d'eau libéré par un volume unitaire du milieu saturé pour un rabattement piézométrique d'1 mètre et est exprimé en pourcents. Dans le cas d'une nappe libre, cette valeur est assimilable à la notion de porosité efficace. Le coefficient d'emmagasinement est également calculable par essai de pompage.

Les paramètres n_e et S constituent des informations ponctuelles qui caractérisent l'ouvrage sollicité par pompage et son environnement tout proche. Elles ne peuvent dès lors être extrapolées sur l'ensemble d'un aquifère. Des travaux de modélisation des réservoirs sont dès lors nécessaires pour quantifier ce genre de paramètres.

De manière simplifiée, le calcul de la réserve en eau souterraine peut être réalisé comme suit :

- Réserve totale d'un aquifère à nappe libre : $V_{Tot} * n_e$;
- Réserve totale d'un aquifère à nappe captive : $V_{Tot} * S$;
- Réserve régulatrice d'un aquifère à nappe libre : $V_{Régul} * n_e$.

I.3.2. Ressources en eau souterraine annuellement renouvelables

Les ressources en eau souterraine annuellement renouvelables correspondent à la **recharge** des nappes d'eau souterraines. La recharge est définie comme la fraction des précipitations qui s'infiltre efficacement vers les nappes.

Lors d'un évènement pluvieux, la lame d'eau précipitée sera tout d'abord partiellement consommée par des processus d'évaporation et d'évapotranspiration. Ces processus constituent l'approvisionnement de la vapeur atmosphérique à partir de l'humidité contenue dans les couches superficielles du sol. Cette eau atteint l'atmosphère soit par évaporation directe soit en participant à la transpiration des plantes (Sohier, 2011).

La quantification de la lame d'eau réellement évapotranspirée (ETR : évapotranspiration réelle) passe par la détermination de l'évapotranpiration potentielle (ETP). L'évapotranspiration potentielle (ETP) représente la quantité d'eau qui serait évaporée et transpirée si le stock en eau du sol était suffisant pour compenser les pertes maximales.

Il existe diverses méthodes pour évaluer l'ETP. La méthode de Thornthwaite (1948) fournit une première approximation raisonnable de l'ETP mensuelle et présente l'avantage de ne nécessiter qu'un seul paramètre : la température moyenne mensuelle.

D'autres méthodes plus complexes, comme la méthode de Penman (1948) ou de Penman-Montheith (Monteith, 1965), nécessitent un nombre important de données météorologiques comme le rayonnement net en surface, le flux de chaleur dans le sol, la vitesse du vent, la pression de vapeur d'eau à deux mètres, etc. Qui plus est, elles sont élaborées pour un gazon de référence. Une correction tenant compte de la nature de la végétation occupant le bassin versant doit donc être apportée (Granier, 1996; Granier et al., 1999).

La relation entre P, ETP et ETR est la suivante :

- Si les précipitations (P) suffisent à satisfaire l'évapotranspiration potentielle (ETP), l'évapotranspiration réelle (ETR) équivaut à l'ETP.
- Si les précipitations (P) ne satisfont pas l'ETP, l'ETR est inférieure à l'ETP et correspond à la somme du volume d'eau précipité et d'un volume d'eau extrait du sol par la végétation. La quantité d'eau disponible dans le sol est la RFU (réserve facilement utilisable) et dépend de la nature du terrain (granulométrie et porosité). Ce stock d'eau s'épuise au fur et à mesure que la période de sécheresse se prolonge.

Le volume d'eau de pluie (P) diminué du volume d'eau réellement évapotranspiré (ETR) est nommé l'eau utile (EU) (Figure I.3). Trois cas de figure sont possibles :

- P > ETR et RFU saturée : EU = P-ETR ;
- P > ETR et RFU désaturée : EU = P - ETR - recharge de la RFU ;
- P < ETR : EU = 0.

L'eau utile constitue le volume d'eau disponible pour les processus de ruissellement direct (RD), de ruissellement hypodermique lent (RHL) et de recharge (RECH) de la nappe d'eau souterraine (Figure I.3). Les écoulements hypodermiques sont définis comme des écoulements latéraux alimentant directement les rivières sans transiter via les nappes d'eau souterraine de base.

Ruissellement direct

Le ruissellement direct (RD), processus dominant lors des épisodes de crue des cours d'eau, regroupe les phénomènes de ruissellement de surface et d'écoulement hypodermique latéral rapide (temps de vidange de quelque jours – Sohier, 2011) se produisant au niveau de la zone racinaire (Sohier, 2011).

Ruissellement hypodermique lent

Le ruissellement hypodermique lent (RHL) (temps de vidange de quelques mois – Sohier, 2011), localisé au sein de la zone vadose entre la zone racinaire et la nappe d'eau souterraine (Sohier, 2011), est défini comme l'écoulement d'une nappe perchée dû à la pente du plancher de cette nappe (Lozet et Mathieu, 1997). La présence d'une couche relativement imperméable à faible profondeur favorise ce genre d'écoulement. Les caractéristiques du sol déterminent l'importance de l'écoulement hypodermique. Ces nappes perchées ont une capacité de vidange plus lente que le ruissellement direct mais plus rapide que l'écoulement des nappes d'eau souterraine de base. Cet écoulement tend à ralentir le cheminement de l'eau et à allonger la durée de l'hydrogramme (Musy, 2005). L'écoulement hypodermique lent est un écoulement latéral et les volumes d'eau concernés ne transitent pas via la nappe d'eau souterraine de base.

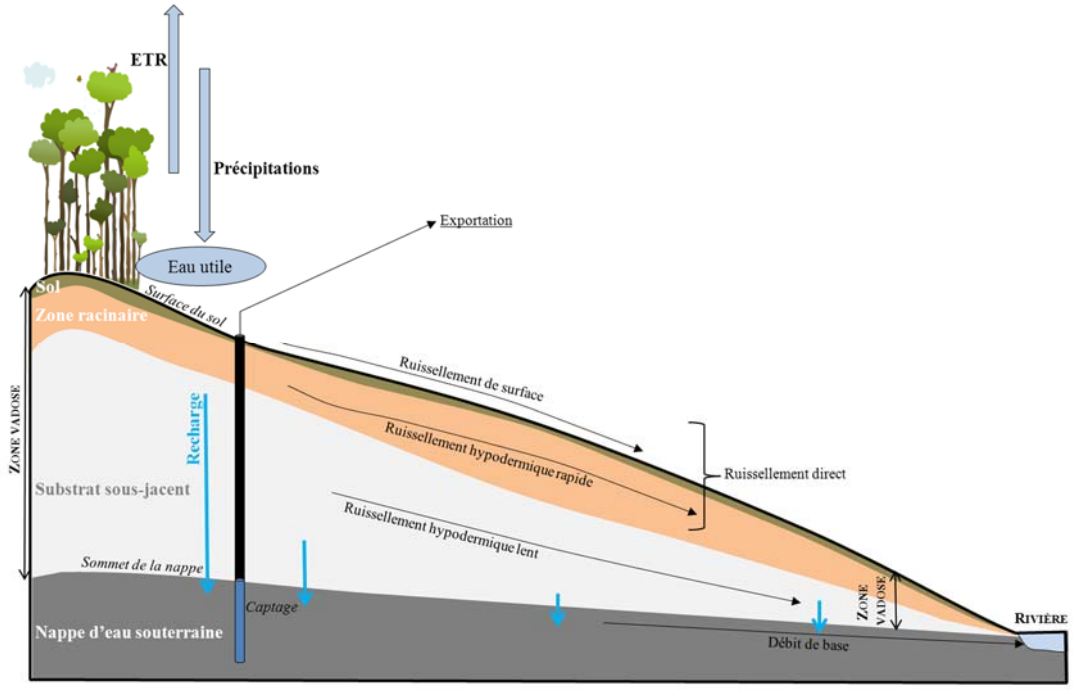


Figure I.3 : Distribution du volume d'eau utile au sein du sol.

Recharge

La recharge correspond au volume d'eau utile résiduel après soustraction des volumes d'eau de ruissellement direct et de ruissellement hypodermique lent. Ce volume d'eau percole verticalement au sein de la zone vadose afin d'alimenter la nappe d'eau souterraine de base. La quantification de ce paramètre permet l'évaluation des ressources en eau souterraine annuellement renouvelables et nécessite la définition d'un coefficient de partage du volume d'eau utile (EU) entre les trois « compartiments » décrits ci-dessus.

I.3.3. Ressources en eau souterraine exploitables

Les nappes d'eau souterraine contribuent au maintien du débit des rivières, principalement en période d'étiage. Dès lors, toute exploitation des eaux souterraines a nécessairement des répercussions sur le régime hydrologique des rivières.

« *De nombreuses études ont démontré les conséquences des modifications du régime hydrologique naturel des rivières (Poff et Zimmerman, 2010). Une réduction du débit modifie la largeur et la profondeur du chenal et altère les champs de vitesse d'écoulement au sein du système (Statzner et Higler, 1986 ; Armitage and Petts, 1992). Cela peut modifier la distribution et la disponibilité des habitats et engendrer des effets néfastes sur les populations d'invertébrés et de poissons (Wood et al., 1999). La modification du régime hydrologique naturel peut également engendrer l'introduction d'espèces allochtones au sein du milieu (Baltz et Moyel, 1993, Brown et Moyel, 1997, Brown et Ford, 2002).[…]* » (Sanchez Navarro et al., 2012).

C'est la raison pour laquelle la ressource exploitable d'une masse d'eau souterraine est définie, au regard de la Directive-Cadre sur l'Eau (2000/60/CE), comme étant la ressource en eau souterraine annuellement renouvelable (recharge) de cette masse d'eau diminuée du flux moyen annuel nécessaire pour (Wojciech, 2007 in Brouyère et al., 2009) :

- atteindre les objectifs de qualité écologique des eaux de surface associées ;
- éviter toute diminution significative du bon état écologique de ces eaux de surface ;
- éviter tout dommage significatif aux écosystèmes terrestres associés.

Les volumes prélevés au sein des nappes d'eau souterraine doivent donc être gérés de manière à réserver une fraction de la ressource en eau souterraine annuellement renouvelable pour l'alimentation des rivières et des zones humides et à assurer le maintien de leur qualité écologique et de leur état morphodynamique.

En réponse aux problèmes de dégradation des écosystèmes aquatiques liés à une surexploitation de l'eau, le concept de débit écologique (environmental flows) a été créé il y a une quarantaine d'années. Dans la littérature française, le terme de « débit réservé » est utilisé. A ce jour, il n'existe pas de définition unique des eflows. La combinaison des définitions de Arthington et Pusey (2003) et de Tharme (2003) en soulignent les aspects les plus fondamentaux et les plus pertinents (Sanchez Navarro et al., 2012) :

« *Le maintien ou la restauration partielle des caractéristiques importantes (intensité, fréquence, occurrence et durée, variabilité) d'un régime d'écoulement naturel afin de maintenir les caractéristiques spécifiques d'un écosystème constituent le fondement même du concept de eflows* ».

Sachant cela, la quantification de la ressource en eau souterraine exploitable doit inévitablement passer par l'évaluation des volumes d'eau destinés au maintien de ces eflows. Suite à la Directive Cadre sur l'Eau, des méthodes de détermination des débits réservés se développent actuellement dans de nombreux pays européens. L'objectif de ces méthodes peut être soit de déterminer le débit minimum en dessous duquel le cours d'eau ne peut descendre en période d'étiage, soit de calculer, tout au long de l'année, les débits qui peuvent être prélevés afin que le cours d'eau conserve, au moins partiellement, un comportement naturel (Hirtt, 2009).

Quatre grands types de méthodes sont utilisés (Hirtt, 2009 ; Sanchez Navarro et al., 2012) :

- Les méthodes hydrologiques : Ces méthodes, basées sur l'observation des relations entre les variables hydrologiques et l'intégrité des écosystèmes, considèrent que la totalité de la gamme des variations intra- et interannuelles des régimes hydrologiques naturels et les caractéristiques associées telles que la magnitude, la saisonnalité, la durée, la fréquence et le taux de variation sont critiques pour maintenir la biodiversité et l'intégrité des écosystèmes aquatiques. Le débit réservé estimé via ces méthodes peut être défini soit à partir du module interannuel ou des modules saisonniers du cours d'eau, soit à partir de l'analyse des débits classés, soit en se basant sur l'analyse statistique complète des caractéristiques du débit qui sont pertinentes d'un point de vue écologique comme, par exemple la méthode RVA (Range of Variability Approach);
- Les méthodes hydrauliques : Ces méthodes permettent la détermination des débits réservés dans les cours d'eau en tenant compte de leur morphologie. Le principe consiste soit à préserver une partie du lit mouillé, soit à aménager une hauteur minimale dans le lit du cours d'eau (Souchon et al., 1998 in Hirtt, 2009) ;
- Les méthodes des micro-habitats : Ces méthodes quantifient les impacts écologiques dus à un changement de régime hydrologique, en calculant des indices représentatifs de la surface d'habitat disponible par espèce en fonction du débit (Rebillard 2006 in Hirtt, 2009). Elles nécessitent de déterminer les composantes de la structure physique de l'habitat dans les écosystèmes de rivière. Trois paramètres morphodynamiques représentatifs de l'habitat sont utilisés : le débit, la nature du substrat et la hauteur d'eau dans le cours d'eau. D'autres paramètres peuvent également être considérés comme : la température de l'eau, la concentration en oxygène dissous, la présence de caches. Ces méthodes se basent sur une espèce de référence pour laquelle sont fixés des objectifs écologiques. Il est important que le choix soit aussi représentatif que possible de tous les types de mésohabitats du cours d'eau afin de ne pas privilégier certaines espèces et d'en négliger d'autres (Rebillard, 2006 in Hirtt, 2009). Des courbes de préférence d'habitat sont réalisées pour l'espèce sélectionnée. Elles permettent de prédire la répartition théorique des espèces en fonction des variables physiques. Le CEMAGREF (devenu IRSTEA) a développé un logiciel d'évaluation et de simulation de la capacité d'accueil des cours d'eau vis-à-vis des poissons nommé EVHA. Il a été conçu de manière à permettre une mise en œuvre rapide et aussi sûre que possible de la méthode des micro-habitats, à des fins de gestion ou d'étude d'impact (Ginot, 1998) ;

- Les méthodes holistiques : Ces méthodes tendent à appréhender les besoins des écosystèmes aquatiques de façon globale en ne privilégiant pas d'espèce cible particulière (Rebillard, 2006 in Hirtt, 2009). La méthode holistique la plus communément utilisée est la *Building Block Methodology* (BBM). Cette méthode, préconisant des débits mensuels, a été créée pour répondre à deux exigences : permettre une approche holistique des écosystèmes aquatiques et préconiser des modes de gestion de la ressource dans un contexte caractérisé par le manque de données biologiques et l'urgence de la demande (Rebillard 2006 in Hirtt, 2009). Elle est basée sur des avis d'experts de domaines très variés (gestionnaires de la ressource, ingénieurs, hydrologues, hydrauliciens, biologistes, etc.).

I.4. VALEUR DE RÉFÉRENCE ACTUELLE DE LA RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE EXPLOITABLE EN WALLONIE

I.4.1. Introduction

A la fin des années 70, un bilan de synthèse des ressources en eau souterraine de la Belgique a été réalisé, à la demande de la Commission des Communautés Européennes (Service de l'Environnement et de la Protection des Consommateurs), par le Service Géologique de Belgique.

Cette étude, réalisée en 4 ans (1978-1982), consistait en une synthèse de l'information existante. Les résultats ont été présentés sous la forme de quatre cartes à l'échelle 1/500.000 :

- Carte 1 : Inventaire des formations aquifères ;
- Carte 2 : Hydrogéologie ;
- Carte 3 : Exploitation ;
- Carte 4 : Estimation des disponibilités.

Celles-ci sont accompagnées d'un rapport (Derycke et Fried, 1982) destiné à préciser et à compléter l'information synthétisée sur les différentes cartes.

Au terme de cette étude, les auteurs proposent une évaluation de la disponibilité globale en eau souterraine pour l'ensemble de la Belgique (Derycke et Fried, 1982). Le détail des analyses permet de distinguer la disponibilité globale en eau souterraine pour la Flandre et la Wallonie.

Au vu des méthodes employées par les auteurs et étant donné le souci de réserver des volumes d'eau destinés au maintien de l'écoulement de base des rivières, la notion de disponibilité globale en eau souterraine de Derycke et Fried (1982) est à rapprocher de la notion de ressource en eau souterraine exploitable.

I.4.2. Méthodologie

Le bilan de synthèse des ressources en eau souterraine de la Belgique a été réalisé à partir du découpage du territoire belge en secteurs économiques. Ce découpage en 48 secteurs a été réalisé en 1974 par le Service National de l'Administration de l'Urbanisme (Ministère des Travaux Publics). Chaque secteur correspond à une entité économique faisant, à l'époque, l'objet de projets d'aménagements du territoire. La Wallonie est composée de 22 secteurs économiques (n°27 à 48) (Figure I.4). Notons que la délimitation de ces secteurs économiques ne suit aucune logique géologique ou hydrogéologique définie, telle que la limite d'un bassin versant ou d'une masse d'eau souterraine ou de surface.

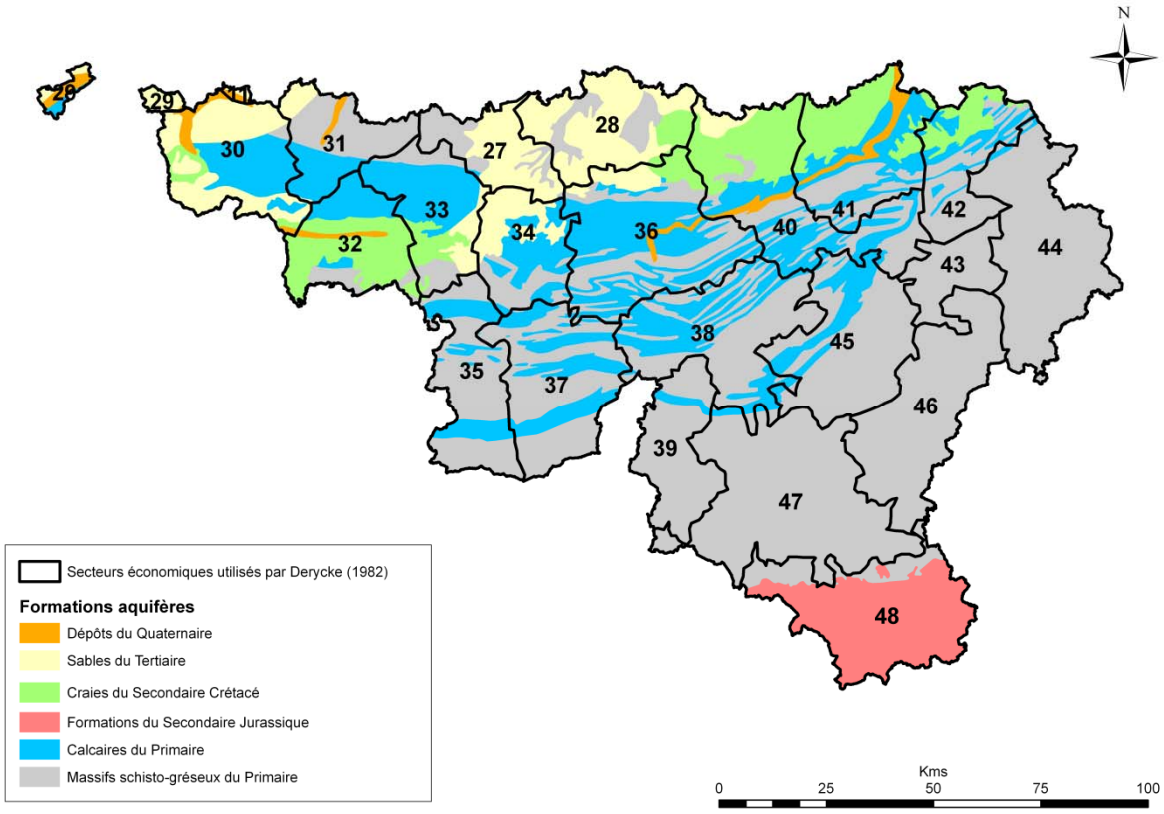


Figure I.4 : Découpage de la Wallonie en 22 secteurs économiques.

Chacun de ces secteurs représente une maille élémentaire du schéma de description détaillée des paramètres hydrogéologiques du bilan de synthèse des ressources en eau souterraine et a été passé en revue par les auteurs afin de préciser (Derycke et Fried, 1982) :

- les prélèvements effectués ;
- les caractéristiques géologiques propres ;
- les paramètres hydrodynamiques disponibles ;
- les disponibilités aquifères ;
- le mode de prélèvement (estimation de la profondeur des puits,…) ;
- la nature générale des eaux captées ;
- la piézométrie ;
- tout autre élément hydrogéologique utile au bilan de synthèse.

La compilation de ces informations permet aux auteurs de proposer, pour chaque secteur économique, une évaluation des prélèvements totaux et de la disponibilité en eau souterraine. La disponibilité correspond au volume d'eau souterraine annuel encore disponible pour l'exploitation après le prélèvement annuel. Les estimations faites par les auteurs considèrent, dans la mesure du possible, un maintien du débit d'étiage des rivières et intègrent également un souci des contingences économiques pouvant limiter l'implantation de captages.

Le calcul des prélèvements en eau souterraine résulte de la somme des débits annuels destinés à la distribution publique d'eau et destinés à l'activité industrielle et agricole pour l'année de référence 1978. Cette valeur est mesurée et peut être considérée comme relativement précise.

Par contre, étant donné l'hétérogénéité géologique et hydrogéologique des différents secteurs et la densité d'informations contrastée selon les régions étudiées, diverses méthodes d'estimation de la disponibilité en eau souterraine, plus ou moins précises, ont été employées.

Huit méthodes peuvent être dégagées (Tableau I.1). Ces méthodes vont du modèle d'écoulement (Bassin de la Dyle, bassin de Mons) au bilan hydrogéologique (Hesbaye) en passant par des déductions d'observations de terrain (Gaume et Pays de Herve), des extrapolations spatiales théoriques d'observations ponctuelles au niveau de captages représentatifs (grès et schistes dévoniens et massif cambro-silurien) et des estimations liées à l'expérience des auteurs (calcaires carbonifères du bassin de Namur).

Disponibilité	Méthode d'estimation		Secteurs
Volume d'eau annuel encore disponible pour l'exploitation après prélèvement annuel	I	Modèle d'écoulement	28, 32
	II	Valorisation d'eau d'exhaure restituée au réseau de surface	30
	III	Application d'un coefficient d'exploitation défini à partir du secteur 35 à l'ensemble des calcaires dévoniens du Bassin de Dinant (Coeff. Expl.= Prélèv. Ann. Calc. Dév. Sect.35/Superficie Calc. Dév. Sect.35 = 0,0149)	35, 37, 45, 47
	IV	Estimation d'une lame d'eau moyenne captée annuellement (5 à 10 mm) par ouvrage représentatif du comportement aquifère et extrapolation à l'ensemble des lithologies similaires (Grès et schistes dévoniens et socle Cambro-Silurien)	35, 37, 38, 39, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48
	V	Bilan hydrique (Hesbaye) - Monjoie (1967))	40, 41
	VI	Analyse du débit des sources (Jurassique Gaumais et Crétacé du Pays de Herve) - Travaux de Gulinck (1966 et Document inédit)	42, 48
	VII	Extrapolation de la lame d'eau captée au captage de Modave à l'ensemble des calcaires Carbonifères du bassin de Dinant	36, 37, 38, 40, 41, 42, 45
	VIII	Aucune méthode détaillée (Calcaires Carbonifères du Bassin de Namur)	33, 34, 36, 40

Tableau I.1 : Méthodes d'évaluation de la disponibilité en eau souterraine par secteur économique en Wallonie (Derycke et Fried, 1982) – Abréviations : Coeff.Expl. = Coefficient d'exploitation, Prélèv. Ann. Calc. Dév. = Prélèvement annuel au sein des calcaires dévoniens, Sect. 35 = Secteur économique n°35, Superficie Calc. Dév.Sect.35 = Superficie des calcaires dévoniens au sein du secteur n°35.

Les deux paramètres, prélèvements et disponibilité, sont finalement sommés, de manière à évaluer une disponibilité globale par secteur économique. L'intégration de ces valeurs sur la totalité du territoire a ensuite permis d'évaluer la disponibilité globale en eau souterraine en Wallonie :

$$DG = \sum_{n=27}^{n=48} P_n + D_n$$

Où :

DG : Disponibilité globale en eau souterraine ;

n : Numéro de secteur économique ;

P : Prélèvements totaux d'eau souterraine ;

D : Disponibilité en eau souterraine.

I.4.3. Résultats

Les résultats de l'étude de Derycke et Fried (1982) sont synthétisés au sein du Tableau I.2. Chaque secteur économique y est détaillé avec sa géologie (chronostratigraphie), sa superficie, l'évaluation des prélèvements et des disponibilités en eau souterraine, de même que la méthode d'évaluation employée par les auteurs.

Conformément au symbolisme utilisé au sein du rapport (Derycke et Fried, 1982), les « - » correspondent à de faibles disponibilités locales non évaluées, les « ? » correspondent à des disponibilités plus importantes n'ayant pu être estimées, faute de données disponibles.

Quel que soit le secteur économique, les disponibilités en eau souterraine des unités aquifères carbonifères des bassins de Dinant et de Namur (surlignées de bleu et de mauve - Tableau I.2) ne sont jamais intégrées dans la valeur proposée par secteur et font l'objet d'une évaluation distincte en bas de tableau.

Pour l'année de référence 1978 :

- 408 780 676 m³ d'eau souterraine ont été prélevés ;
- 146 490 000 m³ d'eau souterraine restent hypothétiquement disponibles.

Cela correspond à une disponibilité globale de 555 270 676 m³ d'eau souterraine (Tableau I.2 – fin), soit 65 % de la disponibilité totale en eau souterraine de l'ensemble du territoire belge estimée à 855 876 000 m³ par Derycke et Fried (1982). Cette valeur, généralement arrondie à 550 millions de m³, représente une ressource exploitable qui ne peut être comparée à la ressource en eau souterraine annuellement renouvelable.

Les secteurs économiques 27 à 48 (Wallonie) couvrant une superficie totale de 16 880 km², la disponibilité totale en eau souterraine calculée par Derycke et Fried (1982) correspond à une lame d'eau moyenne de 33 mm.

DERYCKE et FRIED (1982)						
Secteur économique	**Région**	**Aquifère(s)**	**Superficie**	**Prélèvements (I)**	**Disponibilité (II)**	
			km²	**m³**	**m³**	**Méthode d'estimation**
27	Nivelles	Sables Bruxelliens	431,1	15 724 000	Surexploité	
		Calcaires dévoniens du bassin de Namur				
		Socle Cambro-Silurien				
28	Wavre-Jodoigne-Perwez	Crétacé du Brabant	714,7	21 274 000	Surexploité	
		Sables Bruxelliens			4 300 000	Dispo = Prélèv. Max. modélisé (modèle écoulement bassin de la Dyle éch. mens.) - Prélèvement réel
29	Mouscron - Comines	Calcaires Carbonifères	105,0	8 887 000	Surexploité	
		Sables Landéniens			-	
30	Tournai-Leuze-Peruwelz	Calcaires Carbonifères	765,8	40 422 000	5 000 000	50% de l'exhaure du bassin carrier du Tournaisis (10 000 000 m³) qui pourraient être récupérés au lieu d'une restitution au réseau de surface
		Socle Cambro-Silurien			-	
31	Ath-Lessines-Enghien	Pléistocène (Alluvions de l'Escaut)	492,8	8 767 000	?	
		Calcaires Carbonifères du bassin de Namur				
		Socle Cambro-Silurien				
32	Mons - Borinage	Sables Landéniens	620,4	88 224 000	-	
		Craies du Bassin de Mons			8 000 000	Modèle déterministe en régime permanent (Derycke, 1977)
		Craies du Bassin de Mons + Pléistocène			-	
		Houiller			-	
		Calcaire Carbonifère du Bassin de Namur			-	
		Calcaire dévonien du Bassin de Dinant			-	
33	La Louvière - Soignies	Pléistocène (Alluvions de l'Escaut)	609,0	25 204 000	?	
		Sables Bruxelliens				
		Sables Landéniens				
		Craies du Bassin de Mons				
		Houiller				
		Calcaire Carbonifère du Bassin de Namur				
		Calcaire dévonien du Bassin de Dinant				
34	Charleroi	Pléistocène (Alluvions de la Sambre)	534,4	25 721 500	?	
		Sables Bruxelliens				
		Houiller				
		Calcaire Carbonifère du Bassin de Namur				
		Calcaire dévonien du Bassin de Dinant				

Tableau I.2 : Synthèse des résultats de l'étude de Derycke et Fried (1982).

DERYCKE et FRIED (1982)						
Secteur économique	Région	Aquifère(s)	Superficie	Prélèvements (I)	Disponibilité (II)	
			km²	m³	m³	Méthode d'estimation
35	Thuin-Chimay	Sables Bruxelliens	689,5	2 804 000	-	
		Calcaire Dévonien du Bassin de Dinant			0	Estimation empirique à partir d'un coefficient exploitation des Calcaires Dévoniens du Bassin de Dinant défini à partir du secteur 35 (Derycke et Fried 1982 - page 184).
		Socle (Grès et schistes du Dévonien)			3 600 000	Extrapolation d'une lame d'eau captée de 5 à 10 mm à l'ensemble des grès et schistes dévoniens du secteur (Derycke et Fried 1982 - page 192)
36	Namur	Pléistoscène (Alluvions de la Meuse)	1164,2	42 334 789	?	
		Pléistoscène (Alluvions sauf Meuse)				
		Sables Bruxelliens				
		Crétacé de Hesbaye				
		Houiller				
		Calcaire Carbonifère du Bassin de Namur				
		Calcaire Carbonifère du Bassin de Dinant				
		Calcaire Dévonien du Bassin de Namur				
		Calcaire Dévonien du Bassin de Dinant				
		Famennien				
		Frasnien				
		Emsien				
		Siegenien (Coblencien)				
		Siegenien (Burnotien)				
		Gedinnien				
		Socle Cambro-Silurien				
37	Philippeville-Couvin	Pléistocène (Alluvions sauf Meuse)	890,5	8 900 706	4 950 000	
		Calcaire Carbonifère du Bassin de Dinant				
		Calcaire Dévonien du Bassin de Dinant				Estimation empirique à partir d'un coefficient exploitation des Calcaires Dévoniens du Bassin de Dinant défini à partir du secteur 35.
		Famennien				Extrapolation d'une lame d'eau captée de 5 à 10 mm à l'ensemble des grès et schistes dévoniens du secteur.
		Frasnien				
		Couvinien				
		Siegenien (Burnotien)				
		Gedinnien				

Tableau I.2 (suite).

DERYCKE et FRIED (1982)						
Secteur économique	Région	Aquifère(s)	Superficie	Prélèvements (I)	Disponibilité (II)	
			km²	m³	m³	Méthode d'estimation
38	Dinant - Ciney	Pléistocène (Alluvions Meuse)	1006,6	14 041 895	-	
		Pléistocène (Alluvions sauf Meuse)			-	
		Calcaire Carbonifère du Bassin de Dinant			-	
		Calcaire Dévonien du Bassin de Dinant			-	
		Famennien			750 000	Extrapolation d'une lame d'eau captée de 5 mm à l'ensemble des grès et schistes dévoniens supérieurs du secteur.
		Frasnien			-	
		Couvinien			-	
39	Beauraing-Gedinne	Pléistocène (Alluvions sauf Meuse)	556,3	1 594 272	-	
		Calcaire Dévonien du Bassin de Dinant			-	
		Famennien			3 600 000	Extrapolation d'une lame d'eau captée de 5 à 10 mm à l'ensemble des grès et schistes dévoniens du secteur.
		Frasnien				
		Couvinien				
		Siegenien (Coblencien)				
		Gedinnien				
40	Huy-Waremme	Pléistocène (Alluvions Meuse)	1082,5	51 860 765	9 450 000	Estimé à partir du bilan hydrique de la nappe de Hesbaye entre 1950 et 1965 (Monjoie, 1967)
		Pléistocène (Alluvions sauf Meuse)				
		Crétacé de Hesbaye				
		Calcaire Carbonifère du Bassin de Namur				
		Calcaire Carbonifère du Bassin de Dinant				
		Calcaire Dévonien du Bassin de Dinant				
		Famennien				
		Frasnien				
		Emsien - Siegennien				
		Gedinnien				
		Socle Cambro-Silurien				
41	Liège	Pléistocène (Alluvions Meuse)	839,9	20 965 310		
		Pléistocène (Alluvions sauf Meuse)				
		Crétacé du Pays de Herve				
		Crétacé de Hesbaye				
		Houiller				
		Calcaire Carbonifère du Bassin de Dinant				
		Famennien				
		Frasnien				
		Emsien - Siegennien				
		Siegenien (Burnotien)				

Tableau I.2 (suite).

DERYCKE et FRIED (1982)						
Secteur économique	Région	Aquifère(s)	Superficie	Prélèvements (I)	Disponibilité (II)	
			km²	m³	m³	Méthode d'estimation
42	Verviers	Crétacé du Pays de Herve	563,9	3 870 800	3 500 000	Rendement des craies estimé à 65 m²/ha/j (Gulinck, 1966): 1 400 000 m³ pour secteur 42
		Houiller				
		Calcaire Carbonifère du Bassin de Dinant				
		Calcaire Carbonifère Vesdre - Theux				
		Calcaire Dévonien Vesdre - Theux				
		Famennien				Extrapolation d'une lame d'eau captée de 5 mm à l'ensemble des grès et schistes dévoniens supérieurs du secteur (2 100 000 m³).
		Emsien - Siegennien				
		Siegenien (Burnotien)				
		Gedinnien				
		Socle Cambro-Silurien				
43	Stavelot	Poudingue Permien	339,7	793 800	-	
		Gedinnien			900 000	Extrapolation d'une lame d'eau captée de 5 à 10 mm à l'ensemble des grès et schistes dévoniens et cambro-siluriens du secteur.
		Socle Cambro-Silurien				
44	Malmédy-Saint Vith	Pléistocène (Alluvions sauf Meuse)	1083,6	4 806 000	-	
		Poudingue Permien			-	
		Famennien			900 000	Extrapolation d'une lame d'eau captée de 5 à 10 mm à l'ensemble des grès et schistes dévoniens et cambro-siluriens du secteur.
		Emsien - Siegennien				
		Socle Cambro-Silurien				
45	Marche-en-Famenne	Pléistocène (Alluvions sauf Meuse)	938,3	6 169 782	7 800 000	
		Calcaire Carbonifère du Bassin de Dinant				Estimation empirique à partir d'un coefficient d'exploitation des Calcaires Dévoniens du Bassin de Dinant défini à partir du secteur 35 (2 100 000 m³)
		Calcaire Dévonien du Bassin de Dinant				
		Famennien				Extrapolation d'une lame d'eau captée de 5 à 10 mm à l'ensemble des grès et schistes dévoniens du secteur (5 700 000 m³).
		Couvinien				
		Emsien - Siegennien				
		Gedinnien				
		Socle Cambro-Silurien				
46	Bastogne	Couvinien	983,9	3 939 609	-	
		Emsien - Siegennien			-	
		Gedinnien			-	
		Socle Cambro-Silurien			5 100 000	Extrapolation d'une lame d'eau captée de 5 à 10 mm à l'ensemble des grès et schistes cambro-siluriens du secteur.

Tableau I.2 (suite)

DERYCKE et FRIED (1982)						
Secteur économique	**Région**	**Aquifère(s)**	**Superficie**	**Prélèvements (I)**	**Disponibilité (II)**	
			km²	**m³**	**m³**	**Méthode d'estimation**
47	Neufchâteau	Couvinien	1434,4	4 725 910	9 800 000	Extrapolation d'une lame d'eau captée de 5 à 10 mm à l'ensemble des grès et schistes dévoniens du secteur (9 700 000 m³) + Estimation empirique à partir d'un coefficient d'exploitation des Calcaires Dévoniens du Bassin de Dinant défini à partir du secteur 35 (100 000 m³).
		Emsien - Siegennien				
		Siegennien				
		Gedinnien				
48	Arlon-Virton	Calcaires Bajociens	1034,4	7 749 538	13 840 000	Extrapolation d'une lame d'eau captée de 5 à 10 mm à l'ensemble des grès et schistes dévoniens du secteur (1 600 000 m³) + Analyse du trop-plein du Jurassique Gaumais par jaugeage des sources (Gulinck, document inédit) (12 240 000 m³)
		Sinémurien				
		Virtonien				
		Emsien - Siegennien				
		Gedinnien				
Estimation globale pour les Calcaires Carbonifères du Bassin de Namur					40 000 000	Pas de précisions (Derycke et Fried, 1982 - page 176)
Estimation globale pour les Calcaires Carbonifères du Bassin de Dinant (surtout au profit des secteurs 36 et 38)					25 000 000	Extrapolation de lame d'eau captée au captage de Modave à l'ensemble des calcaires carbonifères du bassin de Dinant (Derycke et Fried, 1982 - page 198)
		Total	**16880,7**	**408 780 676**	**146 490 000**	
				Disponibilté globale pour la Wallonie* (m³)		
				555 270 676		
				Disponibilté globale pour la Wallonie* (mm)		
				33		

** (I) + (II)*

Tableau I.2 (Suite et fin).

I.4.4. Nécessité de mettre à jour la valeur de référence de la ressource en eau souterraine exploitable en Wallonie

Plusieurs constats permettent de conclure qu'il est, aujourd'hui, nécessaire de réviser la valeur de référence de la ressource exploitable en eau souterraine de la Wallonie, soit 550 millions de m³.

Tout d'abord, la définition des mailles élémentaires du bilan de synthèse de messieurs Derycke et Fried (1982) repose sur le découpage du territoire en secteurs économiques. Ces derniers ne constituent pas des entités hydrogéologiques définies (bassins versants, masses d'eau souterraine ou de surface) et les échanges de flux entre mailles sont inévitables. La réalisation de bilans hydrogéologiques sur chaque secteur économique nécessite donc de considérer ces flux entrants ou sortants. Bien que ceux-ci aient été, dans la mesure du possible, considérés par les auteurs, ils restent difficiles à évaluer et constituent probablement une source d'erreur qui peut être minimisée en travaillant sur base d'un découpage du territoire basé sur des critères hydrogéologiques.

Le second constat réside dans le fait que 75% de la valeur de référence de 550 millions de m³ corresponde en fait au volume total d'eau souterraine exploité en Wallonie durant l'année de référence 1978 et que plus de la moitié de la disponibilité résiduelle (volume d'eau annuel encore disponible pour l'exploitation après prélèvement annuel) soit évaluée à partir de l'extrapolation d'une lame d'eau moyenne exploitée au sein des différents types de lithologie. Seule une faible partie des 550 millions de m³ sont effectivement déduits d'une analyse de la dynamique hydrogéologique « naturelle » en Wallonie. Il serait donc intéressant de réévaluer la situation selon un angle intégrant à la fois la notion de recharge et de vidange des aquifères.

Ensuite, l'évaluation de la gestion de la ressource en eau souterraine selon les contraintes imposées par la Directive-Cadre sur l'Eau (DCE, 2000) requiert l'utilisation de valeurs moyennes annuelles à long terme (LTAA : long term annual average) qui, selon les définitions basée sur l'« *ECE standard classification of water use (CES/636)* » et sur les « *Systems of Water Statistics in the ECE Region (ECE/Water/43)* », nécessitent l'analyse de chroniques de données d'au moins 20 années consécutives. Or, la valeur de 550 millions de m³ repose sur une seule année de référence : 1978.

Finalement, au cours de ces trente dernières années, les outils et méthodes ont évolué. La réalisation de modèles hydrologiques et hydrogéologiques sur des régions plus ou moins étendues permet d'offrir des éléments de réponse à la problématique de l'évaluation de la ressource en eau souterraine en suivant une méthodologie homogène pour l'ensemble du territoire. Il est donc intéressant, aujourd'hui, de faire une mise au point sur les données collectées via ces méthodes plus récentes et de déterminer dans quelle mesure elles peuvent être mises au service de la gestion des eaux souterraines à l'échelle de la Wallonie.

I.5. COMPLEXITÉ DE L'ÉVALUATION DE LA RÉSERVE ET DE LA RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE EN WALLONIE

L'évaluation de la réserve et de la ressource en eau souterraine (annuellement renouvelable et exploitable) d'un simple réservoir nécessite l'intégration d'une multitude de paramètres biophysiques et hydrogéologiques.

En ce qui concerne la réserve régulatrice en eau souterraine d'un réservoir, une bonne connaissance de l'aptitude à l'emmagasinement de celui-ci (porosité efficace ou coefficient d'emmagasinement) est requise. Celle-ci sera couplée aux extrêmes piézométriques qui y sont enregistrés afin de calculer le volume de la réserve.

La quantification de la ressource en eau souterraine annuellement renouvelable impose, quant à elle, une évaluation fiable de la recharge de la nappe d'eau souterraine de ce réservoir. Or celle-ci est conditionnée par un coefficient de partage de l'eau utile entre l'infiltration et le ruissellement, dépendant directement de nombreux facteurs tels que la nature du sol, l'occupation du sol, la topographie et bien entendu la nature et les caractéristiques hydrogéologiques du substratum géologique. Notons que la quantification de la lame d'eau utile est elle-même tributaire de l'importante variabilité spatiale de la lame d'eau précipitée et des processus d'évapotranspiration enregistrés à l'échelle de la Wallonie.

L'évaluation de la ressource en eau souterraine exploitable, de loin la plus complexe, nécessite de coupler l'hydrologie souterraine à l'hydrologie de surface de manière à intégrer les contraintes environnementales imposées par les eflows. Cela implique que les interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines soient relativement bien comprises, or celles-ci vont différer selon la lithologie du réservoir souterrain.

Compte-tenu de l'importante hétérogénéité de ses caractéristiques biophysiques, géologiques et hydrogéologiques, l'évaluation de la réserve et de la ressource en eau souterraine à l'échelle de toute la Wallonie est donc un exercice compliqué.

D'un point de vue hydrogéologique, le substratum rocheux de la Wallonie est constitué d'une large gamme de lithologies (Figure I.5). Selon leurs caractéristiques hydrogéologiques propres, ces dernières peuvent être regroupées en sept grands types de formations aquifères détaillés à la Figure I.6.

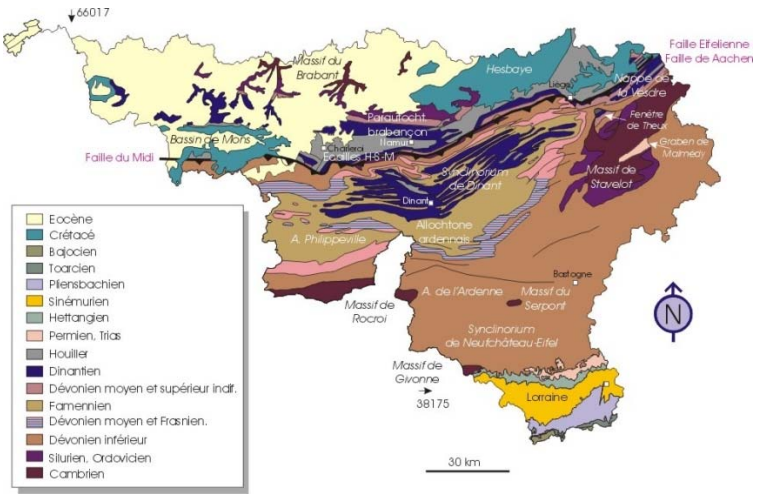
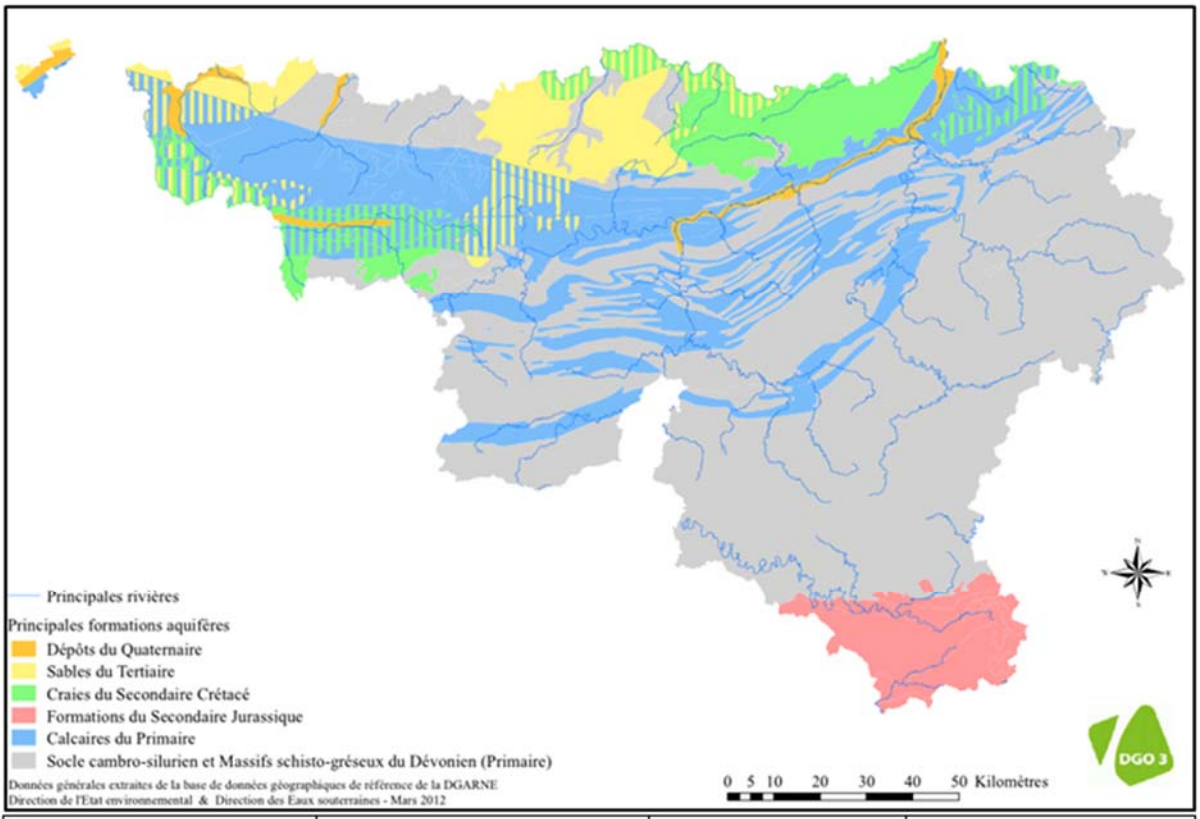


Figure I.5 : Carte géologique de la Wallonie.



Type de formation aquifère	Lithologies rencontrées	Régions concernées	Particularité
Dépôts du Quaternaire	Limons, graviers	Talweg de la Meuse et affluents, terrasses de la Vallée de la Meuse, Talweg de l'Escaut et affluents, alluvions tourbeuses de la Vallée de la Haine	Nappes en relation directe avec la rivière
Sables du Tertiaire	Sables Bruxelliens, Landéniens et Yprésiens	Brabant Wallon	/
Craies du Secondaire Crétacé	Formations carbonatées	Hesbaye, Pays de Herve, Bassin de Mons, Brabant	Bassin de Mons: Aquifère majeur transfrontalier (France)
Formations du Secondaire Jurassique	Calcaires, sables gréseux, sables schisteux, marnes	Gaume	Nappes superposées plus ou moins indépendantes
Calcaires du Primaire	Calcaires au degré de karstification variable	Synclinorium de Dinant, bords nord et sud du synclinorium de Namur et bassin de la Vesdre	Aquifère le plus important de Wallonie, transfrontalier (France, Flandre)
Massif schisto-gréseux du Dévonien	Schistes, phyllades, grès, quartzo-phyllades et quartzites fissurés	Massif Ardennais, Synclinorium de Namur et de Dinant, Bassin de la Vesdre	Aquifères de faible capacité et plus productif dans les couches superficielles altérées et fissurées
Socle Cambro-silurien	Schistes, phyllades, quartzophyllades et quartzites fissurés	Ardenne (Massifs de Rocroi, Serpont, Givonne et Stavelot) et massif du Brabant	Aquifères de faible capacité et plus productif dans les couches superficielles altérées et fissurées

Figure I.6 : Principales formations aquifères de Wallonie – source : DGARNE (DGO3).

Selon le caractère meuble ou cohérent de l'aquifère, selon son degré d'altération et/ou de fracturation et selon le contexte hydrogéologique, les nappes d'eau souterraine logées dans ces aquifères peuvent être à porosité d'interstice, de fissure ou à double porosité, elles peuvent être libres ou captives, elles peuvent être ou non superposées avec un degré variable d'interconnexion.

C'est pourquoi, afin de faciliter la gestion de ces eaux souterraines aux caractéristiques très variées, le concept de « masse d'eau souterraine » a été défini par la Directive-Cadre sur l'Eau (DCE, 2000). Celle-ci constitue une unité élémentaire du milieu aquatique correspondant à un volume distinct d'eau souterraine à l'intérieur d'un ou de plusieurs aquifères (DCE, 2000). La Wallonie est subdivisée en 33 masses d'eau souterraine aux caractéristiques propres (10 dans le DHI[1] de l'Escaut, 21 dans le DHI de la Meuse et 2 dans le DHI du Rhin) (Figure I.7). Pour une description détaillée de ces masses d'eau souterraines et de leurs critères de délimitation, se référer à la page web du Portail de la Wallonie présentant l'ensemble des fiches de caractérisation des masses d'eau souterraine en Wallonie (http://spw.wallonie.be/dce/spip.php?rubrique67). La Directive-Cadre sur l'Eau impose que les différents Etats membres mettent en place les actions nécessaires pour atteindre, à l'horizon 2015, un bon état général des masses d'eau souterraine.

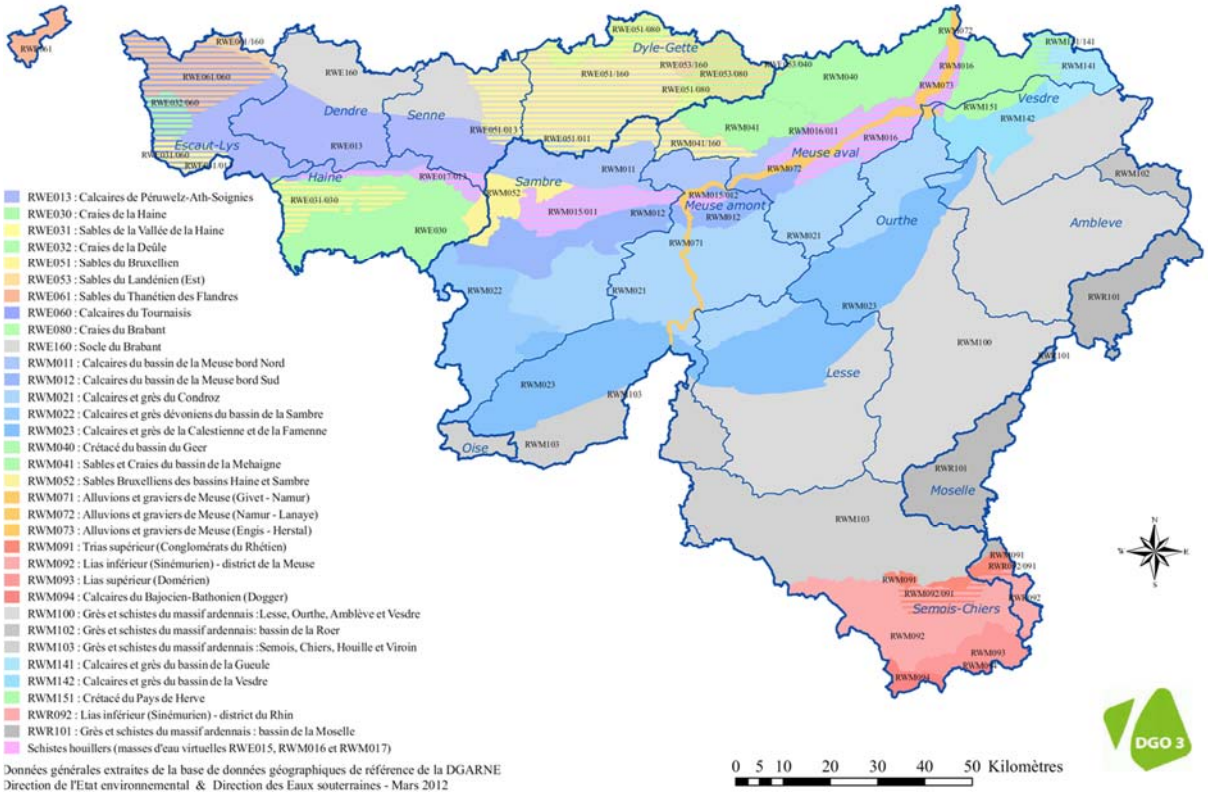


Figure I.7 : Délimitation des 33 masses d'eau souterraine définies en Wallonie – source : DGARNE (DGO3).

[1] DHI : District Hydrographique International.

De manière à intégrer au mieux la variabilité des caractéristiques biophysiques et hydrogéologiques intrinsèques de la Wallonie et à minimiser le lissage des informations, l'évaluation de la ressource totale en eau souterraine devrait idéalement passer par le cumul des ressources en eau souterraine (annuellement renouvelable et exploitable) évaluée pour chaque entité hydrogéologique pertinente de la Wallonie (bassin versant, masse d'eau de surface, masse d'eau souterraine) prise isolément et étudiée au cas par cas.

Notons que l'évaluation de la réserve en eau souterraine n'est que de peu d'utilité en ce qui concerne la problématique de gestion des eaux telle qu'envisagée dans la Directive-Cadre sur l'Eau. Les chapitres suivants ne concerneront, dès lors, plus que l'évaluation des ressources en eau souterraine.

I.6. OUTILS ACTUELLEMENT DISPONIBLES OU ENVISAGEABLES EN VUE D'UNE QUANTIFICATION DE LA RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE EN WALLONIE

I.6.1. Introduction

La méthode d'évaluation de la ressource en eau souterraine de la Wallonie initialement envisagée dans le cadre de cette convention était de recenser les études hydrogéologiques susceptibles de fournir des éléments de réponse à cette question, d'en confronter et d'en cumuler l'ensemble des résultats de manière à couvrir la totalité de la Wallonie.

Très vite, les différences d'échelle de travail des différentes études, qu'elles soient spatiales ou temporelles, cumulées avec les différences de méthodologies selon les opérateurs, ont posé question ; d'une part, quant à la possibilité d'une confrontation pertinente de toutes ces données endéans la courte durée de la convention, mais surtout quant à la représentativité de la gamme de valeurs de la ressource qui en ressortirait.

Qui plus est, cette façon de procéder risquait fortement d'introduire un biais lié aux différences régionales de caractérisation hydrogéologique en Wallonie. Effectivement, les principaux captages d'eau souterraine sont implantés au sein du calcaire primaire et des craies (Figure I.8). Ces formations carbonatées assurent à elle seules 75% de la production d'eau souterraine (DGARNE, 2012). Il semble donc évident que tous les efforts de caractérisation hydrogéologique soient essentiellement concentrés sur ces aquifères. Par contre, les prises d'eau dans les formations schisto-gréseuses du Dévonien (Ardenne) et du socle cambro-silurien représentent seulement 7,5% du total prélevé en eau souterraine (DGARNE, 2012). On n'y retrouve pas de prise d'eau importante, mais un grand nombre de petites prises d'eau pour l'alimentation locale en milieu rural. Les études de caractérisation hydrogéologique y étant moins abondantes, l'alimentation de la banque de données hydrogéologiques pour ces régions est forcément moins conséquente laissant plus de place aux incertitudes.

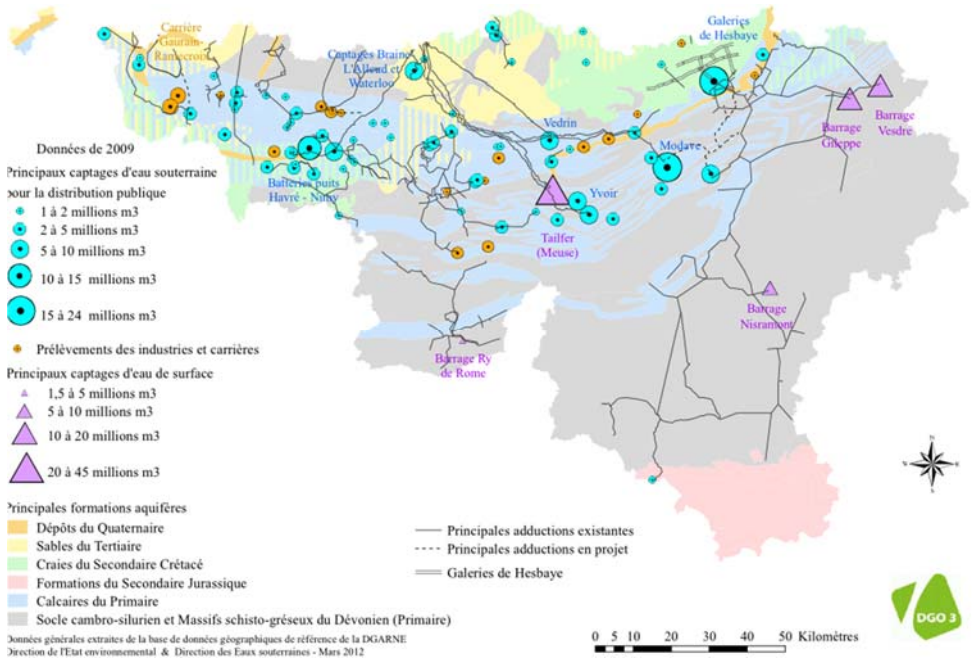


Figure I.8 : Principales prises d'eau de surface et souterraine en Wallonie - Source : DGARNE (DGO3)

Il a donc été décidé de déterminer dans quelle mesure des outils plus globaux, fonctionnant déjà à l'échelle de la Wallonie, tout en considérant le détail de ses sous-bassins, étaient à même d'améliorer la connaissance actuelle de nos ressources en eau. L'avantage étant que même si ces outils globaux possèdent leurs limites, l'homogénéité des méthodes appliquées sur l'ensemble de la Wallonie garantit une évaluation plus objective et plus pertinente et une meilleure analyse des valeurs quantifiées.

I.6.2. Quantification de la ressource en eau souterraine annuellement renouvelable de la Wallonie – Modèle hydrologique sol et zone vadose EPIC-grid

I.6.2.1. Introduction

Le modèle EPIC-grid est un outil d'aide à la décision, développé par l'Unité d'Hydrologie et Hydraulique Agricole de Gembloux Agro-Bio Tech (Université de Liège), pour évaluer l'impact à court et à long terme des politiques menées dans le cadre de la protection du patrimoine « Eau » (Directive-Cadre sur l'Eau 2000/60/CE).

Cet outil est un modèle hydrologique « sol et zone vadose » capable de représenter les flux d'eau et de nutriments, de permettre la quantification des pollutions diffuses d'origine agricole et d'estimer l'impact des mesures d'atténuation sur la qualité des eaux en Wallonie.

Indépendamment de l'aspect qualité des eaux, cet outil permet de calculer, par masse d'eau souterraine et par masse d'eau de surface, la lame d'eau moyenne percolant vers les nappes d'eau souterraine, c'est-à-dire la recharge (Sohier, 2011). La description simplifiée du modèle présentée ci-après concerne essentiellement les échanges de flux d'eau. Pour une description plus détaillée du modèle et pour une description des flux de nutriments et de polluants, se référer à la thèse de C. Sohier : « *Développement d'un modèle hydrologique sol et zone vadose afin d'évaluer l'impact des pollutions diffuses et des mesures d'atténuation sur la qualité des eaux en Wallonie* » (2011).

Le modèle EPIC-grid ou ses versions précédentes constituent le module sol de plusieurs modèles intégrés (couplage de modèles compartimentaux afin d'appréhender des systèmes d'une grande complexité) tels que MOHISE (1998-2002), MOHICAN (1996-2002) ou MOIRA (2001-2005). Une brève description de ces modèles peut être consultée via le portail de l'Aquapôle (http://www.aquapole.ulg.ac.be).

I.6.2.2. Description du modèle EPIC-grid

Le système modélisé par EPIC-grid est la zone dite « vadose » composée du sol et du sous-sol non saturé en eau. Ses limites supérieure et inférieure correspondent respectivement à la surface du sol et au sommet des eaux souterraines. Son épaisseur est donc variable (de plusieurs mètres à plusieurs dizaines de mètres).

Trois principaux niveaux le constituent (Figure I.9) (Sohier, 2011) :

- la surface du sol, siège de phénomènes particuliers (érosion, solifluxion, etc.). Epaisseur : quelques millimètres ;
- la zone racinaire dominée par l'activité biologique et par l'essentiel du système racinaire des végétaux, à taux de saturation en eau fortement variable dans le temps. Epaisseur : 1 à 2 mètres ;
- le substrat sous-jacent jusqu'au sommet de la nappe d'eau souterraine de base. Epaisseur : plusieurs mètres à plusieurs dizaines de mètres.

La dynamique de l'eau aux limites et au sein de ce système est caractérisée par (Figure I.9):

- du ruissellement de surface ;
- des écoulements hypodermiques rapides au sein de la zone racinaire, résultant de nappes temporaires à temps de vidange court (quelques jours) ;
- des écoulements hypodermiques lents au niveau du substrat sous-jacent, résultant de nappes temporaires à temps de vidange intermédiaire (quelques mois);
- des écoulements verticaux (descendants ou ascendants) assurant le transfert d'eau entre les différents niveaux de la zone vadose et la recharge des nappes d'eau souterraine.

Le ruissellement de surface et les écoulements hypodermiques rapides constituent le ruissellement direct majoritairement responsable des débits de crue de nos cours d'eau.

La vidange de la nappe d'eau souterraine fournit le débit de base des cours d'eau moyennant un temps de vidange plurimensuel à pluriannuel.

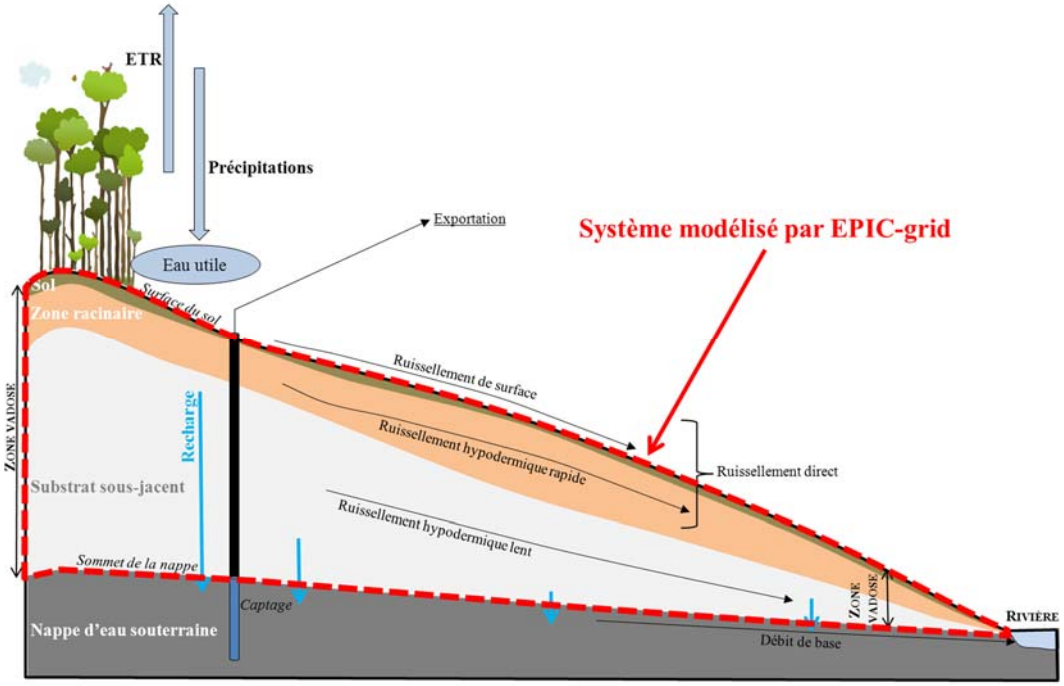


Figure I.9 : Délimitation du système et des dynamiques de l'eau modélisés avec l'outil EPIC-grid (D'après Sohier, 2011) – ETR : Evapotranspiration réelle.

EPIC-grid est un modèle hydrologique « sol – zone vadose » de la Wallonie développé à l'échelle du bassin versant sur base du modèle parcellaire « eau-sol-plante » EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator – Williams et al., 1984). Avant d'aboutir à la version EPIC-grid, la version basique d'EPIC a été modifiée à plusieurs reprises par l'Unité d'Hydraulique Agricole (Gembloux Agro-Bio Tech) afin d'être adaptée aux spécificités régionales belges (EPICmod) et de modéliser la percolation jusqu'à la nappe d'eau souterraine de base (EPIC-MAILLE) (Figure I.10).

Le modèle EPIC-grid est un modèle de type « déterministe, conceptuel, distribué et continu à pas de temps journalier » :

- déterministe car aucune des variables d'entrée ou paramètres du modèle n'est considéré comme une grandeur aléatoire. Ceux-ci n'étant pas représentés par une distribution statistique ou de probabilité, le modèle conduit à un résultat unique ;
- conceptuel car les processus affectant le système modélisé sont des représentations conceptuelles physiquement basées. La zone vadose y est représentée sous forme de réservoirs en cascade (Williams et al., 1984 ; Neitsch et al., 2002 in Sohier, 2011). Ce type de modèle est particulièrement utile pour l'étude de vastes bassins avec de longues périodes de simulation (Gandolfi et al., 2006 in Sohier, 2011) ;
- distribué afin de considérer au mieux la variabilité spatiale des occupations du sol et des pratiques agricoles existant au sein des bassins de Wallonie ;
- continu à pas de temps journalier afin de réaliser des simulations à long terme tout en considérant le cycle des nutriments en relation avec la croissance des cultures.

Le modèle EPIC (Williams et al., 1984), d'origine américaine, constitue le module de base du modèle EPIC-grid. Il est lui-même composé de huit modules ou sous-modèles correspondant aux principaux processus modélisés (Figure I.10).

Les modules « Hydrologie », « Croissance végétale » et « Erosion hydrique » regroupent les processus intervenant, d'un point de vue volumétrique, dans la problématique de recharge des nappes d'eau souterraine constituant l'objet de notre étude. Une description très simplifiée de la modélisation de ces processus est proposée ci-dessous. Pour une description plus détaillée, se référer à la thèse de C. Sohier (2011). Les modules « Température du sol », « Cycle de l'azote », « Cycle du phosphore », « Travail du sol » et « Contrôle de l'environnement de la plante » concernent plutôt les processus contrôlant les flux de nutriments et de polluants au sein de la zone vadose et ne sont pas détaillés dans ce rapport.

- Le module « Croissance végétale » permet de simuler l'évolution et le comportement d'une large gamme de cultures (71 espèces de couvertures végétales, annuelles et pérennes) et de considérer, dans le bilan hydrique, la quantité d'eau extraite du sol par l'activité végétale.
- Le module « Erosion hydrique » utilise des indices de topographie, de couverture végétale et de pratiques culturales, d'érodibilité du sol et d'érosivité de la pluie afin de simuler l'érosion du sol par les pluies et le ruissellement et par l'irrigation.
- Le module « Hydrologie », le plus important par rapport aux objectifs de cette étude, permet de quantifier :

    1. Le **volume de ruissellement.** Celui -ci dépend des précipitations et d'un paramètre de rétention d'eau du sol. Ce dernier est fonction des caractéristiques du complexe « sol-couverture végétale-humidité antérieure du sol » ;
    2. La **percolation,** par une technique de « routage » où chaque couche de sol est considérée comme un réservoir. La percolation dépend de la quantité d'eau initialement contenue dans la couche et apparaît chaque fois que la capacité au champ[2] est dépassée pour une couche donnée. Le temps de parcours de l'eau de percolation à travers une couche est directement dépendant de la porosité et de la conductivité hydraulique à saturation de cette couche ;
    3. L'**écoulement hypodermique.** Celui-ci est calculé simultanément avec la percolation pour éviter qu'un processus ne domine l'autre. Il dépend également de la quantité d'eau initialement contenue dans la couche de sol et de la teneur en eau à la capacité au champ. Le temps de parcours de ce flux latéral est directement dépendant de la porosité et de la conductivité hydraulique à saturation de la couche parcourue mais également de sa pente ;
    4. L'**évapotranspiration**. L'évapotranspiration potentielle peut être estimée selon quatre méthodes selon le type de données météorologiques disponibles : Penman, Penman-Monteith, Priestley-Taylor et Hargreaves et Samani.
    5. La **fonte des neiges**. Si une couche de neige existe, la fonte est simulée lorsque la température maximale journalière est supérieure à 0°C. La neige fondue est ensuite traitée comme l'eau de pluie pour les processus de ruissellement et de percolation.

[2] Capacité maximale de rétention en eau pour un sol en place, bien réhumecté et ressuyé (Lozet et Mathieu, 1997)

6. Le **mouvement des nappes superficielles**. La profondeur des nappes d'eau superficielles est simulée sans lien direct avec les autres processus de mouvement de l'eau dans la zone racinaire. Les fluctuations de ces nappes sont dépendantes de la pluie, du ruissellement de surface et de l'évapotranspiration.

Dans le modèle EPIC (Williams et al., 1984), les processus de percolation et d'écoulement hypodermique sont modélisés jusqu'à la base de la zone racinaire (à environ 1,5 mètres de profondeur). Le modèle a été modifié par l'Unité d'Hydrologie et Hydraulique Agricole de Gembloux Agro-Bio Tech (Université de Liège) de manière à modéliser les transferts d'eau jusqu'à la base de la zone vadose, soit le sommet de la nappe d'eau souterraine dite « de base » (Dewez et Dautrebande, 1996 – Modèle EPIC-Maille) (Figure I.10). C'est cet aspect du modèle qui joue un rôle prépondérant dans la problématique de notre étude, à savoir : l'estimation de la recharge des nappes d'eau souterraine.

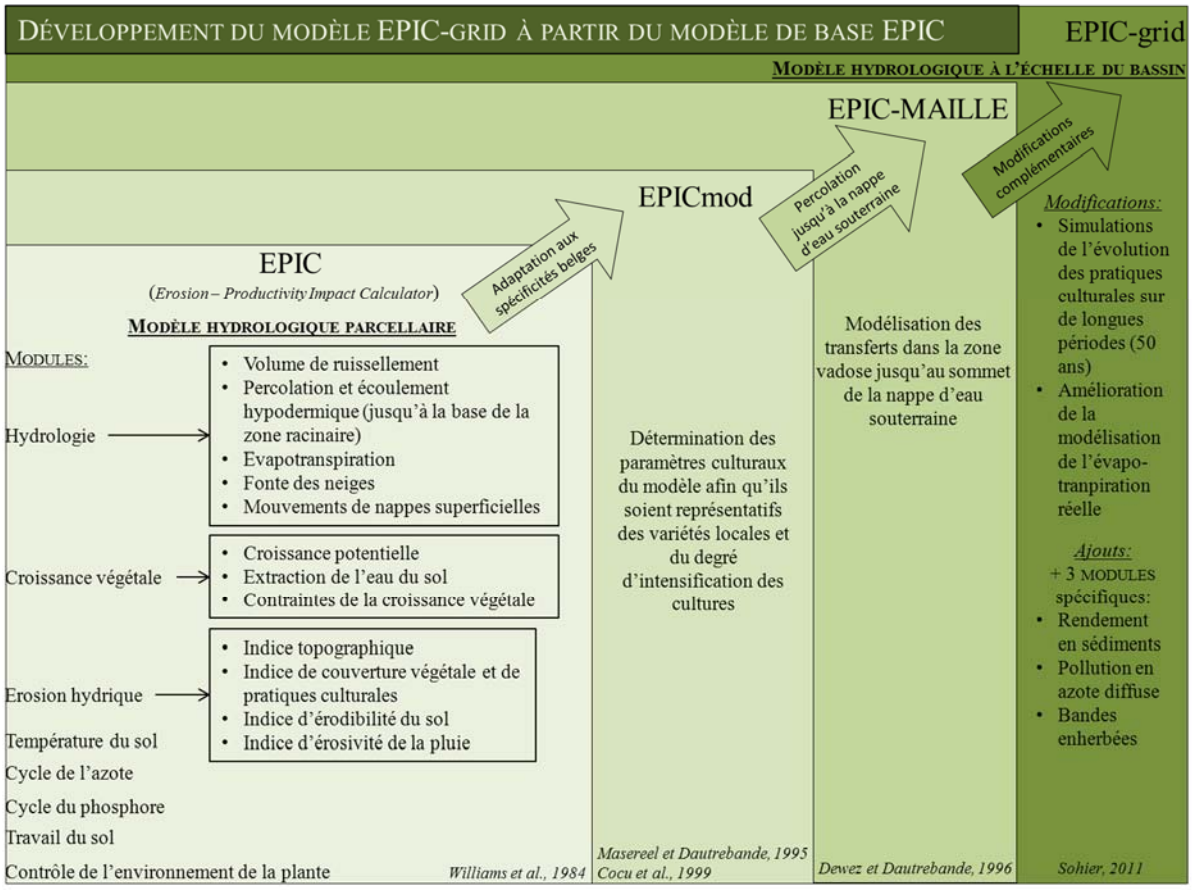


Figure I.10 : Evolution du modèle parcellaire EPIC (Williams et al., 1984) vers le modèle bassin versant EPIC-grid (Sohier, 2011).

Dans le substrat sous-jacent, la modélisation des transferts est réalisée, tout comme pour la zone racinaire, selon une approche de type capacitif. Le substrat est découpé en couches de sous-sol successives et les transferts se font de couche en couche selon un processus itératif. La caractérisation hydrogéologique de la zone vadose a été réalisée par des équipes d'hydrogéologues dans le cadre de divers projets (Projet MOHICAN, 2002 ; Projet PIRENE, 2004 et Hallet et Barbier, 2007 in Projet Qualvados).

Chaque profil hydrogéologique (géocode) est caractérisé par la nature et l'épaisseur des substrats rencontrés entre la zone racinaire et la nappe de base et chaque substrat est caractérisé par deux paramètres hydrogéologiques : la conductivité hydraulique verticale et la porosité efficace. Ces paramètres étant souvent fortement variables et, en outre, connus avec une faible précision, les données transmises sont des gammes de valeurs et non des valeurs uniques (Sohier, 2011).

Une étude de sensibilité du modèle a été réalisée afin d'évaluer l'impact du choix de ces paramètres sur la recharge de la nappe en termes de quantité et de déphasage temporel. Elle a été réalisée pour trois types d'unités hydrogéologiques aux propriétés contrastées : les calcaires carbonifères, les limons profonds du bassin du Geer et les grès du Famennien.

La sensibilité du modèle EPIC-grid quant aux paramètres hydrodynamiques de la zone vadose est différente selon les unités hydrogéologiques considérées (Sohier, 2011). Dans la gamme des valeurs testées, celle-ci s'est avérée très faible pour les substrats calcaires (conductivité hydraulique de 3.10^{-2} à 7.10^{-6} m/s et porosité efficace de 2 à 10 % - Hallet et Barbier, 2007). Pour les limons, par contre, la dynamique de recharge de la nappe est relativement sensible aux paramètres hydrodynamiques de la zone. Pour les formations géologiques de l'aquifère des grès du Famennien, le choix des paramètres hydrogéologiques influence essentiellement la dynamique de vidange des nappes temporaires.

Une procédure de calibration est appliquée aux paramètres hydrodynamiques de la zone vadose lorsque des données observées concernant soit l'évolution des niveaux piézométriques, soit la dynamique des flux arrivant aux rivières sont disponibles. A défaut, la valeur médiane de la gamme de valeurs proposée par les hydrogéologues est retenue (cette valeur pouvant être revue en fonction de l'acquisition de données complémentaires) (Sohier, 2011).

Le modèle EPIC-grid, produit final (Figure I.10), résulte de la dernière série de modifications complémentaires apportées par l'Unité d'Hydrologie et Hydraulique Agricole de Gembloux Agro-Bio Tech (Université de Liège) (Sohier, 2011). Elles permettent :

- la considération de l'évolution des pratiques culturales sur des périodes de plusieurs dizaines d'années ;
- d'améliorer la précision de l'évapotranspiration réelle en affinant les gammes de valeurs des paramètres liés à la couverture végétale (indice de surface foliaire des feuillus et conifères, albédo[3] sous cultures et prairies).

La validation du « module hydrologie » du modèle EPIC-grid a, notamment, consisté en la réalisation de bilans hydrologiques, sur base pluriannuelle (6 à 20 ans), pour 22 bassins versants de la Wallonie (Figure I.11). Les bassins considérés, localisés dans le DHI Meuse, couvrent une superficie de 6866 km², soit 41 % de la superficie totale de la Wallonie. Les bilans hydrologiques de plusieurs bassins du DHI Escaut sont également simulés à ce jour. Néanmoins, ils doivent encore être interprétés en y intégrant les volumes d'eau d'exploitation exportés (C.Sohier – com.pers.).

L'équation du bilan hydrologique par bassin est la suivante :

$$P - ETR = Q_{Riv} + Q_{Exp} + \Delta Rés + \Delta RFU$$

[3] Rapport entre l'énergie de rayonnement incidente et l'énergie réfléchie (Lozet et Mathieu, 1997).

Où :

- P : Précipitations ;
- ETR : Evapotranspiration réelle ;
- Q_{Riv} : Débit des cours d'eau aux exutoires du bassin versant ;
- Q_{Exp} : Exportations hors du bassin versant ;
- ΔRés : Variation de la réserve entre le début et la fin de la période considérée ;
- ΔRFU : Variation de la réserve facilement utilisable entre le début et la fin de la période considérée.

Sur base pluriannuelle, les termes ΔRés et ΔRFU peuvent être négligés.

La validation du modèle repose dès lors sur l'égalité suivante :

$$P - ETR = Q_{Riv} + Q_{Exp}$$

Où :

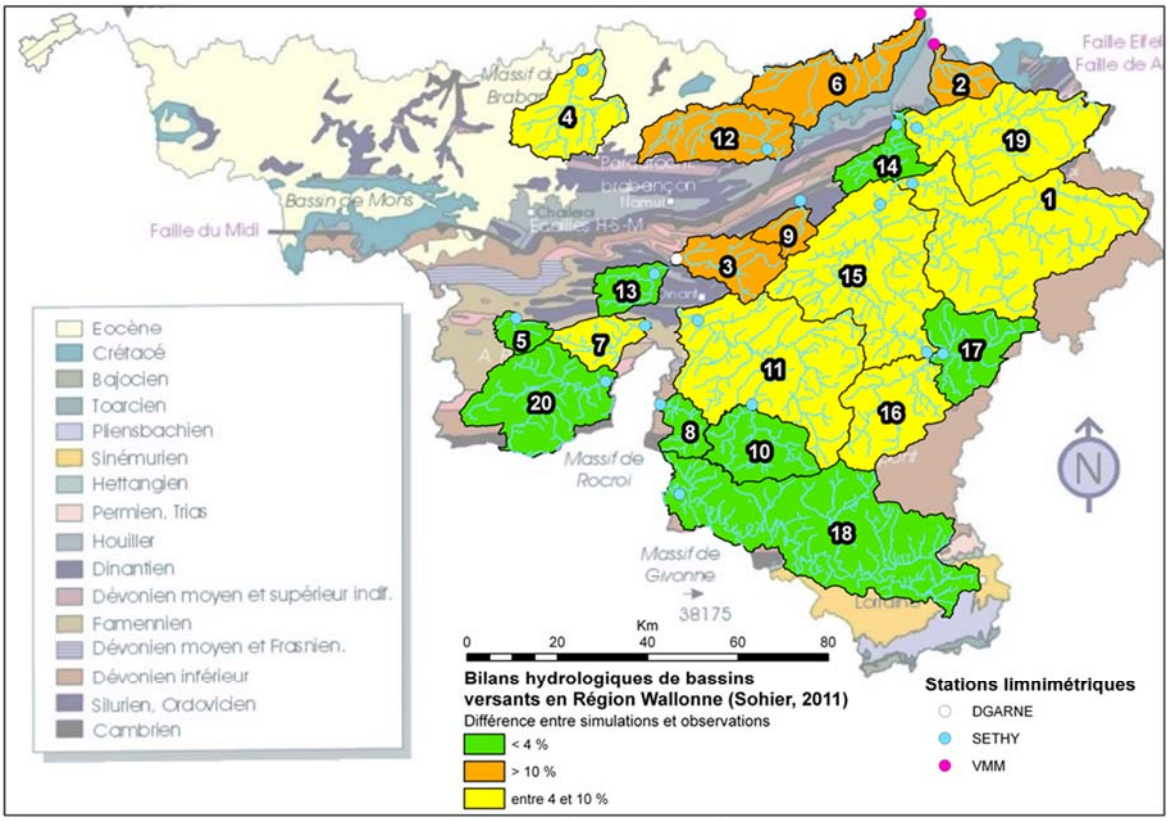
- P-ETR (Eau utile) est un paramètre calculé par EPIC-grid et correspond à l'écoulement simulé;
- Q_{Riv} et Q_{Exp} sont des paramètres mesurés.

Aucun calage du modèle n'étant réalisé, des différences significatives entre l'écoulement simulé (P-ETR) et les écoulements mesurés (Q_{Riv}) devraient pouvoir mettre en évidence un ordre de grandeur de l'importance des exportations éventuelles hors du bassin (Q_{Exp}) (par pompage, par transferts souterrains, etc).

La validation du module hydrologie du modèle EPIC-grid repose sur la comparaison entre l'écoulement simulé par EPIC-grid et l'écoulement mesuré issu des données de débits des cours d'eau mesurés au droit de stations de jaugeage de la DGARNE (SPW - DGO3) pour les cours d'eau non-navigables, du SETHY (SPW - DGO2) pour les cours d'eau navigables et de la VMM (Vlaamse Milieu Maatschappij) pour les exutoires de bassins localisés en Flandre.

De manière générale, la concordance entre écoulement simulé et écoulement mesuré est satisfaisante. La différence est de moins de 10% pour les bassins réputés sans exportations sensibles (Figure I.11). Hormis pour la Berwinne et la Mehaigne, les bassins présentant une différence de plus de 10 % sont généralement des bassins avérés comme faisant l'objet d'exportations importantes (Geer, Bocq, Hoyoux). Dans ce cas, la comparaison entre les exportations déduites des bilans EPIC-grid et celles estimées par d'autres méthodes (Hallet et Monjoie, 1996 ; Tromme et Monjoie, 2001), indique un ordre de grandeur similaire pour les volumes exportés.

La répartition de l'eau utile (P-ETR) entre les différents processus d'écoulement (ruissellement direct, écoulement hypodermique lent et percolation) a également été validée en comparant, pour quelques bassins, les débits journaliers simulés et observés. Cette comparaison est réalisée via l'introduction de fonctions de transfert simplifiées et ne peut se faire que pour des bassins présentant de faibles débits de base (Sohier, 2011). La simulation de débits à l'exutoire des bassins versant nécessite le recours à une modélisation intégrée incluant la modélisation explicite des compartiments « eaux de surface » et « eaux souterraines » et n'est pas du ressort de la seule modélisation EPIC-grid ; ces comparaisons ont été réalisées simplement dans un but de validation de la répartition de l'eau utile (Sohier, 2011). Selon ces comparaisons et pour ces bassins, la répartition de l'eau utile entre ruissellement direct, écoulement hypodermique lent et percolation telle que réalisée par EPIC-grid permet de simuler, au pas de temps journalier, un hydrogramme proche de l'hydrogramme observé.



n°	Bassin versant	Superficie	Précipitations	ETR	Différence entre simulations et observations		Période considérée
		km²	*mm*	*mm*	*%*	*Classe de fermeture*	
1	Amblève - Station de Martinrive	1068	1103	552	6	entre 4 et 10 %	1989-1995
2	Berwinne - Station de Moelingen	129	914	557	13	> 10 %	1991-1998
3	Bocq - Station de Yvoir	227	913	527	26	> 10 %	1989-1995
4	Dyle - Station de Bierges	310	847	549	6	entre 4 et 10 %	1980-2000
5	Eau d'Heure - Station de Silenrieux	79	907	523	-1	< 4 %	1984-2000
	Ry Jaune	7,5	958	569	-5	entre 4 et 10 %	1984-2000
	Ry d'Erpion	4,8	968	553	7	entre 4 et 10 %	1984-2000
6	Geer	465	802	538	86	> 10 %	1975-1995
7	Hermeton - Station de Hastière	166	876	542	5	entre 4 et 10 %	1989-1995
8	Houille - Station de Felenne	114	1147	573	-1	< 4 %	1989-1995
9	Hoyoux - Station de Modave	94	925	541	34	> 10 %	1989-1995
10	Lesse - Station de Daverdisse	302	1150	551	4	< 4 %	1971-1995
11	Lesse - Station de Gendron	1284	1012	546	8	entre 4 et 10 %	1989-1995
12	Mehaigne - Station de Moha	341	769	538	24	> 10 %	1989-1995
13	Molignée - Station de Warnant	125	891	525	4	< 4 %	1989-1995
14	Ourthe - Station de Sauheid	2910	1024	541	0	< 4 %	1989-1995
15	Ourthe - Station de Tabreux	1615	992	537	7	entre 4 et 10 %	1989-1995
16	Ourthe Occidentale - Station de Nisramont	738	1028	546	-6	entre 4 et 10 %	1989-1995
17	Ourthe Orientale - Station de Mabompré	319	1016	540	3	< 4 %	1989-1995
18	Semois - Station de Membre	1230	1231	551	-2	< 4 %	1989-1995
19	Vesdre - Station de Chaudfontaine	680	1066	574	9	entre 4 et 10 %	1989-1995
20	Viroin - Station de Treignes	554	1003	562	-2	< 4 %	1989-1995

Figure I.11 : Bilans hydrologiques de bassins versants en Wallonie – Modèle EPIC-grid (d'après Sohier, 2011).

I.6.2.3. Estimation de la recharge globale des nappes d'eau souterraine de Wallonie pour la période 1995 - 2010

Le modèle EPIC-grid permet de simuler la répartition de l'eau utile en ruissellement direct, ruissellement hypodermique lent et percolation pour chaque entité géographique correspondant aux masses d'eau de surface ou aux masses d'eau souterraine. Le Tableau I.3 présente le bilan hydrologique annuel 2010 simulé pour les 33 masses d'eau souterraine de la Wallonie. Ce même type de bilan a également été réalisé pour les années 1995 à 2009, à l'échelle annuelle et mensuelle. Ces bilans annuels sont annexés à ce rapport.

Masse d'eau	Superficie	P	ETR	RD	RHL	Percolation de base	P	ETR	EU	RD	RHL	Percolation de base
	m²	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*
RWE013	870 133 971	861	558	172	7	103	749	486	264	150	6	90
RWE017	86 861 741	905	535	171	14	150	79	46	32	15	1	13
RWE030	477 432 014	907	551	88	53	175	433	263	170	42	25	84
RWE031	241 733 768	867	544	92	6	184	210	132	78	22	1	44
RWE032	72 550 750	800	548	50	7	180	58	40	18	4	1	13
RWE051	964 840 205	791	544	83	19	120	763	525	238	80	18	116
RWE053	205 850 010	711	535	39	5	85	146	110	36	8	1	17
RWE061	389 398 842	797	551	164	2	78	310	215	96	64	1	30
RWE160	483 824 023	879	570	230	19	39	425	276	150	111	9	19
RWM011	417 403 193	806	532	72	44	128	336	222	114	30	18	53
RWM012	460 640 152	830	520	106	100	61	382	240	143	49	46	28
RWM015	226 796 940	835	501	114	24	167	189	114	76	26	5	38
RWM016	300 197 285	727	475	115	39	75	218	143	76	35	12	23
RWM021	1 660 735 661	847	496	121	106	84	1407	824	583	201	176	140
RWM022	442 872 648	920	530	105	185	61	407	235	173	47	82	27
RWM023	1 504 713 830	858	517	125	147	43	1291	778	513	188	221	65
RWM040	429 369 733	739	520	40	8	129	317	223	94	17	3	55
RWM041	305 462 640	735	541	41	38	70	225	165	59	13	12	21
RWM052	141 721 513	906	533	109	14	220	128	76	53	15	2	31
RWM071	38 152 200	845	436	198	73	73	32	17	16	8	3	3
RWM072	78 379 828	717	454	119	40	67	56	36	21	9	3	5
RWM073	46 079 017	753	442	140	25	119	35	20	14	6	1	5
RWM091	64 138 241	1077	529	135	38	338	69	34	35	9	2	22
RWM092	535 996 023	1163	524	233	103	244	623	281	343	125	55	131
RWM093	132 936 146	1108	536	330	34	213	147	71	76	44	5	28
RWM094	53 425 567	1184	535	364	62	188	63	29	35	19	3	10
RWM100	3 310 726 844	1014	541	158	209	73	3357	1791	1566	523	692	242
RWM102	109 778 086	1210	549	173	286	115	133	60	73	19	31	13
RWM103	1 501 683 208	1095	532	171	286	47	1644	799	845	257	429	71
RWM141	134 244 004	1188	525	157	177	214	159	70	89	21	24	29
RWM142	206 869 093	1022	493	230	165	78	211	102	109	48	34	16
RWM151	286 221 112	879	520	131	41	151	252	149	103	37	12	43
RWR092	53 127 075	1041	544	359	37	111	55	29	26	19	2	6
RWR101	668 137 834	1045	522	176	237	85	698	349	349	118	158	57
Région Wallonne	**16 902 433 197**						**15 612**	**8 946**	**6 665**	**2 377**	**2 097**	**1 587**

Tableau I.3 : Bilan hydrologique EPIC-grid simulé par masse d'eau souterraine pour l'année 2010 – Données Gembloux Agro-Bio Tech (2012).RWE : masses d'eau souterraine du bassin de l'Escaut, RWM : masses d'eau souterraine du bassin de la Meuse, RWR : masses d'eau souterraine du bassin du Rhin (Moselle).

L'analyse des bilans hydrologiques annuels à l'échelle de la masse d'eau permettent de mettre en évidence les variations moyennes annuelles du stock d'eau au sein de la zone vadose. Ceux-ci peuvent être interprétés en termes de mise en place ou de vidange de nappes superficielles temporaires. Ces variations annuelles sont détaillées pour chaque masse d'eau souterraine dans le Tableau I.4. Elles sont exprimées en pourcentage de la lame d'eau utile annuelle. Les valeurs positives correspondent à une augmentation du stock, les valeurs négatives à une vidange du stock et les valeurs nulles à une stabilité du stock à l'échelle annuelle.

Variation moyenne annuelle du stock d'eau dans la zone vadose exprimée en pourcentage de la lame d'eau utile annuelle																
*(EU - RD - RECH - RHL) / EU * 100*																
Année	**1995**	**1996**	**1997**	**1998**	**1999**	**2000**	**2001**	**2002**	**2003**	**2004**	**2005**	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**	**2010**
RWE013	-21	17	5	8	3	2	2	6	-70	5	9	4	1	-1	3	7
RWE017	-13	12	4	9	1	2	3	5	-72	10	5	3	3	-1	4	9
RWE030	-18	16	6	4	7	-5	3	5	-81	14	8	1	0	0	5	11
RWE031	-18	20	7	13	8	3	6	8	-111	1	16	2	8	7	5	13
RWE032	-28	24	18	3	8	-2	-3	8	-95	-1	23	0	-1	-3	4	6
RWE051	-19	20	-1	5	1	-1	2	5	-41	9	-11	10	-1	-3	5	10
RWE053	-28	23	13	12	-7	0	0	8	-103	25	-61	30	10	-23	1	27
RWE061	-24	16	9	4	3	3	0	5	-43	2	11	3	-1	0	2	1
RWE160	-22	17	2	7	1	2	1	5	-54	8	-2	8	-1	-3	3	7
RWM011	-13	13	-4	6	3	-3	2	4	-59	12	-4	8	1	-3	6	11
RWM012	-10	14	-7	9	4	-5	4	4	-59	11	-1	8	2	-5	8	14
RWM015	-12	14	-5	10	5	-4	4	4	-54	7	1	9	3	-5	11	9
RWM016	-5	2	2	9	1	-6	4	5	-42	12	-11	9	3	-3	3	9
RWM021	-8	7	-3	7	3	-4	3	2	-29	5	-2	7	1	-3	6	11
RWM022	-12	18	5	4	6	-3	3	5	-38	9	7	7	0	-1	9	10
RWM023	-8	10	-2	7	5	-5	3	3	-31	6	-1	7	2	-2	7	8
RWM040	-16	16	4	17	-5	-8	4	7	-91	26	-38	20	2	-6	-9	19
RWM041	-24	16	2	18	-3	-5	4	7	-96	18	-46	22	8	-11	-4	23
RWM052	-8	6	3	2	2	0	1	4	-35	6	3	3	-1	-1	5	8
RWM071	4	13	5	14	11	8	11	12	-9	12	6	10	9	8	11	16
RWM072	4	13	10	18	13	8	14	14	-25	21	1	14	14	11	9	14
RWM073	8	4	14	15	13	8	14	14	-18	16	5	17	13	11	13	9
RWM091	-2	1	2	0	2	-1	5	-2	-2	1	2	2	-3	0	5	7
RWM092	-2	2	3	3	3	1	4	-1	-8	3	-3	4	-1	1	7	9
RWM093	-3	2	4	2	3	0	1	2	-11	4	-6	7	-3	0	9	-1
RWM094	-3	2	0	5	3	-1	2	1	-23	9	-10	10	-2	0	10	5
RWM100	-7	5	3	3	3	-4	7	-2	-18	6	-1	3	2	-1	6	7
RWM102	-11	5	3	4	2	-6	13	-9	-23	5	2	2	2	-2	3	13
RWM103	-3	-1	5	1	5	-2	4	0	-7	2	-2	6	-2	0	7	10
RWM141	-16	13	-1	6	2	-6	9	-1	-24	8	-7	5	4	0	5	17
RWM142	-5	3	1	4	4	-7	7	0	-13	4	0	1	3	1	4	11
RWM151	-13	7	-4	8	2	-7	7	-1	-33	11	-11	7	3	-2	4	10
RWR092	-8	11	4	2	3	0	0	3	-16	5	-6	7	-5	0	8	-2
RWR101	-6	2	5	-1	4	-3	6	-4	-10	3	0	3	-2	0	6	5
Région Wallonne	-9	8	2	5	3	-3	4	1	-26	6	-2	6	1	-1	6	17

Tableau I.4 : Variation moyenne annuelle du stock d'eau dans la zone vadose de chaque masse d'eau souterraine pour la période 1996 à 2010 (données Gembloux Agro-Bio Tech (2012)) pour l'ensemble des masses d'eau souterraine de la Wallonie – EU : Eau utile, RD : ruissellement direct, RHL : Ruissellement hypodermique lent, RECH : recharge ou percolation de base, RWE : masses d'eau souterraine du bassin de l'Escaut, RWM : masses d'eau souterraine du bassin de la Meuse, RWR : masses d'eau souterraine du bassin du Rhin (Moselle).

Selon les masses d'eau et selon les années, les variations de stock sont plus ou moins importantes. L'année 2003, année particulièrement sèche, est caractérisée par une très faible quantité d'eau utile (Figure I.12). L'alimentation des nappes superficielles ayant été relativement réduite durant cette période, la variation de stock à l'échelle annuelle se manifeste sous la forme d'une vidange prononcée des nappes temporaires (Tableau I.4).

REGION WALLONNE

Superficie:	16 902 433 197 m²					
	Précipitations		**ETR**		**EU**	
	Mm³	*mm*	*Mm³*	*mm*	*Mm³*	*mm*
1995	17 540	1 038	9 061	536	8 479	502
1996	12 800	757	8 475	501	4 324	256
1997	14 923	883	9 979	590	4 945	293
1998	18 715	1 107	9 143	541	9 572	566
1999	18 598	1 100	9 400	556	9 197	544
2000	18 682	1 105	10 338	612	8 344	494
2001	20 382	1 206	9 355	553	11 027	652
2002	20 101	1 189	9 762	578	10 339	612
2003	13 430	795	9 367	554	4 063	240
2004	16 265	962	10 124	599	6 141	363
2005	14 338	848	9 741	576	4 597	272
2006	16 393	970	9 505	562	6 888	408
2007	18 592	1 100	10 602	627	7 990	473
2008	17 893	1 059	10 059	595	7 834	463
2009	15 514	918	9 448	559	6 066	359
2010	15 612	924	8 946	529	6 665	394

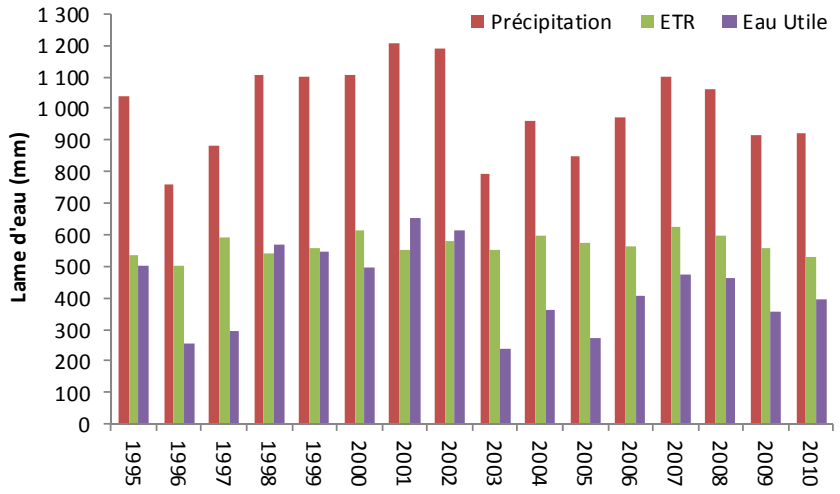


Figure I.12 : Moyenne annuelle des précipitations observées, de l'évapotranspiration réelle et de l'eau utile calculée à partir du modèle EPIC-grid – (Données Gembloux Agro-Bio Tech (2012)) pour les années 1995 à 2010.

De manière globale, la période 1995-2010 est climatologiquement stable. Les variations du stock d'eau dans la zone vadose calculées pour chaque masse d'eau souterraine sur cette période de seize années consécutives sont très faibles, voire proches de zéro (Tableau I.5). Cela signifie que, sur le long terme, les processus de stockage et déstockage au niveau de la zone vadose s'annulent mutuellement. Si les variations de stock tendent vers zéro, la totalité de l'eau utile est, à long terme, exclusivement répartie entre les processus RD, RHL et RECH. Dès lors, la valeur de recharge calculée sur seize ans est :

- représentative de l'alimentation effective des nappes d'eau souterraine de la masse d'eau durant cette période ;
- caractéristique de la séquence climatique stable observée entre 1995 et 2010.

Masse d'eau	Volume total pour la période 1995-2010				Variation moyenne du stock* d'eau dans la zone vadose pour la période 1995-2010
	EU	RD	RECH	RHL	
	Mm³	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*% de EU*
RWE013	4 150	2 416	1 583	187	-1
RWE017	487	225	232	34	-1
RWE030	2 353	528	1 379	479	-1
RWE031	1 077	286	726	67	0
RWE032	315	50	254	22	-3
RWE051	4 428	1 268	2 697	520	-1
RWE053	663	126	506	45	-2
RWE061	1 861	1 254	581	45	-1
RWE160	2 344	1 809	371	160	0
RWM011	1 940	483	1 035	441	-1
RWM012	2 285	782	556	894	2
RWM015	1 217	389	702	138	-1
RWM016	1 459	631	516	309	0
RWM021	9 689	3 609	2 652	3 290	1
RWM022	2 744	764	443	1 415	4
RWM023	9 254	3 507	1 166	4 314	3
RWM040	1 837	304	1 423	142	-2
RWM041	1 207	255	638	320	0
RWM052	841	214	581	68	-2
RWM071	237	114	51	49	10
RWM072	407	174	121	69	11
RWM073	270	112	107	26	9
RWM091	671	177	438	69	-2
RWM092	5 710	2 265	2 441	982	0
RWM093	1 353	756	503	104	-1
RWM094	517	312	149	56	0
RWM100	28 618	10 174	4 271	13 422	3
RWM102	1 232	403	209	590	2
RWM103	16 331	5 531	1 427	8 768	4
RWM141	1 025	305	350	354	2
RWM142	1 588	770	251	524	3
RWM151	1 708	663	818	249	-1
RWR092	495	349	107	40	0
RWR101	6 160	2 212	1 034	2 777	2
Région Wallonne	116 472	43 214	30 317	40 971	2
Volume moyen annuel RW (Mm³)	7 280	2 701	1 895	2 561	
Superficie RW (m²)	16 902 433 197				
Lame d'eau moyenne annuelle RW (mm)	431	160	112	151	

Tableau I.5 : Variations du stock d'eau dans la zone vadose pour la période 1995-2010 à l'échelle de la masse d'eau souterraine et de la Wallonie – Données Agro-Biotech Gembloux (ULg) (2012) – Superficie RW = Superficie de la Wallonie résultant du cumul des superficies de chaque masse d'eau souterraine calculées à l'aide de l'outil arcmap 9.1 à partir du shapefile DGO3 « limites des masses d'eau souterraines ».

Selon ces observations, l'outil de modélisation EPIC-grid semble à même de constituer un outil d'évaluation de la ressource en eau souterraine annuellement renouvelable représentatif et en adéquation avec les contraintes imposées par la Directive-Cadre sur l'Eau (DCE, 2000) stipulant que cette évaluation requiert l'utilisation de valeurs moyennes annuelles à long terme (LTAA : long term annual average) nécessitant l'analyse de chroniques de données d'au moins 20 années consécutives.

Selon les résultats du modèle EPIC-grid, la recharge globale annuelle en Wallonie est comprise entre 980 millions de m³ (1996) et 2936 millions de m³ (2001). La recharge moyenne, correspondant à la ressource en eau souterraine annuellement renouvelable calculée sur une base de 16 ans (1995 à 2010), est de l'ordre de 1 895 millions de m³, soit une lame d'eau moyenne annuelle de 112 mm (Tableau I.5 et Tableau I.6).

Région Wallonne					
Superficie (m²)	16 902 433 197				
	EU	RD	RECH	RHL	Variation du stock dans la zone vadose
	m³	*m³*	*m³*	*m³*	*% de EU*
1995	8 478 976 584	3 265 080 036	2 378 169 399	3 560 837 372	-9
1996	4 324 230 369	1 734 231 739	980 434 138	1 268 233 696	8
1997	4 944 888 649	1 927 559 622	1 231 770 158	1 668 945 518	2
1998	9 572 275 102	3 287 301 751	2 468 494 249	3 359 367 008	5
1999	9 197 442 221	3 290 778 193	2 334 360 685	3 263 295 894	3
2000	8 344 322 771	2 953 139 255	2 378 650 585	3 249 321 646	-3
2001	11 026 972 439	3 784 249 352	2 936 108 855	3 823 669 570	4
2002	10 338 517 692	3 897 820 943	2 698 874 006	3 593 178 252	1
2003	4 062 913 892	1 898 896 288	1 410 198 368	1 818 685 701	-26
2004	6 141 328 783	2 304 813 475	1 438 938 172	2 008 794 615	6
2005	4 596 730 426	1 844 062 413	1 214 923 654	1 608 613 267	-2
2006	6 887 918 364	2 524 638 631	1 712 216 688	2 267 912 154	6
2007	7 990 356 951	3 039 484 446	2 013 545 156	2 877 067 330	1
2008	7 834 037 845	2 872 560 599	2 077 636 060	2 973 306 493	-1
2009	6 065 911 933	2 212 359 142	1 455 475 974	2 042 747 542	6
2010	6 665 350 038	2 377 477 275	1 587 348 200	1 587 348 200	17
Cumul 1995-2010 (m³)	**116 472 174 060**	**43 214 453 161**	**30 317 144 348**	**40 971 324 258**	**2**
Moyenne annuelle (1995 - 2010) (m³)	7 279 510 879	2 700 903 323	1 894 821 522	2 560 707 766	
Lame moyenne annuelle (1995 - 2010) (mm)	431	160	112	151	

Tableau I.6 : Recharge minimale, maximale et moyenne sur une période de 16 ans à l'échelle de la Wallonie Données Agro-BioTech Gembloux (2012).

I.6.2.4. Comparaison entre la ressource annuellement renouvelable simulée par EPIC-grid et celle évaluée dans le cadre du projet Synclin'Eau (Brouyère, 2009) pour les masses d'eau souterraine RWM011, RWM012 et RWM021.

Afin de confirmer la pertinence du choix du modèle EPIC-grid comme outil d'évaluation de la ressource en eau souterraine annuellement renouvelable, il est nécessaire de vérifier que les gammes de valeurs de recharge fournies sont en adéquation avec les ordres de grandeurs nécessaires au bon fonctionnement des modèles « Eaux souterraines ». Ces derniers ont généralement pour objectif de reproduire des tendances piézométriques régionales, l'évolution interannuelle de bilans hydrogéologiques et/ou des débits de base vers les eaux de surface tout en tenant compte des échanges avec l'environnement des bassins considérés. La calibration de ces modèles est donc construite de manière à refléter au mieux ces trois aspects.

Lors de la réalisation du modèle intégré MOIRA (Programme PIRENE), les valeurs de recharge issues d'EPIC-grid se sont avérées peu compatibles avec les bilans en eau souterraine de la plupart des régions à modéliser et les auteurs craignaient que la répartition de l'eau utile par la méthode EPIC-grid surestime le processus d'écoulement hypodermique lent au détriment de la percolation (Dassargues et al., 2004).

Pour rappel, le ruissellement hypodermique lent (RHL) est défini comme un écoulement latéral qui alimente directement les rivières sans transiter par les eaux souterraines. Par définition, il ne contribue nullement aux fluctuations piézométriques de la nappe d'eau souterraine de base. Il résulte de la vidange de nappes temporaires mises en place suite à l'existence de contrastes de perméabilité au sein de la zone vadose. A priori, ces nappes temporaires sont perchées par rapport à la nappe de base et sans lien direct avec cette dernière. Les écoulements hypodermiques lents s'effectuent plus lentement que le ruissellement direct et plus rapidement que la vidange de la nappe d'eau souterraine de base.

Les Figure I.13, Figure I.14 et Figure I.15 illustrent trois cas de figure extrêmes, théoriques et simplifiés où la zone vadose est le siège d'hétérogénéités de perméabilité et génère un stockage d'eau temporaire à temps de vidange intermédiaire.

Le milieu de type I (Figure I.13) correspond exactement à la définition de l'écoulement hypodermique lent telle que décrite ci-dessus. Le substratum est globalement peu perméable et les contrastes de perméabilité génèrent un stockage d'eau limité perché par rapport à la nappe de base. La vidange s'effectue latéralement, suivant la pente des horizons peu perméables, directement vers le réseau de surface, sans transiter via la nappe d'eau souterraine. Le volume d'eau de ruissellement hypodermique lent n'influence pas la piézométrie de la nappe de base. Le même genre de situation peut être imaginé dans des terrains plus perméables comme des sables, avec des interstratifications imperméables argileuses par exemple.

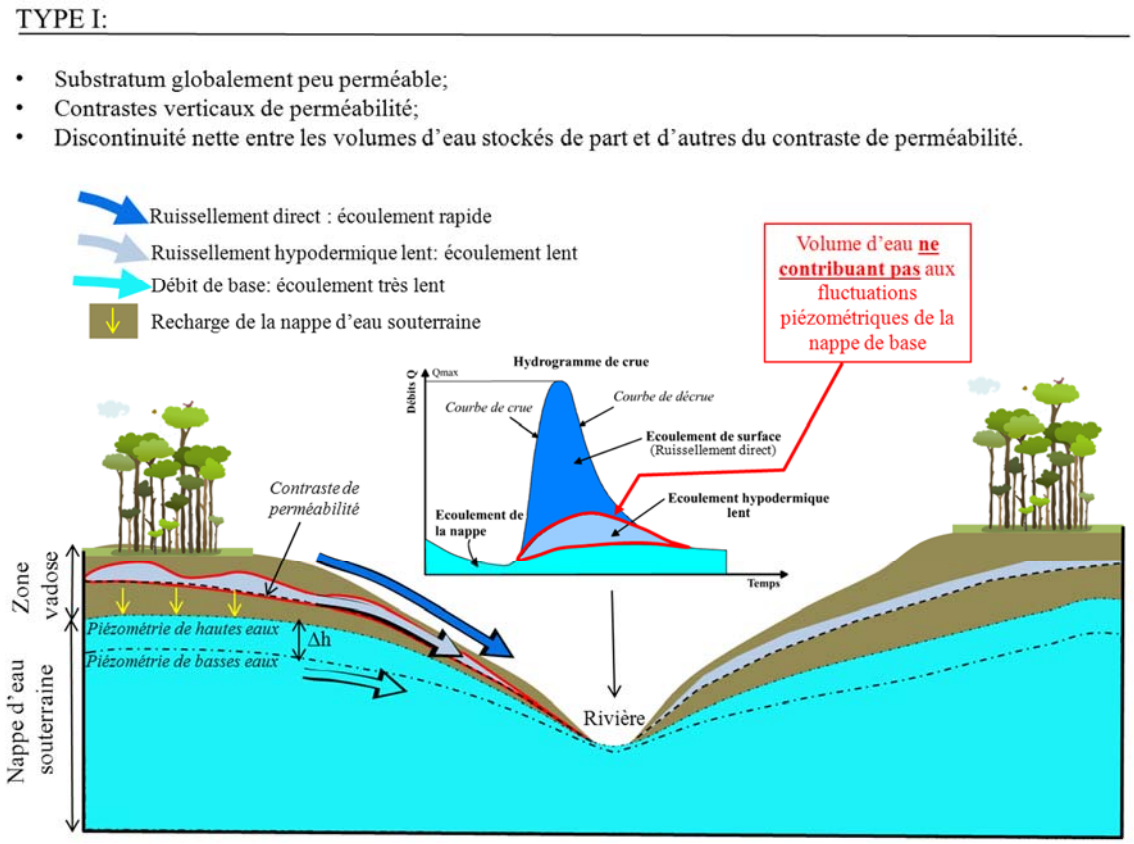


Figure I.13 : Schéma conceptuel d'un milieu où le ruissellement hypodermique lent ne contribue pas aux fluctuations piézométriques de la nappe de base.

Le milieu de type II (Figure I.14) reflète un contexte hydrogéologique proche de celui existant au sein de l'aquifère des grès du Famennien. La partie sommitale des formations gréseuses est composée d'un manteau d'altération sableux plus perméable. Celui-ci évolue, en profondeur, vers une roche plus saine et fissurée générant un contraste de perméabilité. Le stockage d'eau de part et d'autre de ce contraste est continu et constitue une seule et même nappe. La partie sommitale de cette nappe, contenue dans un réservoir plus perméable, aurait cependant l'opportunité de s'écouler plus rapidement vers le réseau de surface que la partie profonde. Il en résulte dès lors une forme de stratification de la partie supérieure de la nappe engendrant une alimentation en deux temps de l'hydrogramme avec une partie de l'écoulement, plus rapide, assimilable à de l'écoulement hypodermique lent au sens EPIC-grid et l'autre partie de l'écoulement, plus lent, assimilable au débit de base. Néanmoins, le volume d'eau assimilé à de l'hypodermique lent contribue bel et bien aux fluctuations piézométriques locales. Il doit donc impérativement être considéré comme de la recharge dans un modèle « eaux souterraines » simulant des bilans hydrogéologiques et de la piézométrie régionale. Notons que ce cas de figure n'empêche nullement l'existence de réels écoulements hypodermiques lents supplémentaires.

TYPE II:

- Substratum globalement peu perméable;
- Contrastes verticaux de perméabilité;
- Continuité et équilibre entre les volumes d'eau stockés de part et d'autre du contraste de perméabilité.

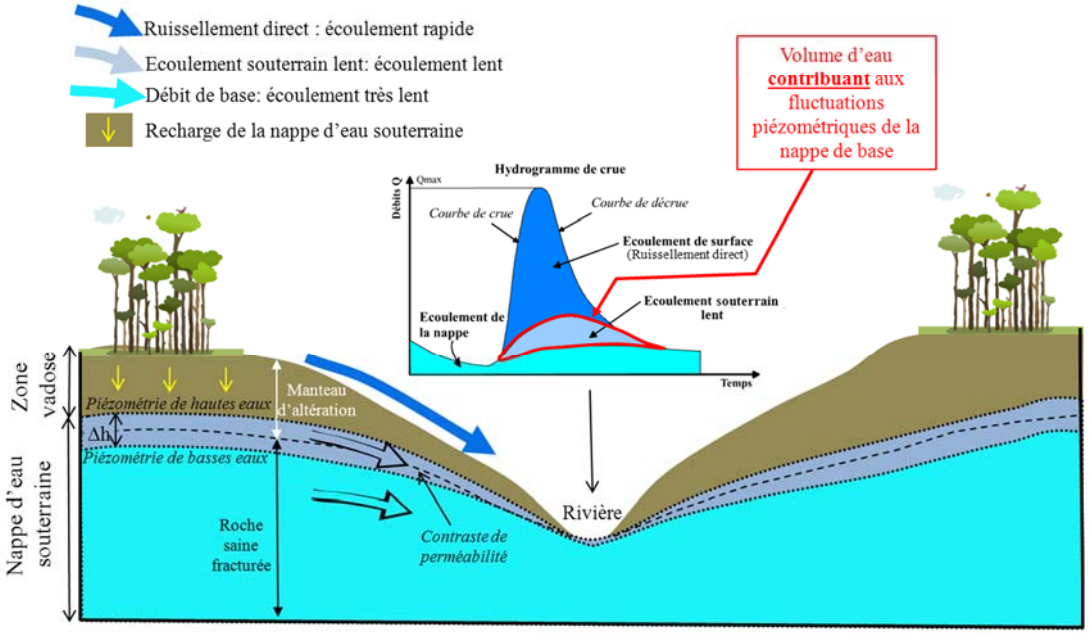


Figure I.14 : Schéma conceptuel d'un milieu type « manteau d'altération » où le volume d'eau de ruissellement hypodermique lent contribue aux fluctuations piézométriques de la nappe de base.

Le milieu de type III (Figure I.15) illustre le cas très particulier du karst. Le substratum calcaire y est très perméable et le ruissellement y est peu développé. Les contrastes verticaux de perméabilité résultent essentiellement du développement de l'épikarst (Figure I.16). L'épikarst est le lieu de stockage de nappes perchées, dont la vidange, complexe en raison de la dualité du karst, s'effectue non pas latéralement comme l'écoulement hypodermique lent, mais par drainage vertical vers la nappe d'eau souterraine de base.

Une partie de l'écoulement vertical peut se faire très rapidement, via des drains préférentiels comme des zones de fractures, de diaclases, élargies par la karstification. Cela engendre une réaction rapide de la nappe de base (Bonniver, 2011, Meus et Hallet, 2011) et les volumes d'eau concernés, transitant par la nappe d'eau souterraine, contribuent également aux fluctuations piézométriques. Ces volumes d'eau alimentent le réseau superficiel durant sa phase de tarissement et, considérés indépendamment de tout processus piézométrique, pourraient être assimilés à de l'écoulement hypodermique lent sur base de l'hydrogramme. Une fois ces volumes d'eau évacués, les gradients piézométriques deviennent faibles et la nappe de base contribue assez peu au soutien du débit d'étiage.

Notons qu'au niveau du modèle EPIC-grid, la gamme de conductivité hydraulique attribuée aux calcaires karstifiés est telle que la répartition de l'eau utile est de type « tout à la nappe » (C.Sohier, com.pers.). Néanmoins, la recharge de ces calcaires pourrait être sous-estimée, notamment dans des régions de type condruzien. Effectivement, le modèle EPIC-grid simule la production de flux sur la maille mais ne génère pas d'échanges entre mailles. Les processus d'infiltration, au sein des calcaires, d'une eau issue du ruissellement direct et/ou hypodermique lent en provenance des crêtes gréseuses environnantes ne peut donc être simulé. Ce processus, contribuant à la recharge, est cependant réellement observé sur le terrain.

TYPE III:

- Substratum globalement très perméable (ex: calcaires karstifiés);
- Contrastes verticaux de perméabilité (ex: lié à la présence d'épikarst);
- Discontinuité nette entre les volumes d'eau stockés de part et d'autres du contraste de perméabilité.

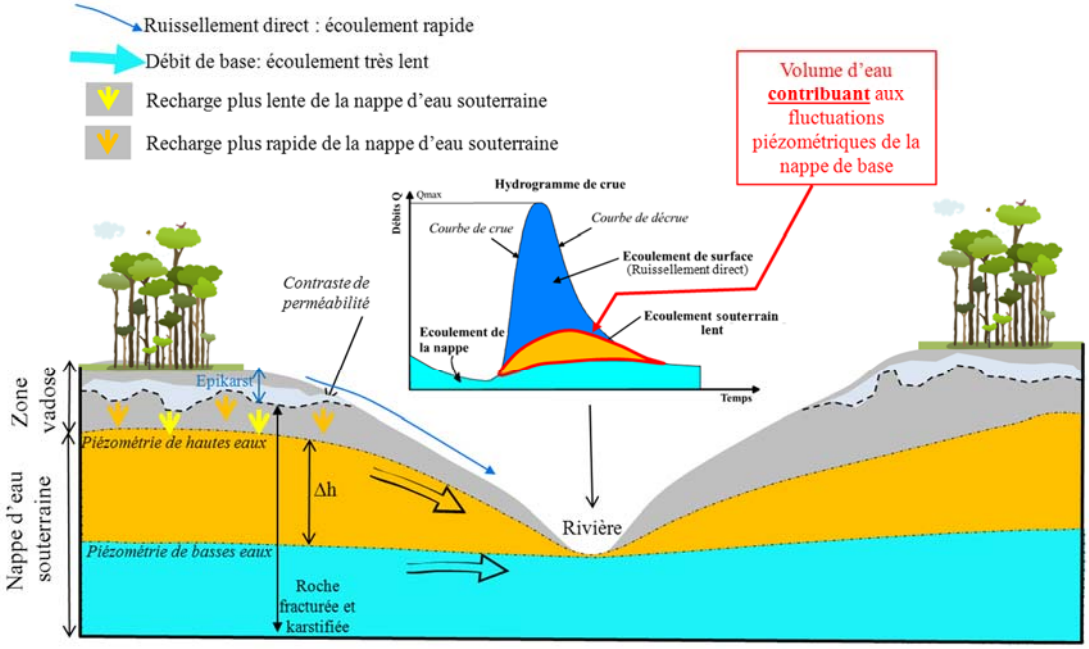


Figure I.15 : Schéma conceptuel d'un milieu type « karst ».

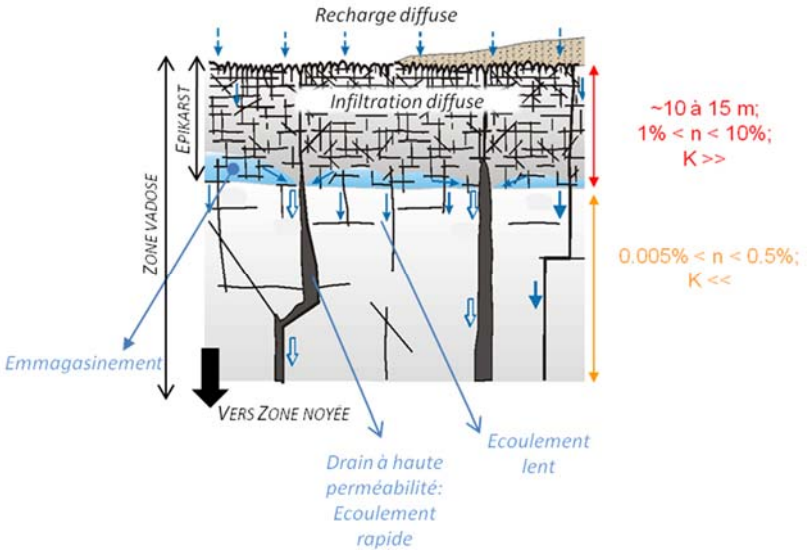


Figure I.16 Caractéristiques hydrogéologiques de la zone épikarstique (d'après Klimchouck, 2004 – modifié) – n : porosité, K : conductivité hydraulique.

Ces trois cas de figures sont, bien-entendu, des modèles conceptuels destinés à démontrer la complexité des écoulements au sein de la zone vadose. La réalité est bien plus complexe car les bassins ou masses d'eau étudiés cumulent les trois cas de figure et leurs intermédiaires. Ils mettent néanmoins en évidence le fait suivant : selon le type de processus (bilans hydrologiques, piézométrie, débit de base) et le milieu (zone vadose, eaux souterraines, etc…) à modéliser, l'interprétation de certaines grandeurs, comme l'écoulement hypodermique lent, peut varier. Cela peut alors engendrer un problème de couplage de ces modèles pourtant efficaces si considérés isolément.

Il a donc été décidé de comparer les valeurs de recharge simulées par EPIC-grid avec des valeurs de recharge évaluées par d'autres méthodes. La méthode retenue est celle développée dans le cadre de la convention RW et SPGE-Aquapôle intitulée « Caractérisation hydrogéologique et support à la mise en œuvre de la Directive Européenne 2000/60/CE sur les masses d'eau souterraine en Wallonie » et généralement mentionnée sous le nom de « projet Synclin'Eau » (Brouyère et al., 2009). C'est sur base de ces valeurs que la recharge utilisée dans les modèles d'écoulement et de transport des solutés développés pour les trois masses d'eau souterraine RWM011, RWM012 et RWM021 a été définie (Délivrable D6.2 de cette convention).

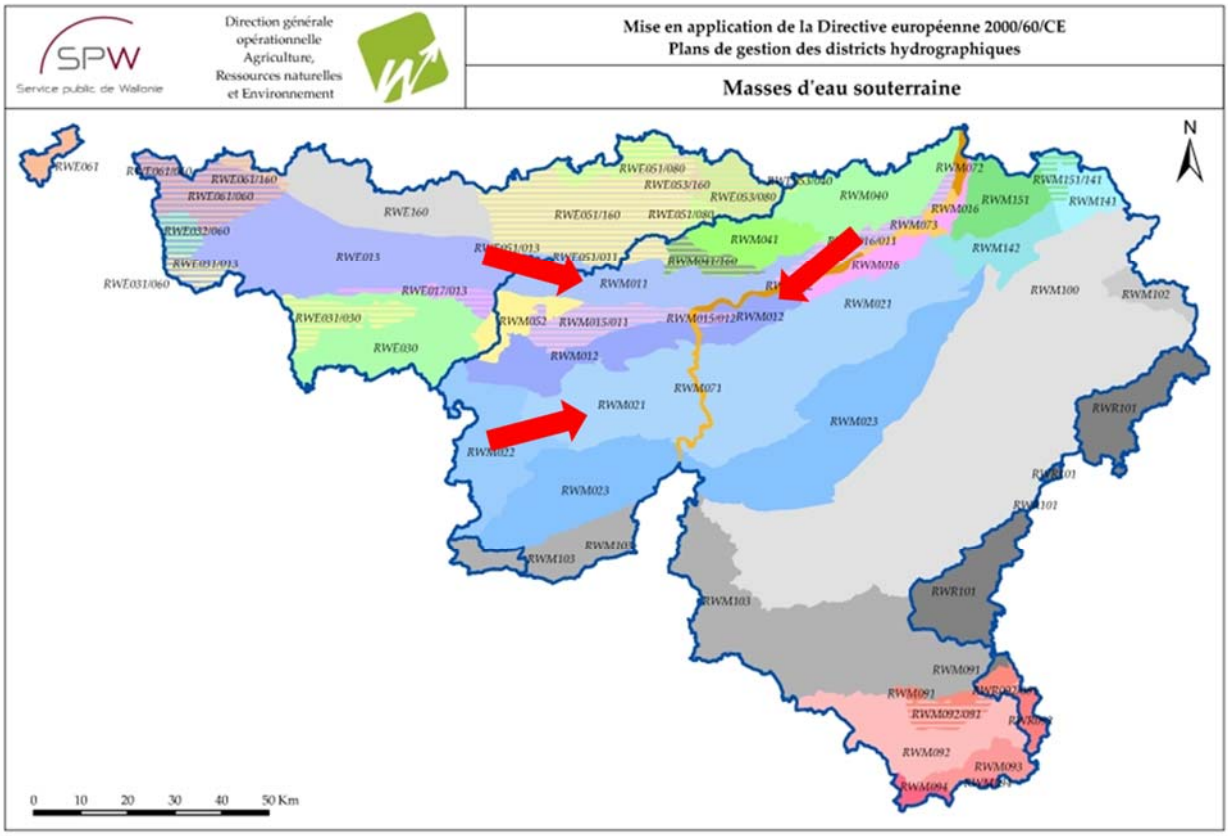


Figure I.17 : Localisation des masses d'eau souterraine RWM011, RWM012 et RWM021 – source DGARNE (DGO3).

La méthode d'évaluation de la ressource en eau souterraine annuellement renouvelable développée dans la cadre du projet Synclin'Eau repose sur une estimation, à partir de bassins de référence, de coefficients d'infiltration moyens propres aux différentes unités hydrogéologiques observées au sein des masses d'eau souterraines RMW011, RWM012 et RWM021. La définition de ces coefficients d'infiltration repose sur l'hypothèse que, à long terme, la recharge des nappes d'eau souterraine de ces bassins peut être assimilée au débit de base à l'exutoire de ces bassins.

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

$$CI = \frac{I}{P-ETR} \quad [1]$$

Où :

- P : Précipitations ;
- ETR : Evapotranspiration réelle ;
- P-ETR : Eau utile (EU) ;
- I : Infiltration (ou recharge ou percolation de base).

Les unités de ces paramètres sont ajustées de manière à obtenir une valeur finale de la ressource en eau souterraine annuellement renouvelable exprimée en m³/an.

Pour un domaine hétérogène de surface totale S composé de i zones homogènes de surface S_i, la recharge peut être définie comme suit :

$$I.S = (\sum CI_i . S_i).(P - ETR) \quad [2]$$

Cette équation peut également être présentée sous la forme suivante :

$$1 = \frac{(\sum CI_i . S_i).(P-ETR)}{I.S} \quad [3]$$

Partant du principe que, à long terme, la recharge des nappes d'eau souterraines (I.S) peut être assimilée au débit de base (Q_w), on obtient :

$$I.S = Q_W \quad [4]$$

Et l'équation [3] devient :

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

Si une partie d'eau souterraine est captée et exportée du bassin, le volume exporté doit être considéré et l'équation [5] devient :

$$1 = \frac{(\sum CI_i . S_i).(P-ETR)}{Q_w + Q_{Out}} \quad [6]$$

Les variations de réserve en eau souterraine (ΔRés) et du stock d'humidité du sol (ΔRFU : réserve facilement utilisable) doivent également être considérées car elles représentent une fraction de la lame d'eau utile. L'équation [6] devient dès lors :

$$1 = \frac{(\sum CI_i . S_i).(P-ETR)}{Q_w + Q_{Out} \pm \Delta Rés \pm \Delta RFU} \quad [7]$$

Pour un bassin composé de calcaires, de grès et de schistes, l'équation [7] s'écrit :

$$1 = \frac{(CI_{Calcaires}.S_{Calcaires} + CI_{Grès}.S_{Grès} + CI_{Schistes}.S_{Schistes}).(P-ETR)}{Q_W + Q_{Out} \pm \Delta Rés \pm \Delta RFU} \quad [8]$$

A l'exception des coefficients d'infiltration (CI), l'ensemble des paramètres de l'équation [8] sont quantifiables par la réalisation de bilans hydrogéologiques sur les bassins de référence. L'équation du bilan est la suivante :

$$P - ETR + Q_{In\ Sout} = Q_{Out} + Q_{Out\ Sout} + Q_T \pm \Delta Rés \pm \Delta RFU \pm \varepsilon_{\ Fermeture} \quad [9]$$

Où :

- P (Précipitations) est un paramètre météorologique fourni par l'Institut Royal Météorologique (IRM) extrapolé pour la superficie totale du bassin grâce à la méthode des polygones de Thiessen ;
- ETR (Evapotranspiration réelle) est un paramètre calculé à l'aide du programme de calcul WaterBudget modifié par l'ULg (Brouyère et al. 2009). Ce programme calcule l'ETR, l'eau utile (P-ETR) et le stock d'eau du sol (ΔRFU) pour un bassin versant à partir de données de température et de précipitations moyennes mensuelles. Ces données sont distribuées selon un canevas de type polygones de Thiessen. Le calcul de l'ETR est réalisé via la méthode de Thornthwaite classique (la RFU peut être totalement asséchée) ou modifiée (décroissance exponentielle de la RFU, celle-ci n'est jamais nulle) ;
- Q_{Out} (Débits exportés) sont des volumes fournis par les producteurs d'eau concernés ;
- Q_{InSout} (Débits entrant échangés avec les aquifères contigus) et $Q_{OutSout}$ (Débits sortant échangés avec les aquifères contigus) sont généralement inconnus et constituent des termes à discuter à la lumière du terme de fermeture du bilan et du contexte hydrogéologique ;
- Q_T (Ecoulement total à l'exutoire) est mesuré au niveau des stations de jaugeage du SETHY (DGO2), de la DGARNE (DGO3) et des stations de jaugeage mises en place dans le cadre du projet Synclin'Eau. Le terme Q_T peut être décomposé en Q_{Ruiss} (Ruissellement) et Q_W (Débit de base à l'exutoire). Ce dernier terme est extrait des hydrogrammes par la méthode VCN3 (débit moyen minimal ou débit moyen d'étiage des cours d'eau enregistrés pendant trois jours consécutifs sur un mois) ;
- ΔRés (Fluctuation de la réserve en eau souterraine) est calculé à partir de coefficients de récession définis par la méthode de Maillet sur base des hydrogrammes à l'exutoire. Pour les bilans considérant de longues chroniques de données et réalisés sur des bassins à piézométrie stable, ce terme devient généralement proche de zéro ;
- $\varepsilon_{Fermeture}$ (Ecart de fermeture du bilan) est un paramètre généralement non nul étant donné la fourchette d'imprécision liée à la quantification des différents paramètres du bilan. Il est communément admis qu'un terme de fermeture compris entre -10 % et + 10 % peut être intégralement imputé à l'erreur sur la mesure. Au-delà, celui-ci est représentatif d'un déficit ($\varepsilon > 0$) ou d'un excédent d'écoulement ($\varepsilon < 0$) probablement lié aux échanges naturels ou anthropiques entre bassins. Pour des bassins étudiés dans le détail, ce seuil peut être abaissé à +/- 5 %.

Considérant que la connaissance et les données acquises via leur bilan hydrogéologique étaient suffisamment fiables et couvraient des périodes suffisamment longues pour lisser les variations temporelles et spatiales, 15 bassins ont été retenus pour la détermination des coefficients d'infiltration (CI). Hormis en ce qui concerne la couverture des sables et sables argileux éocènes, ces 15 bassins sont représentatifs des hétérogénéités lithologiques des masses d'eau souterraines RWM011, RMW012 et RWM021 (Figure I.18 à Figure I.20). Notons dès à présent que :

- 43% de la superficie de la masse d'eau RWM011 sont composés de formations calcaires (carbonifère, givetien-frasnien et hastarien) (Figure I.18);
- 19% de la superficie de la masse d'eau RWM012 sont composés de formations calcaires (carbonifère, givetien-frasnien et hastarien) (Figure I.19) ;
- 45% de la superficie de la masse d'eau RWM021 sont composés de formations calcaires (carbonifère, givetien-frasnien et hastarien) (Figure I.20).

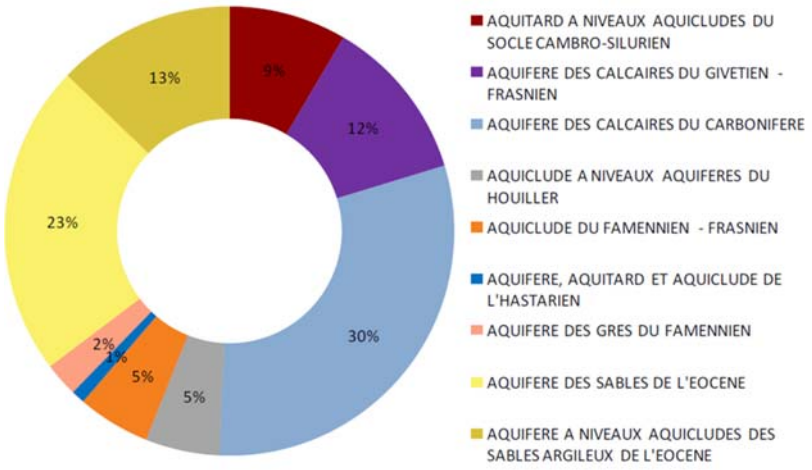


Figure I.18 : Pourcentage de la superficie des différentes unités hydrogéologiques de la masse RWM011 par rapport à sa superficie totale (Brouyère et al., 2009).

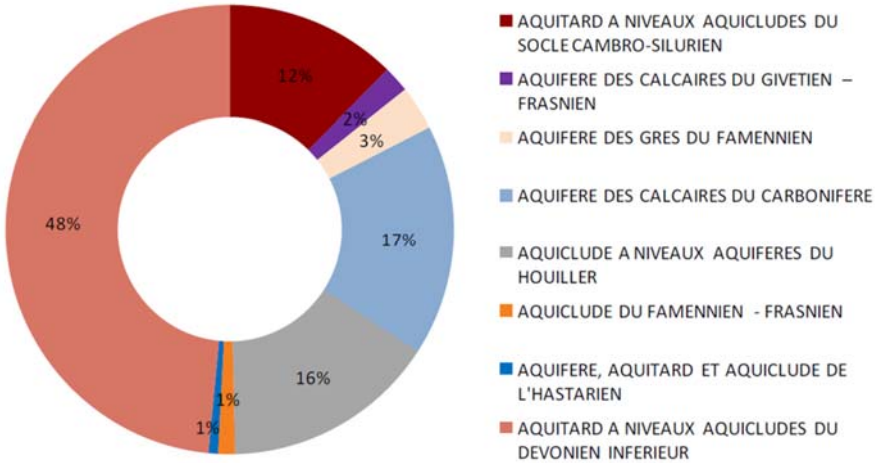


Figure I.19 : Pourcentage de la superficie des différentes unités hydrogéologiques de la masse RWM012 par rapport à sa superficie totale (Brouyère et al., 2009).

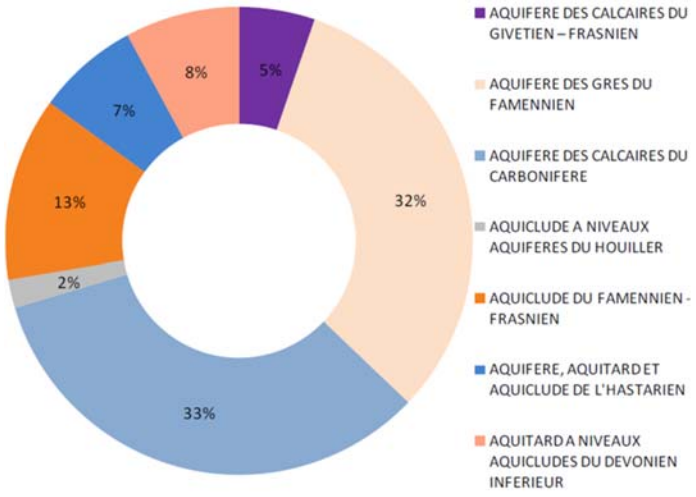


Figure I.20 : Pourcentage de la superficie des différentes unités hydrogéologiques de la masse RWM021 par rapport à sa superficie totale (Brouyère et al., 2009).

A l'exception des sables et sables argileux éocènes n'affleurant pas dans les bassins sélectionnés, les différentes lithologies rencontrées peuvent être regroupées en cinq grands types selon leurs propriétés hydrodynamiques. Cinq coefficients d'infiltration moyens, dénommés comme suit, peuvent dès lors être calculés :

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

Le calcul des coefficients d'infiltration est effectué par la résolution d'un système de 15 équations linéaires (15 bassins) à 5 inconnues (5 coefficients d'infiltration). La résolution de ce système est effectuée par une méthode itérative via une fonction Matlab permettant de contraindre la gamme de coefficients d'infiltration calculés par rapport à des fourchettes de valeurs plausibles initialement définies par les hydrogéologues.

Les valeurs des coefficients d'infiltration calculés sont présentées au Tableau I.7.

$CI_{cc+hast}$	CI_g	CI_{cgf}	CI_{ast+at}	CI_{h+a}
80%	70%	90%	20,6%	21,6%

Tableau I.7 : Coefficients d'infiltration de chaque type d'unité hydrogéologique calculés par la méthode Synclin'Eau (Brouyère et al., 2009).

Les coefficients d'infiltration des terrains de couverture sont tirés d'une étude antérieure réalisée sur les mêmes unités hydrogéologiques par le FPMs en 2002 et sont de 85% pour l'aquifère des sables éocènes et de 75 % pour l'aquifère à niveaux aquicludes des sables argileux de l'Eocène.

L'extrapolation de ces coefficients d'infiltration à l'ensemble des trois masses d'eau a permis de calculer, à partir des valeurs d'eau utile annuelle, la recharge moyenne annuelle en tenant compte de leurs hétérogénéités lithologiques intrinsèques et ce, pour la période comprise entre 1980 et 2007. L'eau utile annuelle à l'échelle de la masse d'eau a été calculée de la même manière que dans les calculs de bilans hydrogéologiques avec le logiciel WaterBudget modifié (Brouyère et al., 2009).

La moyenne, sur une base de 27 ans, de la recharge annuelle moyenne de chacune des trois masses d'eau souterraine constitue l'évaluation « Synclin'Eau » de leur ressource en eau souterraine annuellement renouvelable, avec une gamme de précision de + ou – 37% (Tableau I.8).

Masse d'eau souterraine	Ressource en eau souterraine annuellement renouvelable*	Gamme d'incertitude	Longueur des chroniques de données
	(Mm³)	*(Mm³)*	*(Années)*
RWM011	84	+/- 31	27
RWM012	52	+/- 19	27
RWM021	406	+/- 150	27

** Ressource en eau souterraine annuellement renouvelable = Moyenne de la recharge annuelle de chaque masse d'eau entre 1980 et 2007.*

Tableau I.8 : Ressource en eau souterraine annuellement renouvelable des masses d'eau souterraine RWM011, RWM012 et RWM021 calculée dans le cadre du projet Synclin'Eau sur base d'une chronique de données de 27 années consécutives (Brouyère et al., 2009).

Le Tableau I.9 permet la comparaison de la ressource renouvelable en eau souterraine calculée par EPIC-grid et par la méthode Synclin'Eau sur une base de 13 années consécutives (1995-2007) correspondant à la période couverte conjointement par les deux études. La ressource en eau souterraine EPIC-grid est soit légèrement supérieure (cas des masses d'eau RWM011 et RWM012) soit largement inférieure (cas de la masse d'eau RWM021) à l'estimation basse de cette même ressource évaluée par la méthode Synclin'Eau.

	RWM011		RWM012		RWM021	
	Synclin'EAU	EPIC-grid	Synclin'EAU	EPIC-grid	Synclin'EAU	EPIC-grid
	(Mm³)	*(Mm³)*	*(Mm³)*	*(Mm³)*	*(Mm³)*	*(Mm³)*
1995	74	87	57	48	460	229
1996	47	35	44	19	244	93
1997	36	36	29	23	277	103
1998	123	96	68	42	477	214
1999	137	85	68	43	496	211
2000	119	82	66	46	482	198
2001	142	115	95	59	628	264
2002	135	104	85	53	575	247
2003	54	44	33	27	261	115
2004	71	39	40	22	341	126
2005	44	35	23	20	222	96
2006	86	55	55	31	449	151
2007	97	67	61	36	481	174
Ressource en eau souterraine annuellement renouvelable *	**90**	**68**	**56**	**36**	**415**	**171**
Estimation basse (-37%)	56	/	35	/	261	/
Estimation haute (+37%)	123	/	76	/	568	/

** Ressource en eau souterraine annuellement renouvelable = Moyenne de la recharge annuelle de chaque masse d'eau entre 1995 et 2007.*

Tableau I.9 : Comparaison entre la ressource en eau souterraine annuellement renouvelable des masses d'eau souterraine RWM011, RWM012 et RWM021 calculée dans le cadre du projet Synclin'Eau (Brouyère et al., 2009)et par la méthode EPIC-grid sur base d'une chronique de données de 13 années consécutives.

La comparaison de la recharge moyenne annuelle des masses d'eau souterraine RWM011, RWM012 et RWM021 pour les années 1995 à 2007 évaluée par EPIC-grid et par la méthode Synclin'Eau est présentée aux Figure I.21, Figure I.22 et Figure I.23.

Pour la masse d'eau souterraine RWM011 (Figure I.21), la recharge moyenne annuelle évaluée par EPIC-grid est systématiquement positionnée dans la fourchette inférieure de l'estimation Synclin'Eau, hormis pour l'année 1995 où elle est positionnée dans la fourchette haute et pour l'année 2004 où elle est légèrement inférieure à la gamme de recharge Synclin'Eau.

En ce qui concerne la masse d'eau souterraine RWM012 (Figure I.22), la recharge moyenne annuelle simulée par EPIC-grid est systématiquement fort proche de la limite inférieure de la gamme de recharge calculée par la méthode Synclin'Eau.

Par contre, la recharge EPIC-grid de la masse d'eau souterraine RWM021 (Figure I.23) est systématiquement positionnée largement sous la limite inférieure de la gamme de recharge calculée par la méthode Synclin'Eau.

La question se pose donc quant à l'éventuelle surestimation, au détriment de la recharge, des volumes d'eau destinés au ruissellement hypodermique lent calculés par le modèle EPIC-grid. C'est pourquoi, les valeurs de recharge moyenne annuelle (RECH) et de ruissellement hypodermique lent (RHL) simulés par EPIC-grid ont été sommés afin de déterminer si leur cumul permettait de rejoindre la gamme de recharge évaluée par la méthode Synclin'Eau. Les résultats sont présentés aux Figure I.24, Figure I.25 et Figure I.26.

Pour la masse d'eau souterraine RWM011 (Figure I.24), le cumul RECH + RHL (EPIC-grid) reste dans la gamme de recharge évaluée par la méthode Synclin'Eau et se rapproche de la valeur moyenne, voire de la fourchette haute, hormis pour l'année 1995 où il sort de la gamme et pour l'année 1997 où il est proche de la limite supérieure.

En ce qui concerne la masse RWM012 (Figure I.25), le cumul RECH + RHL (EPIC-grid) excède systématiquement la gamme de recharge évaluée par la méthode Synclin'Eau sauf pour les années 1996 et 2004 où il demeure dans la fourchette haute.

Le cumul RECH + RHL (EPIC-grid) pour la masse RWM021 (Figure I.26) permet d'entrer dans la gamme de recharge évaluée par la méthode Synclin'Eau et d'en atteindre, sinon les valeurs moyennes, au moins la fourchette basse.

Sur base de ces observations, il semble pertinent de tenter de définir dans quelle mesure les volumes d'eau interprétés comme du ruissellement hypodermique lent par le modèle EPIC-grid pourraient être attribués à des processus de recharge, en tout ou en partie, dans le modèle d'eau souterraine.

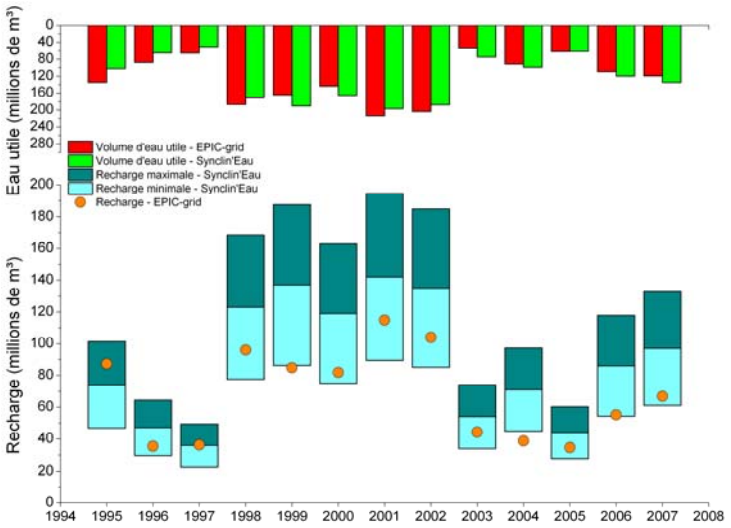


Figure I.21 : RWM011 - Comparaison de la recharge moyenne annuelle calculée par EPIC-grid (données Agro-BioTech – Gembloux, 2012) et calculée par la méthode Synclin'Eau (Brouyère et al., 2009)

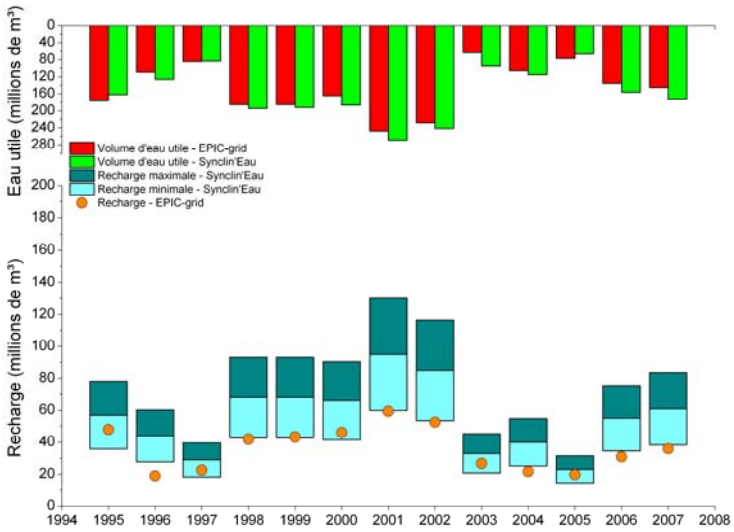


Figure I.22 : RWM012 - Comparaison de la recharge moyenne annuelle calculée par EPIC-grid (données Agro-BioTech – Gembloux, 2012) et calculée par la méthode Synclin'Eau (Brouyère et al., 2009).

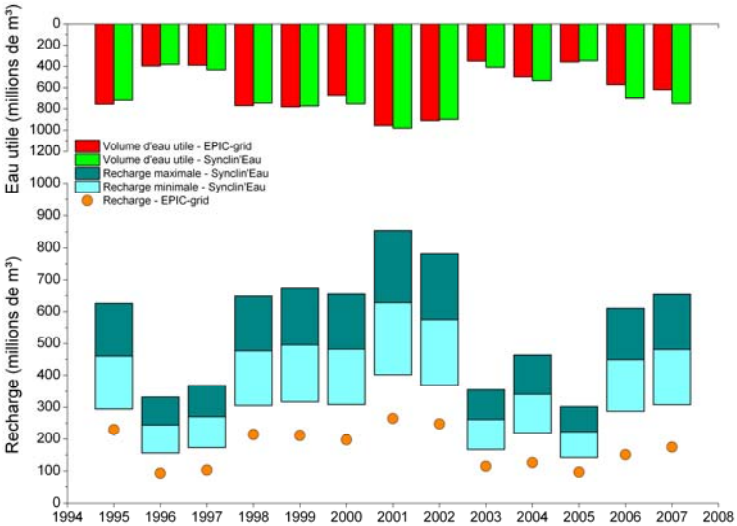


Figure I.23 : RWM021 - Comparaison de la recharge moyenne annuelle calculée par EPIC-grid (données Agro-BioTech – Gembloux, 2012) et calculée par la méthode Synclin'Eau (Brouyère et al., 2009).

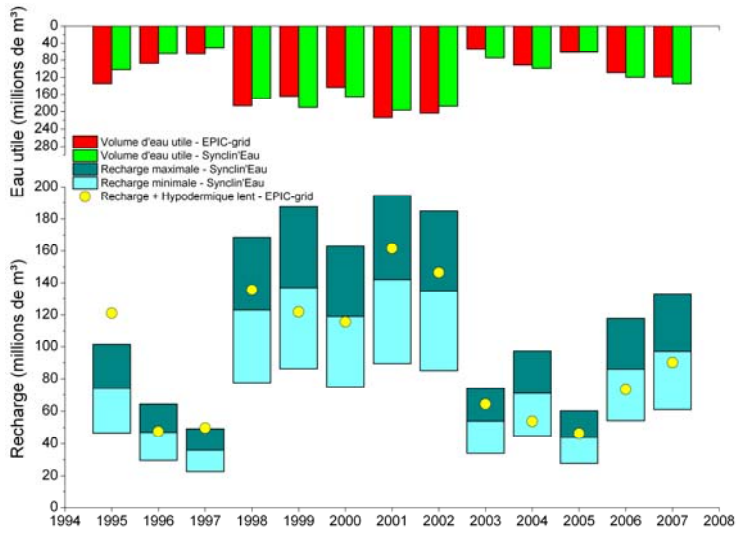


Figure I.24 : RWM011 - Comparaison entre le cumul de la recharge moyenne annuelle et de l'écoulement hypodermique lent calculés par EPIC-grid (données Agro-BioTech – Gembloux, 2012) et la recharge moyenne annuelle calculée par la méthode Synclin'Eau (Brouyère et al., 2009).

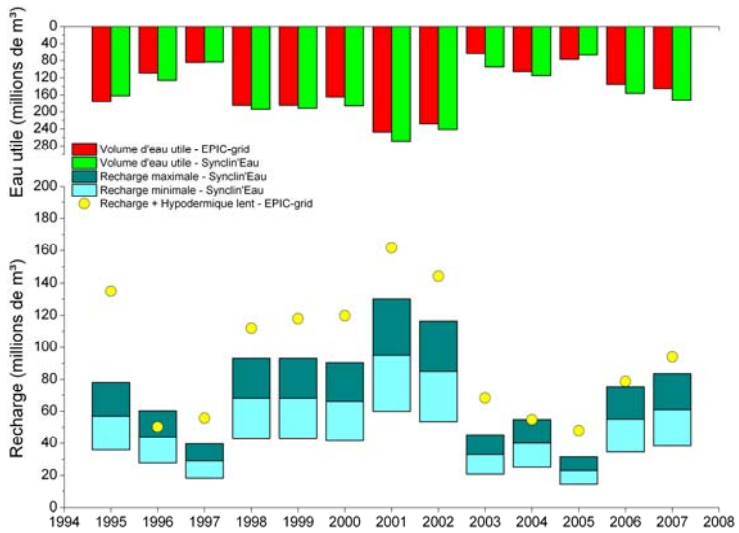


Figure I.25 :RWM012 - Comparaison entre le cumul de la recharge moyenne annuelle et de l'écoulement hypodermique lent calculés par EPIC-grid (données Agro-BioTech – Gembloux, 2012) et la recharge moyenne annuelle calculée par la méthode Synclin'Eau (Brouyère et al., 2009).

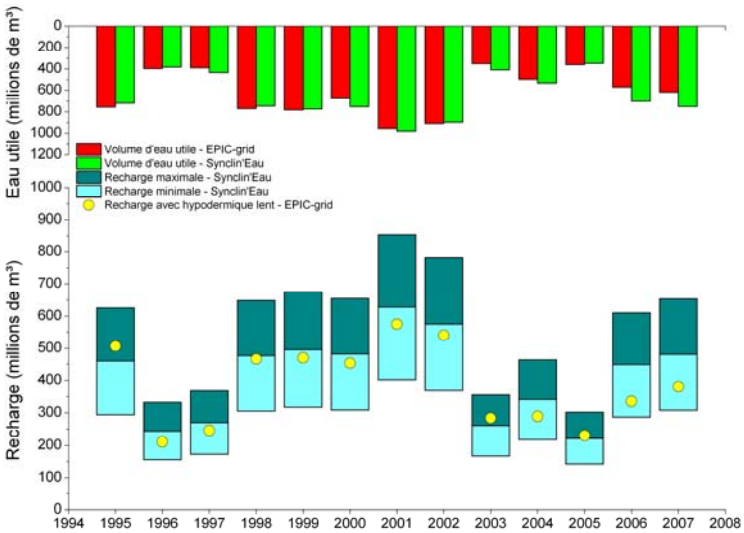


Figure I.26 : RWM021 - Comparaison entre le cumul de la recharge moyenne annuelle et de l'écoulement hypodermique lent calculés par EPIC-grid (données Agro-BioTech – Gembloux, 2012) et la recharge moyenne annuelle calculée par la méthode Synclin'Eau (Brouyère et al., 2009).

Avant d'entrer dans des considérations hydrogéologiques destinées à expliquer ces observations, il est nécessaire de souligner les faits suivants :

La recharge constitue une fraction du volume d'eau utile, or les diagrammes de barres présentés aux figures Figure I.21 à Figure I.26 indiquent que la lame d'eau utile moyenne annuelle utilisée par la méthode Synclin'Eau et celle utilisée par le modèle EPIC-grid sont différentes. En d'autres termes, à coefficients de partage égaux, la recharge sera malgré tout différente. La différence relative entre ces volumes d'eau utile est comprise entre – 34% et + 33% (Tableau I.10). Les différences les plus importantes sont observées au niveau de la masse d'eau souterraine RWM011.

Ces différences de volumes d'eau utile peuvent être induites par plusieurs facteurs. Tout d'abord, le calcul de l'eau utile nécessite une évaluation de l'évapotranspiration réelle (ETR) elle-même dépendante du calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP). Les méthodes de quantification de l'ETP sont différentes selon les études. La méthode Synclin'Eau travaille avec des moyennes mensuelles et un seul paramètre, la température, et utilise la méthode de Thornthwaite (logiciel WaterBudget), tandis que le modèle EPIC-grid travaille à partir de données journalières en utilisant majoritairement la méthode de Penman-Montheith (multiparamètres) pour l'évaluation de l'ETP.

Ensuite, bien que la méthode d'extrapolation des données météorologiques à l'ensemble de la masse d'eau soit identique pour les deux études (polygones de Thiessen), si le réseau de mesure n'est pas le même, la distribution spatiale des données météorologiques va différer. Celle-ci peut même varier au cours du temps selon que des stations météorologiques sont mises en place, ont dysfonctionné ou sont supprimées dans la zone d'étude. Ces différences auront des conséquences sur la valeur annuelle des précipitations et de l'ETR pour l'ensemble de la masse d'eau, et par conséquent sur la valeur annuelle de l'eau utile. Les lames d'eau de précipitations et d'ETR annuelles utilisées par le modèle EPIC-grid et dans la méthode Synclin'Eau sont comparées dans le Tableau I.11. Les différences relatives les plus importantes sont observées pour la masse d'eau RWM011 et peuvent atteindre - 23% pour les précipitations et - 14% pour l'ETR.

Notons finalement que, de manière générale, selon la localisation des stations météorologiques considérées dans une étude, les lames d'eau de précipitation mesurées sur le terrain peuvent être considérablement différentes même sur une faible distance. La preuve en a été faite par les travaux de Persoons et Sulmon (2004) visant à caractériser les incertitudes des mesures hydrologiques. Les épisodes pluvieux des jours 51, 160, 229 et 312 de l'année 1977 ont été comparés en plusieurs points du bassin versant de la Dyle. Lors d'orages localisés (jour 312), des lames d'eau journalières de 60 mm et de 10 à 20 mm ont respectivement été enregistrées en deux points à peine distants de 20 kilomètres. La représentativité de la lame de précipitation moyenne sur une grande étendue sera donc améliorée si le dispositif de mesure permet de la mesurer en de nombreux points.

	MRW 011			MRW 012			MRW 021		
	Eau Utile Mm³		Différence relative	Eau Utile Mm³		Différence relative	Eau Utile Mm³		Différence relative
	EPIC-grid (A)	Synclin'Eau (B)	%	EPIC-grid (A)	Synclin'Eau (B)	%	EPIC-grid (A)	Synclin'Eau (B)	%
1995	134,8	102,2	-32	176,0	161,8	-9	755,6	718,4	-5
1996	87,2	64,9	-34	109,2	126,2	13	395,3	381,4	-4
1997	65,1	50,5	-29	84,3	83,5	-1	388,6	433,0	10
1998	186,6	170,8	-9	184,7	194,3	5	770,6	744,4	-4
1999	164,5	190,2	14	184,7	192,1	4	782,2	773,5	-1
2000	143,6	165,4	13	164,4	186,1	12	670,9	751,4	11
2001	213,7	196,9	-9	247,4	268,6	8	956,6	980,1	2
2002	203,7	187,5	-9	228,0	241,0	5	910,1	896,7	-1
2003	53,4	74,6	28	63,6	94,7	33	350,4	407,3	14
2004	91,4	98,7	7	105,5	115,0	8	496,6	531,8	7
2005	61,8	61,3	-1	77,4	66,5	-16	358,7	346,5	-4
2006	108,9	119,7	9	135,4	156,2	13	569,6	700,3	19
2007	119,4	134,7	11	145,1	172,7	16	617,8	750,2	18

Différence relative: (B-A)/B*100

Tableau I.10 : Comparaison des volumes d'eau utile annuels des masses d'eau souterraine RWM011, RWM012 et RWM021 utilisés dans les méthodes Synclin'Eau et EPIC-grid.

	RWM011					
	Synclin'EAU		EPIC-grid		Différence relative	
	P	ETR	P	ETR	P	ETR
	(mm)	*(mm)*	*(mm)*	*(mm)*	*(%)*	*(%)*
1995	683,6	457,1	842	519	-23	-14
1996	612,6	420,9	680	471	-11	-12
1997	590,4	497,3	701	545	-19	-10
1998	995,2	558,1	987	540	1	3
1999	1022,0	566,3	943	549	8	3
2000	980,8	584,6	927	583	5	0
2001	997,9	526,1	1054	542	-6	-3
2002	1032,7	583,6	1073	585	-4	0
2003	657,9	497,4	677	549	-3	-10
2004	816,9	562,1	807	588	1	-5
2005	678,5	543,5	689	541	-2	0
2006	842,7	543,9	818	557	3	-2
2007	915,7	593,0	858	572	6	4
	RWM012					
	Synclin'EAU		EPIC-grid		Différence relative	
	P	ETR	P	ETR	P	ETR
	(mm)	*(mm)*	*(mm)*	*(mm)*	*(%)*	*(%)*
1995	858	510	923	541	-8	-6
1996	752	469	729	492	3	-5
1997	692	526	761	578	-10	-10
1998	983	548	949	548	4	0
1999	975	557	944	543	3	3
2000	980	578	965	608	2	-5
2001	1121	536	1068	531	5	1
2002	1105	581	1082	587	2	-1
2003	704	512	687	549	2	-7
2004	811	553	822	593	-1	-7
2005	685	540	703	535	-3	1
2006	842	498	849	555	-1	-11
2007	938	564	903	588	4	-4
	RWM021					
	Synclin'EAU		EPIC-grid		Différence relative	
	P	ETR	P	ETR	P	ETR
	(mm)	*(mm)*	*(mm)*	*(mm)*	*(%)*	*(%)*
1995	965	532	976	521	-1	2
1996	681	451	714	476	-5	-5
1997	790	529	806	572	-2	-8
1998	985	537	986	522	0	3
1999	1019	553	1008	537	1	3
2000	1021	569	1013	609	1	-7
2001	1113	523	1100	524	1	0
2002	1112	572	1109	561	0	2
2003	760	516	758	547	0	-6
2004	870	549	880	581	-1	-6
2005	752	543	750	534	0	2
2006	924	501	891	548	4	-9
2007	1013	561	966	594	5	-6

*Différence relative: (Synclin'EAU-EPIC-grid)/Synclin'EAU *100*

Tableau I.11 : Comparaison des lames d'eau annuelles de précipitation et d'évapotranspiration réelle utilisées dans le modèle EPIC-grid (données AgroBioTech – Gembloux) et dans la méthode Synclin'Eau (données Synclin'Eau – source UMons).

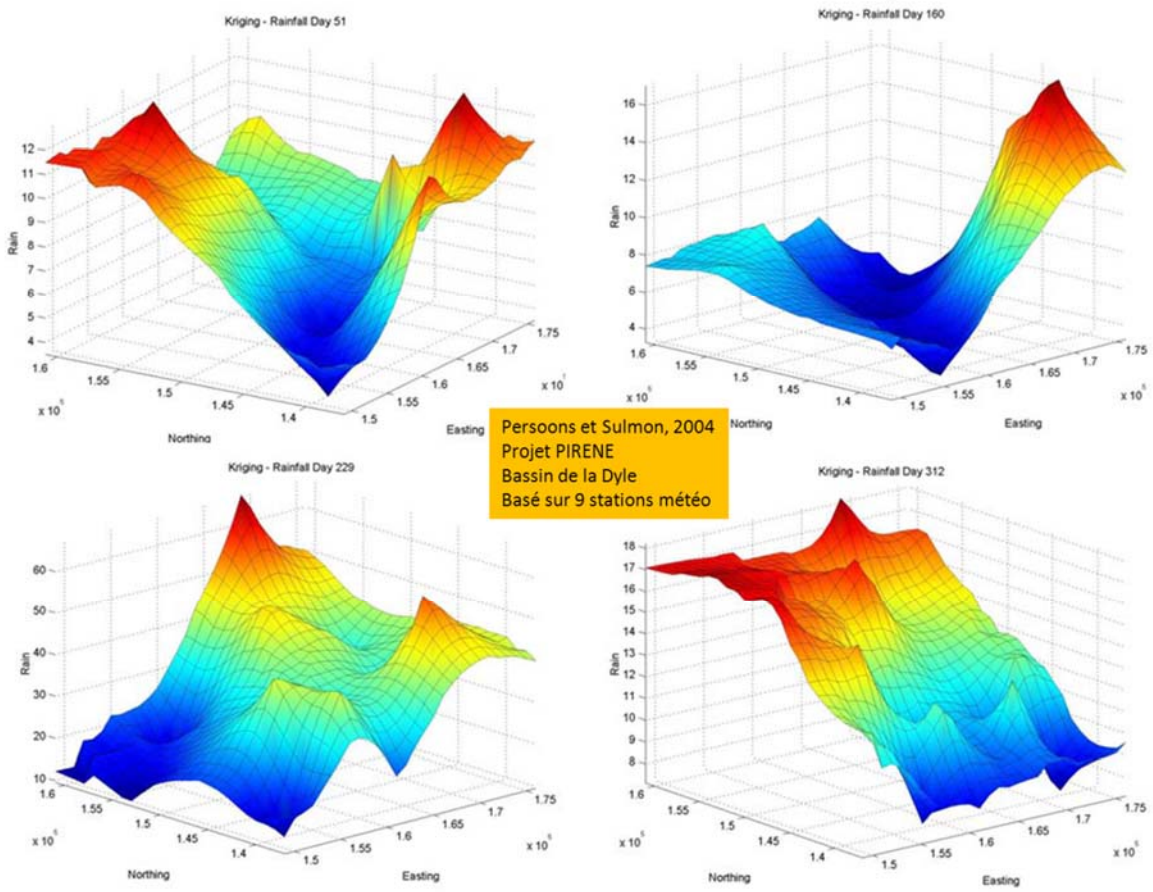


Figure I.27 : Variation spatiale de la lame d'eau de précipitation journalière dans le bassin versant de la Dyle – Année de référence : 1977. X-Y : 1 graduation = 5 km (Persoons et Sulmon, 2004).

L'ensemble de ces constatations introduit inévitablement un biais dans la comparaison des valeurs de recharge issues de la méthode Synclin'Eau et du modèle EPIC-grid. Néanmoins, elle peut être pertinente sur certains points.

Alors que les valeurs de recharge simulées par EPIC-grid semblent sous-estimées par rapport aux besoins des modèles « eaux souterraines » (Dassargues et al., 2004), les coefficients d'infiltration définis par la méthode Synclin'Eau induisent quant à eux une recharge excessive par rapport aux besoins de ces mêmes modèles. Cette méthode d'évaluation reposant sur l'étude des débits d'étiage semble, quant à elle, surestimer la recharge au détriment des écoulements hypodermiques lents. La gamme de précision de la recharge évaluée par les bilans Synclin'Eau étant de +/- 37%, cette dernière constitue un paramètre ajustable et a dû être revue à la baisse lors des travaux de calibration des modèles « eaux souterraines » du projet Synclin'Eau (Brouyère et al., 2009).

Les travaux de modélisation réalisés dans le cadre du projet Synclin'Eau ont pour objectif de reproduire la tendance piézométrique régionale, l'évolution interannuelle des bilans et le débit de base vers les eaux de surface des masses d'eau souterraine RWM011, RWM012 et RWM021 tout en tenant compte des échanges avec leur environnement. La calibration du modèle est donc construite de manière à refléter au mieux ces trois aspects (Brouyère et al., 2009).

Une première calibration du modèle a été réalisée en régime permanent[4] sur base de hauteurs piézométriques moyennes et des bilans hydrogéologiques moyens mentionnés précédemment. L'année de référence du modèle permanent est 2006. La calibration a ensuite été affinée en régime transitoire[5] sur base de l'amplitude des variations piézométriques et de l'évolution des débits de base mesurées durant les années 2006 et 2007 (Brouyère et al., 2009).

Les recharges introduites dans le modèle en régime permanent, pour chaque type d'unité hydrogéologique et pour chaque masse d'eau souterraine, sont détaillées au sein des tableaux suivants : Tableau I.13, Tableau I.14et Tableau I.15 (colonne (A)).

Le Tableau I.12 est destiné à faciliter la lecture des tableaux Tableau I.13, Tableau I.14 et Tableau I.15 et détaille les différentes opérations effectuées.

Colonne	Méthode de calcul
(B)	$(A)/EU_{Synclin'EAU}$
(D)	(B)/(C) * 100
(F)	(E)* Superficie masse d'eau /100
(G)	(B)/1000 * (F)
(H)	Σ (G) de chaque unité hydrogéologique
(K)	$(I) + [((E)_{\text{Calcaires carbonifères}} + (E)_{\text{Calcaires givetiens-frasniens}} + (E)_{\text{aquifère Hastière}})*(J)/100]$

Tableau I.12 : Détail des opérations effectuées dans les tableaux I.13 à I.15.

Les coefficients d'infiltration utilisés dans le modèle Synclin'Eau (colonne (B)) sont inférieurs à ceux calculés par la méthode des bilans hydrogéologiques (colonne (C)). Selon la masse d'eau et selon la lithologie, leur valeur est comprise entre 59% et 80% de la valeur calculée par bilan (colonne (D)).

Le volume annuel de recharge calculé par lithologie à partir des coefficients de partage de la modélisation Synclin'Eau sont détaillés dans la colonne (G). Le cumul de ces recharges correspond au volume de recharge de la totalité de la masse d'eau souterraine (colonne (H)).

La recharge, ou percolation de base, calculée par EPIC-grid pour l'ensemble de la masse d'eau est reportée dans la colonne (I).

En ce qui concerne la masse d'eau RWM011 (Tableau I.13), la recharge EPIC-grid (colonne (I)) est largement inférieure à celle introduite, et supposée idéale, dans le modèle d'eau souterraine (colonne (H)). La différence relative entre ces deux valeurs est de + 18 % (colonne (I)). La recharge étant une fraction de la quantité d'eau utile, si les méthodes de partition de l'eau utile EPIC-grid et Synclin'Eau s'équivalent, le même type de différence relative devrait être observé entre les recharges et entre les eaux utiles simulées par les deux méthodes. La lame d'eau utile calculée par la méthode Synclin'Eau est de 287 mm pour l'année 2006. Celle calculée par EPIC-grid est de 261 mm, soit une différence relative de + 9 %. L'écart se creusant entre les différences relatives après partage, le volume d'eau utile attribué à la recharge par la méthode de partition EPIC-grid semble dès lors inférieur à celui du modèle Synclin'Eau.

[4] Régime permanent : les grandeurs physiques sont considérées comme indépendantes du temps. La modélisation représente des comportements moyens du milieu à l'échelle de l'année par exemple.

[5] Régime transitoire : les grandeurs physiques sont considérées comme dépendantes du temps. La modélisation simule la réponse du milieu suite à des sollicitations évolutives selon un pas de temps journalier ou mensuel par exemple.

En ce qui concerne les masses d'eau souterraine RWM021 et RWM012, les différences relatives sont respectivement de + 19 % et + 13 % pour l'eau utile (EU) et + 49 % et +27 % pour la recharge (Tableau I.14 et Tableau I.15). Les différences relatives passant du simple au double après partage, les volumes d'eau utile attribués à la recharge des masses d'eau RWM021 et RWM012 par la méthode de partition EPIC-grid semblent également inférieurs à ceux du modèle Synclin'Eau.

La différence relative entre la recharge introduite dans le modèle Synclin'Eau et le cumul de la recharge (RECH) et de la totalité de l'écoulement hypodermique lent (RHL) simulés par EPIC-grid (colonne (J)) est de :

- - 10 % pour la masse RWM011 ;
- - 13 % pour la masse RWM021 ;
- - 86 % pour la masse RWM012.

Cela signifie que le cumul RECH + RHL constitue un volume d'eau excédant le volume de recharge nécessaire au bon fonctionnement du modèle « eaux souterraines » Synclin'Eau. Pour les masses d'eau RWM011 et RWM21, cet excédent est modéré ; tandis qu'il est très important pour la masse d'eau RWM012. En d'autres termes, pour satisfaire les besoins du modèle Synclin'Eau, une grande partie du RHL EPIC-grid devrait être convertie en recharge pour les masses d'eau RWM011 et RWM021, et seulement une faible partie pour la masse d'eau RWM012.

D'après les observations effectuées sur ces trois masses d'eau, la nécessité d'interpréter une part des RHL EPIC-grid en tant que recharge semble variable selon le type de masse d'eau souterraine. Les principales différences, d'ordre lithologique, entre les masses d'eau RWM011 et RWM021 et la masse d'eau RWM012, sont :

- La différence de la proportion de formations calcaires par rapport à la superficie totale de la masse d'eau souterraine. Elle est respectivement de 43 % et de 45 % pour les masses RWM011 et RWM021 ; et seulement de 19 % pour la masse RWM012 ;
- La dominance des formations peu perméables au sein de la masse d'eau RWM012. Les aquitards à niveaux aquicludes du Dévonien Inférieur et du socle cambro-silurien représentent 60 % en superficie de la masse d'eau.

Vue dans sa globalité, la masse d'eau RWM012 serait donc à rapprocher du cas de figure I présenté à la Figure I.13 où les écoulements hypodermiques lents constituent un processus bien distinct de la dynamique de la nappe d'eau souterraine de base. Ils ne sont pas ou peu surestimés par la méthode EPIC-grid par rapport aux besoins du modèle Synclin'Eau.

Les masses d'eau RWM011 et RWM021, de par la présence, en proportion plus importantes, de calcaires souvent karstifiés, seraient plus susceptibles de générer des processus de stockage temporaire affectant la piézométrie régionale tels que décrits dans le cas de figure III de la Figure I.15. et affectant, par conséquent, la calibration des modèles « eaux souterraines ».

Cette hypothèse a été testée en comparant la recharge annuelle du modèle Synclin'Eau avec le cumul de la recharge EPIC-grid et d'une fraction des RHL correspondant à la proportion de calcaires par rapport à la superficie totale des masses d'eau, soit 43 % pour la RWM011, 19 % pour la RWM012 et 45 % pour la RWM021 (Tableau I.13, Tableau I.14 et Tableau I.15 – colonne (K)). Pour les masses d'eau RWM011 et RWM021, la différence relative (+ 6 % et + 21 %) entre les deux grandeurs considérées est proche de la différence relative entre les lames d'eau utiles (+ 9 % et + 19 %). A l'échelle de la masse d'eau, cette interprétation des volumes d'eau EPIC-grid, adaptée à la dynamique des nappes d'eau souterraine, satisferait donc les besoins du modèle « eaux souterraines » en régime permanent.

Cette démarche, certes critiquable, pourrait être appliquée sur tout type de lithologie susceptible de stocker des volumes d'eau considérables au sein de la zone vadose et ce, durant une période relativement courte. Néanmoins, au stade actuel de cette étude, il persistera toujours une interrogation sur les proportions de ces volumes d'eau à considérer en tant que ruissellement hypodermique lent ou en tant que recharge. Cette analyse n'a pas la prétention de développer une nouvelle méthodologie pour la répartition de l'eau utile entre les différents processus d'écoulement mais simplement d'attirer l'attention sur le fait que selon les objectifs d'un modèle, une même grandeur, en l'occurrence les volumes d'eau stockés temporairement au sein de la zone vadose, pourrait être interprétée différemment, compliquant le couplage de modèles pourtant efficaces pris isolément.

Il est difficile de définir une méthode simple pour déterminer dans quel cas et dans quelle proportion les écoulements hypodermiques lents doivent être considérés comme de la recharge pour satisfaire l'alimentation des nappes d'eau souterraine. Le test réalisé ci-dessus est bien entendu simpliste et éloigné de la réalité.

En outre, il est important de souligner que :

- Les données disponibles n'ont permis de comparer la recharge EPIC-grid avec une autre méthode que pour trois masses d'eau souterraine, et ce pour l'année 2006 uniquement. Les hypothèses émises ci-dessus nécessitent donc d'être confirmées pour l'ensemble des masses d'eau souterraine de la Wallonie et sur une plus longue période d'analyse;
- Les comparaisons sont réalisées à l'échelle de la masse d'eau et confrontent des recharges annuelles globales calibrées pour un modèle en régime permanent. Aucune conclusion ne peut être tirée concernant le régime transitoire ;
- Il serait intéressant de comparer les recharges annuelles Synclin'Eau pour chaque type de lithologie avec l'équivalent issu de EPIC-grid afin de cibler les lithologies responsables des différences entre les lames d'eau à l'échelle globale de la masse d'eau souterraine ;
- Les hypothèses émises ci-dessus doivent être vérifiées par l'analyse couplée d'hydrogrammes et de chroniques piézométriques et par l'étude des interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface.

Ce qu'il faut surtout retenir de cette analyse, c'est que la valeur de la ressource en eau souterraine annuellement renouvelable calculée en cumulant la recharge annuelle EPIC-grid de chaque masse d'eau souterraine est probablement sous-estimée. La valeur moyenne de 1895 millions de m³ par an constituerait dès lors une valeur minimum de la ressource en eau souterraine annuellement renouvelable.

Le cumul de la recharge et de la totalité des RHL (Tableau I.16) simulés par EPIC-grid constitue en soi un non-sens car cela reviendrait à nier l'existence des écoulements hypodermiques lents. Néanmoins, cette valeur regroupant l'ensemble des volumes d'eau stockés en milieu souterrain à plus ou moins long terme et potentiellement exploitables, il peut être considéré comme la borne supérieure de la gamme de valeurs de la ressource en eau souterraine annuellement renouvelable. La moyenne des cumuls RECH + RHL sur la période 1995 à 2010 est de 4487 millions de m³ (Tableau I.17).

Afin de proposer une valeur en adéquation avec nos observations tout en aménageant une marge sécuritaire, l'ordre de grandeur de la ressource annuellement renouvelable de la Wallonie peut être évalué à 1895 millions de m³. Cette valeur correspond à une moyenne annuelle à long terme calculée sur une base de 16 ans et constitue une valeur minimum.

Modèle régime permanent	RWM011										
Superficie de la masse d'eau (m²)	417 403 193										
Année de référence:	**2006**										
Eau utile:	286,82	*mm/an*	(Synclin'Eau - méthode bilan délivrable D3.12 page 51)								
	261	*mm/an*	(EPIC-grid)								
	Différence relative ((EU $_{Synclin'EAU}$-EU $_{EPIC-grid}$)/EU$_{Synclin'EAU}$*100) :						9%				
	Modélisation Synclin'Eau		Bilan Synclin'Eau	Comparaison coefficient calibré et calculé par bilan	Superficie par lithologie		Modélisation Synclin'Eau		EPIC-grid		
	Recharge introduite dans modèle	Coefficient infiltration	Coefficient infiltration				volume annuel recharge par lithologie	volume annuel recharge pour la masse d'eau	Percolation de base pour la masse d'eau	Percolation de base + totalité de l'écoulement hypodermique lent	Percolation de base + fraction de l'écoulement hypodermique lent correspond à la proportion (en surface) de calcaire
	mm/an			*%*	*% de la superficie totale de RWM011*	*m²*	*m³*	*m³*	*m³*	*m³*	*m³*
	(A)	***(B)***	***(C)***	***(D)***	***(E)***	***(F)***	***(G)***	***(H)***	***(I)***	***(J)***	***(K)***
Aquifère des calcaires du Carbonifère et aquifère à niveaux aquicludes de l'Hastarien	183,56	0,64	0,8	80	31	129 394 989,83	23751744,33	66 863 442	55 097 221	73 462 961	62 994 490
Sables éocènes	183,56	0,64	0,85	75	36	150 265 149,48	27582670,84				
Aquitard à niveaux aquicludes du socle cambro-silurien	47,27	0,16	0,21	78	9	37 566 287,37	1775758,404				
Aquifère des calcaires du Givetien - Frasnien	206,51	0,72	0,9	80	12	50 088 383,16	10343752,01				
Aquiclude à niveaux aquifères du Houiller et aquiclude du Famennien - Frasnien	49,56	0,17	0,22	79	10	41 740 319,30	2068650,225				
Aquifère des grès du Famennien	160,62	0,56	0,7	80	2	8 348 063,86	1340866,017				
					100	417 403 193			**Différence relative:**		
									((H)-(I))/(H)*100	((H)-(J))/(H)*100	((H)-(K))/(H)*100
									18	-10	6

Tableau I.13 :RWM011 - Comparaison de la recharge calculée par la modélisation « eau souterraine » Synclin'Eau (données Synclin'Eau – source ULg) et par EPIC-grid (données Agro-BioTech Gembloux) pour l'année 2006.

Modèle régime permanent	RWM021										
Superficie de la masse d'eau (m²)	1 660 735 661										
Année de référence:	2006										
Eau utile:	421,71	*mm/an*	(Synclin'Eau - méthode bilan délivrable D3.12 page 51)								
	343	*mm/an*	(EPIC-grid)								
	Différence relative ((EU $_{Synclin'EAU}$-EU $_{EPIC-grid}$)/EU$_{Synclin'EAU}$*100) :						19%				
	Modélisation Synclin'Eau		Bilan Synclin'Eau	Comparaison coefficient calibré et calculé par bilan	Superficie par lithologie		Modélisation Synclin'Eau		EPIC-grid		
	Recharge introduite dans modèle	Coefficient infiltration	Coefficient infiltration				volume annuel recharge par lithologie	volume annuel recharge pour la masse d'eau	Percolation de base pour la masse d'eau	Percolation de base + totalité de l'écoulement hypodermique lent	Percolation de base + fraction de l'écoulement hypodermique lent correspond à la proportion (en surface) de calcaire
	mm/an			*%*	*% de la superficie totale de RWM011*	*m²*	*m³*	*m³*	*m³*	*m³*	*m³*
	(A)	***(B)***	***(C)***	***(D)***	***(E)***	***(F)***	***(G)***	***(H)***	***(I)***	***(J)***	***(K)***
Aquitard à niveaux aquicludes du dévonien inférieur	57,91	0,14	0,21	65	8	132858852,9	7693856,17				
Aquiclude du Famennien - Frasnien	60,73	0,14	0,22	/	13	215895635,9	13111341,97				
Aquifère des grès du Famennien	196,8	0,47	0,7	67	32	531435411,5	104586489				
Aquifère à niveaux aquicludes de l'Hastarien	224,91	0,53	0,8	67	7	116251496,3	26146124,03	297 826 037	151 126 945	335 468 603	234 080 691
Aquifère des calcaires du Givetien - Frasnien	253,03	0,60	0,9	67	5	83036783,05	21010797,22				
Aquifère des calcaires du Carbonifère	224,91	0,53	0,8	67	33	548042768,1	123260299				
Aquiclude à niveaux aquifères du Houiller	60,73	0,14	0,22	65	2	33214713,22	2017129,534				
					100	1 660 735 661			**Différence relative:**		
									((H)-(I))/(H)*100	((H)-(J))/(H)*100	((H)-(K))/(H)*100
									49	-13	21

Tableau I.14 : RWM021 - Comparaison de la recharge calculée par la modélisation « eau souterraine » Synclin'Eau (données Synclin'Eau – source ULg) et par EPIC-grid (données Agro-BioTech Gembloux) pour l'année 2006.

Modèle régime permanent	RWM012										
Superficie de la masse d'eau (m²)	460 640 152										
Année de référence:	**2006**										
Eau utile:	339,15	*mm/an*	(Synclin'Eau - méthode bilan délivrable D3.12 page 30)								
	294	*mm/an*	(EPIC-grid)								
	Différence relative (($EU_{Synclin'EAU}$-$EU_{EPIC-grid}$)/$EU_{Synclin'EAU}$*100) :						13%				
	Modélisation Synclin'Eau		Bilan Synclin'Eau	Comparaison coefficient calibré et calculé par bilan	Superficie par lithologie		Modélisation Synclin'Eau		EPIC-grid		
	Recharge introduite dans modèle	Coefficient infiltration	Coefficient infiltration				volume annuel recharge par lithologie	volume annuel recharge pour la masse d'eau	Percolation de base pour la masse d'eau	Percolation de base + totalité de l'écoulement hypodermique lent	Percolation de base + fraction de l'écoulement hypodermique lent correspond à la proportion (en surface) de calcaire
	mm/an			*%*	*% de la superficie totale de RWM011*	*m²*	*m³*	*m³*	*m³*	*m³*	*m³*
	(A)	***(B)***	***(C)***	***(D)***	***(E)***	***(F)***	***(G)***	***(H)***	***(I)***	***(J)***	***(K)***
Aquitard à niveaux aquicludes du socle cambro-silurien	55	0,13	0,21	62	12	55276818,24	3040225,003	42 268 340	30 862 890	78 769 466	45 829 089
Aquifère des calcaires du Givetien - Frasnien	243	0,58	0,9	64	2	9212803,04	2238711,139				
Aquifère des grès du Famennien	189	0,45	0,7	64	3	13819204,56	2611829,662				
Aquifère des calcaires du Carbonifère	216	0,51	0,8	64	17	78308825,84	16914706,38				
Aquiclude à niveaux aquifères du Houiller	55	0,13	0,22	59	16	73702424,32	4053633,338				
Aquiclude du Famennien - Frasnien	55	0,13	0,22	59	1	4606401,52	253352,0836				
Aquitard à niveaux aquicludes du dévonien inférieur	55	0,13	0,21	62	48	221107273	12160900,01				
Aquifère à niveaux aquicludes de l'Hastarien	216	0,51	0,8	64	1	4606401,52	994982,7283				
					100	460 640 152			**Différence relative:**		
									((H)-(I))/(H)*100	((H)-(J))/(H)*100	((H)-(K))/(H)*100
									27	-86	-8

Tableau I.15 : RWM012 - Comparaison de la recharge calculée par la modélisation « eau souterraine » Synclin'Eau (données Synclin'Eau – source ULg) et par EPIC-grid (données Agro-BioTech Gembloux) pour l'année 2006.

"RECHARGE + TOTALITE DE L'ECOULEMENT HYPODERMIQUE LENT" SIMULES PAR LE MODELE EPIC-grid (Mm^3)																	
	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Moyenne sur 16 années
RWE013	136	57	67	136	128	129	186	154	84	60	67	91	104	112	80	96	105
RWE017	20	8	9	20	20	20	28	25	12	10	11	15	15	16	11	14	16
RWE030	159	54	64	146	135	149	201	174	84	58	66	98	101	128	74	109	112
RWE031	70	24	29	59	63	59	87	66	37	24	23	35	37	54	37	46	47
RWE032	20	6	9	21	19	24	33	24	13	8	11	15	18	17	13	14	16
RWE051	237	87	92	312	262	233	348	344	146	141	108	158	203	191	123	134	195
RWE053	52	12	16	49	53	42	57	48	31	21	20	16	37	38	24	19	33
RWE061	43	16	23	48	43	51	66	57	25	19	30	34	42	37	32	31	37
RWE160	42	16	19	45	40	40	53	46	28	22	22	27	34	35	24	28	33
RWM011	121	48	50	136	122	116	162	147	64	54	46	73	90	85	57	72	90
RWM012	135	50	56	112	118	120	162	144	68	55	48	79	94	98	57	74	92
RWM015	74	29	32	60	60	72	89	71	39	32	29	44	52	51	32	43	51
RWM016	69	23	27	64	72	62	78	76	47	37	35	44	51	63	34	34	51
RWM021	507	211	246	467	470	453	575	540	284	289	231	335	380	395	281	316	374
RWM022	168	53	74	152	149	151	199	175	79	74	61	115	127	134	93	109	120
RWM023	504	169	208	429	451	447	558	495	259	251	206	311	358	418	286	286	352
RWM040	108	35	50	127	144	133	134	128	85	71	73	81	109	118	60	59	95
RWM041	81	29	33	84	88	79	91	96	59	44	36	38	59	63	35	33	59
RWM052	50	23	25	51	44	50	68	59	22	26	26	38	43	37	24	33	39
RWM071	9	4	4	8	8	8	10	9	5	5	4	5	6	6	5	6	6
RWM072	14	5	6	15	16	15	19	17	9	9	8	10	12	14	9	8	12
RWM073	10	5	4	10	11	10	12	11	6	6	5	7	8	10	6	7	8
RWM091	37	16	25	37	36	40	45	42	22	29	15	28	33	34	26	24	31
RWM092	251	116	162	249	233	257	302	290	153	195	120	197	226	226	184	186	209
RWM093	43	19	26	39	40	52	55	49	26	35	20	35	43	39	30	33	36
RWM094	17	6	8	12	12	15	22	18	11	8	7	9	14	15	11	13	12
RWM100	1 500	540	755	1 513	1 420	1 371	1 566	1 500	761	914	801	1 023	1 285	1 328	934	934	1 134
RWM102	61	28	38	73	64	58	61	65	32	37	43	48	65	60	40	44	51
RWM103	895	368	466	817	769	883	945	880	451	574	350	587	769	754	548	500	660
RWM141	46	19	27	58	51	50	51	57	32	38	35	43	52	50	37	52	44
RWM142	61	25	30	63	62	55	60	63	37	42	43	52	52	56	43	50	50
RWM151	81	31	40	88	91	83	93	92	51	52	48	52	65	69	46	55	65
RWR092	11	4	7	10	10	11	13	12	6	9	5	10	9	10	7	8	9
RWR101	307	114	178	319	295	293	331	316	160	200	172	226	298	291	196	215	245
Région Wallonne	5 939	2 249	2 901	5 828	5 598	5 628	6 760	6 292	3 229	3 448	2 824	3 980	4 891	5 051	3 498	3 684	**4 487**

Tableau I.16 : Recharge + totalité de l'écoulement hypodermique lent simulés par EPIC-grid (données Agro-BioTech Gembloux).).

Ressource en eau souterraine annuellement renouvelable de la Région Wallonne		
Outil	*EPIC-grid*	
	Recharge	Recharge + RHL
Minimum (Mm^3)	980	2249
Maximum (Mm^3)	2936	6760
Moyenne (Mm^3)	1895	4487

Tableau I.17 : Ressource en eau souterraine annuellement renouvelable de la Wallonie calculée sur une base de 16 ans.

I.6.3. Quantification de la ressource en eau souterraine exploitable de la Wallonie

La quantification de la ressource en eau souterraine exploitable de la Wallonie nécessite de soustraire de la ressource en eau souterraine annuellement renouvelable le volume d'eau annuel réservé, pour l'ensemble de la Wallonie, au maintien de la qualité écologique des eaux de surface.

L'ordre de grandeur de cette valeur n'est pas connu à ce jour. Etant donné la diversité des caractéristiques biophysiques des bassins versants de Wallonie, la définition de débits réservés (*eflows*) devrait idéalement être effectuée à l'échelle du bassin versant par l'étude de bassins pilotes représentatifs. L'extrapolation à l'ensemble du territoire wallon permettrait ensuite d'approximer le volume total d'eau souterraine à réserver.

Ce genre d'étude a notamment été réalisé sur le bassin du Crupet (affluent du Bocq), sous la direction de l'Unité d'Hydrologie et Hydraulique Agricole de Gembloux Agro-Bio Tech (Hirtt, 2009). Plusieurs méthodes d'évaluation du débit réservé y ont été testées. Les principales conclusions de cette étude sont que la quantification du débit réservé, même à l'échelle du bassin, n'est pas chose aisée. Elle nécessite avant tout de s'accorder sur la définition qu'on en fait. Ensuite, elle nécessite d'avoir à disposition des données hydrologiques les plus précises possible servant soit de base de comparaison pour les résultats, soit de base de données pour la mise en œuvre d'une méthode. Selon les hypothèses prises dans le cadre de ce travail et les méthodes employées, le débit d'étiage du Crupet sous lequel il ne faudrait pas descendre est compris entre 0,15 m^3/sec et 0,38 m^3/sec.

Actuellement, lors d'une demande de dérivation d'eau superficielle (par exemple dans le cas des centrales hydroélectriques), la Wallonie ne dispose pas d'une règle générale pour définir le débit réservé dans la partie court-circuitée du cours d'eau. Mais souvent, le débit réservé équivaut au dixième du débit moyen annuel (module interannuel sur au moins 5 ans) (Huart et t'Serstevens, 2006 ; APERe asbl et al., 2003). A l'origine, ce seuil est issu de la Loi sur l'eau de 1992 du Code rural français imposant de maintenir un débit minimal garantissant en permanence la vie, la circulation et la reproduction des espèces. Aujourd'hui ; le document en vigueur en France mentionnant ce seuil de débit réservé est la loi n° 2006-1772 sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA) du Livre II du Code de l'Environnement (Article L.214 – 18) (http://www.legifrance.gouv.fr/).

Tenant compte de ce seuil, une première et grossière estimation du volume d'eau annuel nécessaire au maintien du bon état écologique des eaux de surface de la Wallonie peut être calculée à partir des volumes d'eau annuels entrant et quittant la Wallonie via le réseau superficiel (Tableau I.18). Sur base des données collectées sur la période allant de 2000 à 2009, le volume d'eau moyen annuel quittant la Wallonie via les exutoires principaux est estimé à 11887,3 millions de m³. Notons que cette valeur est légèrement sous-estimée car tous les exutoires ne sont pas considérés (cf seconde partie de ce rapport). Les principales entrées via le réseau hydrographique étant estimées, pour la même période à 6135,4 millions de m³, l'apport d'eau résultant du drainage du territoire de la Wallonie est de 5751,9 millions de m³. Un volume d'eau douce de l'ordre de 1000 millions de m³ étant en moyenne (moyenne 2000-2007) prélevé chaque année (Tableau I.19), le volume d'eau annuel total résultant du drainage, naturel et anthropique, de la Wallonie est de l'ordre de 7000 millions de m³. Si on souhaite réserver 10 pourcent de ce débit moyen annuel, 700 millions de m³ d'eau douce devrait être réservés à l'alimentation des eaux de surface.

Volumes d'eau annuels mesurés aux principales entrées et sorties du réseau hydrographique de la Région Wallonne																
	Escaut		Dendre	Dyle	Gette	Senne	C. Bxls-Charl	Semois	Houille	Viroin	Meuse		C. Albert	Sambre	Our	Sûre
	Entrée	*Exutoire*	*Exutoire*	*Exutoire*	*Exutoire*	*Exutoire*	*Exutoire*	*Exutoire*	*Exutoire*	*Exutoire*	*Entrée*	*Exutoire*	*Exutoire*	*Entrée*	*Exutoire*	*Exutoire*
	Blébaries	Pottes	Deux-Acren	Ottenburg	Hoegaarden	Clabecq	Clabecq	Bohan	Flohimont	Treignes	Heer	Lanaye	Eben-Emael	Erquelinnes	Ouren	
2000	1 024,4	1 194,0	209,7	106,8	34,6	122,9	76,9	1 155,5	118,1	301,1	6 393,2	9 524,9	1 283,7	529,5	220,1	Non précisé
2001	1 513,6	1 764,3	335,7	139,5	41,5	167,0	100,6	1 262,5	135,6	346,6	6 966,1	11 343,8	1 177,8	711,2	272,3	
2002	1 350,3	1 574,0	330,9	152,9	46,9	157,6	116,9	1 116,3	131,2	315,7	6 202,5	10 533,0	1 126,0	607,6	271,9	
2003	837,1	975,8	169,6	127,1	34,9	81,5	71,6	581,0	70,7	162,3	3 300,2	5 322,6	1 114,7	309,6	134,5	
2004	548,1	638,9	115,6	110,5	35,3	71,3	63,9	680,1	73,8	171,2	3 440,7	5 283,2	1 135,4	257,5	167,8	
2005	554,5	646,4	114,8	101,7	30,7	66,4	55,3	507,2	56,5	129,5	2 765,3	4 489,2	1 218,3	261,7	164,9	
2006	637,3	742,9	131,4	84,9	31,3	75,3	57,8	737,0	97,6	219,0	4 216,7	6 466,7	1 209,8	401,1	184,0	
2007	679,1	791,6	158,4	88,3	35,5	99,0	66,0	1 103,7	126,3	248,6	5 821,0	8 736,0	1 146,0	416,1	232,0	
2008	902,2	1 051,7	175,9	103,5	36,5	104,2	69,2	927,5	109,7	262,5	5 269,9	8 330,2	1 116,9	478,5	227,4	
2009	778,1	907,0	137,6	91,6	35,4	74,7	59,1	758,7	93,8	216,3	3 815,5	5 835,1	1 119,8	365,3	173,5	
Moyenne	**882,5**	**1 028,6**	**187,9**	**110,7**	**36,3**	**102,0**	**73,7**	**882,9**	**101,3**	**237,3**	**4 819,1**	**7 586,5**	**1 164,8**	**433,8**	**204,9**	**170,3**

Volume moyen annuel entrant en Région Wallonne	**6 135,4**	**Mm³**
Volume moyen annuel quittant la Région Wallonne	**11 887,3**	**Mm³**
Différence	**5 751,9**	**Mm³**

Tableau I.18 : Volumes d'eau annuels mesurés aux principales entrées et sorties du réseau hydrographique de la Wallonie – source : DGARNE (DGO3) – Etat de l'Environnement Wallon et SETHY – DGO2.

	Prélèvements totaux en eau douce	Eau de refroidissement des centrales hydroéléctriques restitués au système	Volumes d'eau douce prélevés
	Mm³	*Mm³*	*Mm³*
2000	3426	2405	1021
2001	3165	2171	993
2002	2925	1902	1023
2003	2691	1626	1065
2004	2713	1742	972
2005	2604	1735	870
2006	2717	1821	896
2007	2477	1642	836
Moyenne	**2840**	**1880**	**959**

Tableau I.19 : Volumes annuels d'eau douce prélevés en Wallonie – source DGARNE (DGO3) – Etat de l'Environnement wallon (rapportage EUROSTAT 2010).

Sur base de ces estimations et considérant une ressource en eau souterraine annuellement renouvelable de l'ordre de 1895 millions de m³, la ressource en eau souterraine exploitable de la Wallonie serait de l'ordre de 1195 millions de m³. Mais quelle est la réelle représentativité de cette valeur globale par rapport à la réalité des processus hydrogéologiques ? La définition des débits réservés dans le cadre de la gestion des eaux souterraines (e-flows) reposent sur le concept de débit d'étiage a priori représentatif du débit de base des nappes d'eau souterraine. Or l'utilisation du débit moyen annuel intègre tous les volumes d'eau de ruissellement à l'échelle annuelle et à l'échelle de la Wallonie. La définition des débits réservés est un problème multidisciplinaire (hydrogéologues, biologistes, écologistes, etc) devant se résoudre à l'échelle du bassin.

Notons également que la valeur de ressource en eau souterraine exploitable, une fois connue pour l'ensemble de la Wallonie, ne serait qu'une estimation d'un état quantitatif global de la ressource en eau souterraine en Wallonie. Elle ne permettra pas la mise en évidence de problèmes locaux et ne constitue pas à elle seule un outil d'aide à la décision efficace dans le cadre d'une gestion de la ressource en eau souterraine.

La pertinence de la notion de débit réservé à soustraire de la recharge annuelle n'est réelle qu'à l'échelle de l'entité hydrogéologique (bassin versant, masses d'eau de surface ou masses d'eau souterraine). Ce couplage de l'hydrologie des eaux souterraines et des eaux de surface, associé aux prélèvements anthropiques, est un problème hydrodynamique complexe qui doit être étudié à l'échelle locale.

Pour ce faire, nous ne pouvons qu'encourager le recours à la modélisation intégrée incluant la modélisation explicite de divers compartiments intervenant dans le cycle terrestre de l'eau. A ce jour, le modèle intégré le plus proche des objectifs souhaités est le modèle MOIRA développé dans le cadre du programme PIRENE (Programme Intégré de Recherche Environnement-Eau).

Un des objectifs essentiels de ce programme est, via le développement d'une recherche spécifique et multidisciplinaire, de mettre au point les méthodes et les outils utiles et nécessaires à la Wallonie pour la gestion intégrée de l'eau et en particulier pour la mise en œuvre de la directive-cadre sur l'eau (Everbecq et al., 2005).

L'ensemble de la modélisation choisie consiste à traiter d'emblée l'ensemble du territoire de la Wallonie, de ses eaux souterraines et de ses eaux de surface, tout en gardant la possibilité d'avoir, dans la mesure du possible, des descriptions locales relativement précises (Everbercq et al., 2005).

Le modèle intégré MOIRA inclut plusieurs sous-modèles (modules) couplés représentant le fonctionnement des compartiments sols, eaux souterraines et eaux de surface (rivières du réseau hydrographique), capables de calculer chacun ou séparément les variables « quantité » et les variables « qualité » (Figure I.28).

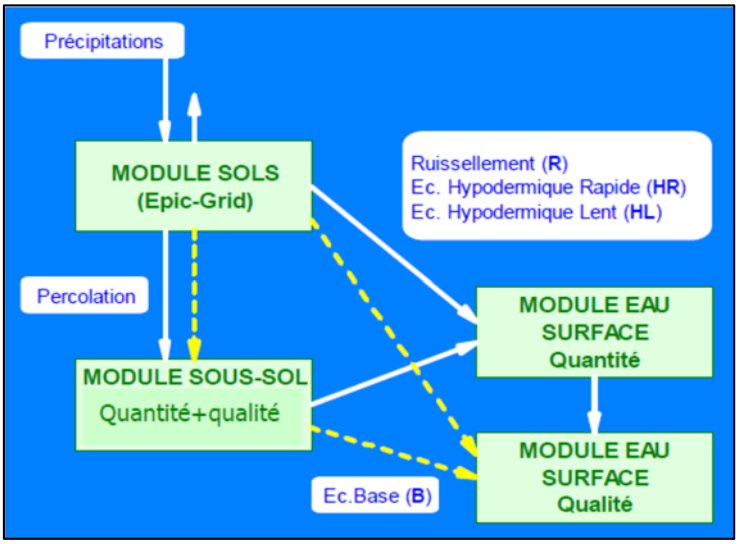


Figure I.28 : Schéma conceptuel des flux quantitatifs et qualitatifs entre sous-modèles au sein du modèle intégré MOIRA (Everbecq et al., 2005)

Le compartiment « sols » est modélisé à l'aide du modèle EPIC-grid décrit précédemment. Le compartiment « eaux souterraines » est modélisé en utilisant une approche par « fonction de transfert ». Les aquifères et parties d'aquifère sont représentés par des réservoirs linéaires et la description de l'écoulement (amortissement et déphasage dans le temps) est assuré par un groupe de fonctions analytiques. Cette représentation permet de générer une réponse cohérente aux échelles de temps et d'espace d'application dans le cadre du projet PIRENE. Néanmoins, la représentation 3-D du compartiment eaux-souterraines nécessite d'être affinée à partir de données précises (Everbecq et al., 2005).

Cette approche de modélisation régionale « eaux souterraines » affinée développée par l'ULg au cours de divers projets (PIRENE, AquaTerra) a pu être testée, validée et valorisée de manière effective pour les masses d'eau RWM011, RWM012 et RWM021 grâce aux informations et nouvelles connaissances collectées dans le cadre du projet Synclin'Eau (Brouyère et al., 2009 – Délivrable D6.1). Il avait été envisagé que les modèles développés dans le cadre du projet Synclin'Eau soient fournis à l'unité de modélisation de l'Aquapôle en vue de leur intégration dans la structure du modèle intégré MOIRA (Brouyère et al., 2009 – Délivrable D6.0).

Sans doute serait-il intéressant de voir avec les concepteurs et les gestionnaires de ces outils de modélisation dans quelle mesure la modélisation intégrée pourrait permettre de répondre de manière concrète à la problématique de l'évaluation de la ressource en eau souterraine exploitable. Les modèles « eaux souterraines » des masses d'eau RWM011, RWM012 et RWM021 étant opérationnels, il serait probablement plus efficace de concentrer, au moins dans un premier temps, les efforts sur ces trois masses d'eau souterraine et de voir dans quelle mesure il est possible de simuler des scenarii d'exploitation de ces masses d'eau et d'en caractériser les effets. Notons finalement que, même le modèle le plus abouti ne pourra répondre correctement à la question de l'évaluation de la ressource en eau souterraine exploitable s'il n'est pas contraint par des seuils de débits réservés préalablement définis.

I.7. CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Plusieurs constats ont permis de conclure qu'il est, à ce jour, nécessaire de réviser la valeur de référence de 550 millions de m³ (Derycke et Fried, 1982) de la ressource en eau souterraine exploitable de la Wallonie. Cette valeur ayant été majoritairement estimée à partir des volumes d'eau d'exploitation de l'année 1978, il semblait intéressant d'aborder le problème selon un autre angle de vue, intégrant à la fois la notion de recharge et de vidange des aquifères et ce, sur une période prolongée.

Cette méthode nécessite l'évaluation de deux grandeurs :

- La ressource en eau souterraine annuellement renouvelable ;
- La ressource en eau souterraine exploitable.

Cette étude est menée dans un contexte d'application de la Directive-Cadre sur l'Eau 2000/60/CE (DCE) dont un des objectifs est d'acquérir une vue concrète de l'état quantitatif de la ressource en eau souterraine à l'échelle de la masse d'eau. Les outils sélectionnés pour répondre aux objectifs de cette étude permettent cette réévaluation à l'échelle de la Wallonie tout en offrant la possibilité d'une évaluation à moindre échelle.

La quantification de la ressource en eau souterraine annuellement renouvelable correspond à la recharge des aquifères. Elle a été réalisée à l'aide des résultats de simulation EPIC-grid de bilans hydrologiques « sol et zone vadose » pour la période 1995 – 2010 et par masse d'eau souterraine (Agro-BioTech Gembloux - ULg)).

Dans un premier temps, les résultats du modèle EPIC-grid ont été interprétés indépendamment de tout couplage avec un modèle « eaux souterraines ». Pour la période analysée, la recharge globale en Wallonie est comprise entre 980 millions de m³ (1996) et 2936 millions de m³ (2001). La recharge moyenne, correspondant à la ressource en eau souterraine annuellement renouvelable calculée sur une base de 16 ans (1995 à 2010), est de l'ordre de 1 895 millions de m³, soit une lame d'eau moyenne annuelle de 112 mm. Compte-tenu de la stabilité, à long terme, du stock d'eau en zone vadose, cette valeur est représentative de l'alimentation effective des nappes d'eau souterraine durant cette période et caractéristique de la séquence climatique stable observée entre 1995 et 2010.

L'outil de modélisation EPIC-grid semble donc constituer un outil d'évaluation de la ressource en eau souterraine annuellement renouvelable représentatif et en adéquation avec les contraintes imposées par la Directive Cadre sur l'Eau (DCE, 2000) stipulant que cette évaluation requière l'utilisation de valeurs moyennes annuelles à long terme (LTAA : long term annual average) nécessitant l'analyse de chroniques de données d'au moins 20 années consécutives. Il présente également l'avantage d'être conçu de manière à générer les bilans hydrologiques par masse d'eau souterraine et par masse d'eau de surface. Il fait l'objet d'une mise à jour régulière, et pour peu que les données nécessaires soient disponibles, de nouvelles simulations peuvent être rapidement obtenues.

Les valeurs de recharge simulées par EPIC-grid ont ensuite été comparées avec les valeurs de recharge nécessaires au bon fonctionnement d'un modèle « eaux souterraines ». Le modèle sélectionné est celui développé par les hydrogéologues de l'ULg et appliqué aux masses d'eau souterraine RWM011, RWM012 et RWM021 dans le cadre du projet Synclin'Eau (Brouyère et al., 2009).

Ces comparaisons ont permis de mettre en évidence que les valeurs de recharge simulées par EPIC-grid étaient plus faibles que celle nécessaires pour parvenir à refléter les tendances piézométriques régionales, l'évolution interannuelle de bilans hydrogéologiques et/ou des débits de base vers les eaux de surface tout en tenant compte des échanges avec l'environnement des bassins considérés lors des travaux de calibration.

Il semblerait que dans certains contextes, les volumes d'eau attribués à du ruissellement hypodermique lent (RHL) par EPIC-grid puissent contribuer aux fluctuations piézométriques de la nappe de base et doivent être interprétés en termes de recharge pour les modèles « eaux souterraines ». Il est évidemment difficile de définir une méthode simple pour déterminer dans quel cas et dans quelle proportion les écoulements hypodermiques lents doivent être considérés comme de la recharge pour satisfaire l'alimentation des nappes d'eau souterraine.

Dès lors, la valeur de la ressource en eau souterraine annuellement renouvelable calculée en cumulant la recharge annuelle EPIC-grid de chaque masse d'eau souterraine est probablement sous-estimée. La valeur moyenne de 1895 millions de m³ par an constituerait dès lors une valeur minimum de la ressource en eau souterraine annuellement renouvelable.

Le cumul de la recharge et de la totalité des RHL simulés par EPIC-grid constitue en soi un non-sens car cela reviendrait à nier l'existence des écoulements hypodermiques lents. Néanmoins, cette valeur regroupant l'ensemble des volumes d'eau stockés en milieu souterrain à plus ou moins long terme et potentiellement exploitables, il peut être considéré comme la borne supérieure de la gamme de valeurs de la ressource en eau souterraine annuellement renouvelable. La moyenne des cumuls RECH + RHL sur la période 1995 à 2010 est de 4487 millions de m³.

Afin de proposer une valeur en adéquation avec nos observations tout en aménageant une marge sécuritaire, l'ordre de grandeur de la ressource annuellement renouvelable de la Wallonie peut être évalué à 1895 millions de m³. Cette valeur correspond à une moyenne annuelle à long terme calculée sur une base de 16 ans et constitue une valeur minimum.

La quantification de la ressource en eau souterraine exploitable de la Wallonie nécessite de soustraire de la ressource en eau souterraine annuellement renouvelable le volume d'eau annuel réservé, pour l'ensemble de la Wallonie, au maintien de la qualité écologique des eaux de surface. L'ordre de grandeur de cette valeur n'est pas connu à ce jour.

Une première et grossière estimation du volume d'eau annuel nécessaire au maintien du bon état écologique des eaux de surface de la Wallonie a été calculée sur base du seuil issu de la loi n° 2006-1772 sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA) du Livre II du Code de l'Environnement (Article L.214 – 18) imposant de maintenir un débit minimal garantissant en permanence la vie, la circulation et la reproduction des espèces. Ce seuil, généralement appliqué en Wallonie dans le cadre des dérivations de cours d'eau liées aux centrales hydroélectriques, est fixé à 10 % du débit moyen annuel (module interannuel sur au moins 5 ans). Le volume d'eau annuel total résultant du drainage, naturel et anthropique, de la Wallonie étant de l'ordre de 7000 millions de m³. Si on souhaite réserver 10 % de ce débit moyen annuel, 700 millions de m³ d'eau douce devraient être réservés à l'alimentation des eaux de surface.

Considérant une ressource en eau souterraine annuellement renouvelable moyenne de l'ordre de 1895 millions de m³, la ressource en eau souterraine exploitable de la Wallonie serait de l'ordre de 1195 millions de m³. Notons que la réelle représentativité de cette valeur globale par rapport à la réalité des processus hydrogéologiques pose question car la définition des débits réservés est un problème multidisciplinaire (hydrogéologues, biologistes, écologistes, etc) devant se résoudre à l'échelle du bassin.

La pertinence de la notion de débit réservé à soustraire de la recharge annuelle n'est réelle qu'à l'échelle de l'entité hydrogéologique (bassin versant, masses d'eau de surface ou masses d'eau souterraine). Ce couplage de l'hydrologie des eaux souterraines et des eaux de surface, associé aux prélèvements anthropiques, est un problème hydrodynamique complexe qui doit être étudié à l'échelle locale.

Pour ce faire, nous ne pouvons qu'encourager le recours à la modélisation intégrée incluant la modélisation explicite de divers compartiments intervenant dans le cycle terrestre de l'eau. A ce jour, le modèle intégré le plus proche des objectifs souhaités est le modèle MOIRA développé dans le cadre du programme PIRENE (Programme Intégré de Recherche Environnement-Eau). Le compartiment « eaux souterraines » du modèle MOIRA est modélisé en utilisant une approche par « fonction de transfert », la représentation 3-D de ce compartiment nécessite d'être affiné sur base de données plus précises (Everbecq et al., 2005)..

Sans doute serait-il intéressant de voir avec les concepteurs et les gestionnaires de ces outils de modélisation dans quelle mesure la modélisation intégrée pourrait permettre de répondre de manière concrète à la problématique de l'évaluation de la ressource en eau souterraine exploitable. Les modèles « eaux souterraines » des masses d'eau RWM011, RWM012 et RWM021 étant opérationnels, il serait probablement plus efficace de concentrer, au moins dans un premier temps, les efforts sur ces trois masses d'eau souterraine et de voir dans quelle mesure il est possible de simuler des scenarii d'exploitation de ces masses d'eau et d'en caractériser les effets.

Notons finalement que, même le modèle le plus abouti ne pourra répondre correctement à la question de l'évaluation de la ressource en eau souterraine exploitable s'il n'est pas contraint par des seuils de débits réservés préalablement définis.

DEUXIEME PARTIE :

Rapportage des grandeurs intervenant dans le calcul des indicateurs globaux de la ressource en eau à l'échelle de la Wallonie.

II. RAPPORTAGE DES GRANDEURS INTERVENANT DANS LE CALCUL DES INDICATEURS QUANTITATIFS GLOBAUX DE LA RESSOURCE EN EAU À L'ÉCHELLE DE LA WALLONIE.

II.1. INTRODUCTION

La mission principale de la Cellule Etat de l'Environnement Wallon est d'élaborer et de réaliser des rapports sur l'état de l'environnement wallon. Elle joue un rôle dans la centralisation, l'évaluation, l'analyse, la valorisation et la transmission de données environnementales et agricoles produites et/ou gérées par la DGARNE. Pour ce faire, un rapportage régulier de ces données, destiné à une analyse statistique, est effectué. En ce qui concerne la problématique de gestion des eaux, cette étude se concentrera sur deux types de rapportage :

- Le rapportage « Inland Waters » du Statistical Office of the European Communities (Eurostat) et de l'Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE) ;
- Le rapportage en phase de test « EEA 2012 State of Water Assessment Vulnerability – Water Exploitation Index + » de l'Expert Group on Water Scarcity and Drought (Expert Group WS & D) of the Common Implementation Strategy (CIS) for the Water Framework Directive (WFD).

II.1.1. Rapportage « Inland Waters » Eurostat – OCDE

Ce questionnaire est destiné :

- à collecter, pour chaque état membre, les données disponibles concernant la ressource en eau ;
- à souligner les changements de l'utilisation de cette ressource.

Les données collectées sont utilisées pour déterminer les efforts qui ont été ou doivent être mis en œuvre pour restaurer ou maintenir une disponibilité en eau de bonne qualité. En ce qui concerne la Belgique, ce rapportage est réalisé à l'échelle de la région. Plusieurs thèmes y sont abordés, dont la ressource en eau douce.

Le Tableau II.1 détaille les différents paramètres collectés. Le Tableau II.2 reprend les définitions simplifiées des différents paramètres demandés et leur correspondance avec les termes employés dans la première partie de ce rapport. La plupart de ces définitions sont basées sur les documents suivants :

- ECE Standard classification of water use (CES/636)
- Systems of Water Statistics in the ECE Region (ECE/Water/43),

et ont été alignées, si nécessaire, sur les définitions du SEEAW (System of Environmental-Economic Accounting for Water).

La première partie de ce travail a permis de souligner que les paramètres

- Precipitation ;
- Actual evapotranspiration ;
- Internal flow ;
- Recharge to the aquifer

mentionnés dans ce tableau pouvaient être évalués à l'aide de l'outil EPIC-grid.

Faisant abstraction des flux souterrains limitrophes difficilement quantifiables mais probablement réduits comparativement aux échanges de surface, les paramètres:

- Actual external inflow : volumes d'eau, en provenance des territoires voisins, entrant en Wallonie via le réseau superficiel et souterrain ;
- Total actual outflow : volumes d'eau quittant la Wallonie vers les territoires voisins via le réseau superficiel et souterrain ;

sont des grandeurs mesurées via les stations de jaugeages de la DGARNE (DGO3) et du Sethy (DGO2).

II.1.2. Rapportage « Water Exploitation Index + »

Ce tableau de rapportage est destiné à mettre à jour les données intervenant dans le calcul de l'indicateur WEI^+ élaboré par le groupe d'experts pour la thématique « *Water Scarcity and Drought* » (http://ec.europa.eu/environment/water/quantity/scarcity_en.htm) dans le cadre de la stratégie commune de mise en œuvre de la Directive-Cadre sur l'Eau (Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive)

Il est réalisé par région et par district hydrographique international (Meuse, Escaut, Rhin et Seine).

La définition de ces paramètres est reprise dans le Tableau II.2.

Notons qu'à ce jour, un travail de compilation des données est encore nécessaire pour obtenir ces grandeurs par district hydrographique international. Dans la suite de ce rapport, les grandeurs nécessaires au calcul du WEI^+ seront abordées à l'échelle de la Wallonie.

Si aucun rapportage n'est effectué, les données reportées par défaut dans ces tableaux sont généralement des données historiques stockées par Eurostat ou Eionet (WISESoE).

INLAND WATERS	TABLE 1: Freshwater resources (a)												
Territory BE-WA BELGIUM-WALLONIA	Contact:												
(10^6 m³)	LTAA	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	1995	1990
Precipitation (1)	15 989,62 b)					14 400,10 a)	16 212,97 a)	13 398,04 a)	20 026,12 a)	20 286,52 a)	18 588,79 a)	17 396,48 a)	13 744,70 a)
Actual evapotranspiration (2)	9 384,14 c)					9 603,74 i)	9 996,88 i)	9 253,17 i)	9 481,21 i)	9 188,97 i)	10 191,01 i)	10 155,25 i)	8 627,50 i)
Internal Flow (b) (3)	6 605,49 h)					4 796,36 d)	6 216,08 d)	4 144,86 d)	10 544,92 d)	11 097,54 d)	8 762,25 d)	7 241,24 d)	5 117,21 d)
Actual external inflow (4)	6 254,66 h)	4 958,92 e)	6 650,66 e)	6 916,23 e)	5 255,06 e)	3 581,54 e)	4 246,34 e)	4 446,93 e)	8 160,51 e)	9 190,85 e)	7 947,08 e)	8 389,76 e)	5 312,05 e)
Total actual outflow (5)	11 791,96 g)h)	9 646,92 g)	12 704,08 g)	13 024,42 g)	10 190,60 g)	7 811,58 g)	8 717,38 g)	9 016,56 g)	16 043,68 g)	17 257,40 g)	14 518,47 g)	12 487,98 g)	10 084,51 g)
of which: into the sea (6)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
of which: into neighbouring territories (7)	11 791,96 g)h)	9 646,92 g)	12 704,08 g)	13 024,42 g)	10 190,60 g)	7 811,58 g)	8 717,38 g)	9 016,56 g)	16 043,68 g)	17 257,40 g)	14 518,47 g)	12 487,98 g)	10 084,51 g)
TOTAL FRESHWATER RESOURCES (8) *[=(3)+(4)]*	12 811,68					8 377,89	10 462,43	8 591,80	18 705,42	20 288,39	16 709,33	15 631,00	10 429,25
Recharge into the Aquifer (9)													
Groundwater available for annual abstraction (10)													
Freshwater resources 95 % of years, LTAA (11)													

YOUR FOOTNOTES →

a)Estimate, calculated from meteorological data.Thyssen method of spatialisation

b) average 1967-2001

c) average 1967-2000

d) calculated as (1) minus (2)

e) estimates (inflow from France only for watercourses, inflow for groundwater not included)

f) average 1985-2005

g) actual outflow into France, Luxemburg and the Flemish Region

$ Wallonia is not concerned

h) average 1990-2009

i) Penmann method

Tableau II.1 : Fiche de rapportage Eurostat/OCDE concernant la ressource en eau douce – année 2010 (source : Etat de l'Environnement Wallon – DGARNE – DGO3).

		Abréviations des tableaux de rapportage	Terminologie des tableaux de rapportage	Terminologie utilisée dans ce rapport	Abréviations utilisées dans ce rapport	Définition
Rapportage "Inland Waters"	Rapportage WEI+	*P*	Precipitation	Précipitation	*P*	Volume total des précipitations atmosphériques (pluie, neige, grêle,…)
		Eta	Actual Evapotranspiration	Evapotranspitration réelle	*ETR*	Volume total évapotranspiré à partir du sol, des zones humides et des volumes d'eau naturels et à partir de la transiration des plantes.
		(= P-Eta)	Internal Flow	Eau utile	*EU*	Volume total d'eau de ruissellement et d'eau souterraine généré, dans des conditions naturelles, à partir des précipitations.
		ExIn	Actual external Inflow	Volumes d'eau entrant en provenance des territoires limitrophes	*External Inflow*	Volume total d'eau douce résultant de l'écoulement des rivières et de l'eau souterraine et provenant des territoires voisins.
		/	Total actual outflow	Volume d'eau sortant vers les territoires limitrophes	*Outflow*	Volume total d'eau douce résultant de l'écoulement des rivières et de l'eau souterraine et quittant le bassin vers des territoires voisins.
		(= P-Eta+ExIn)	Total freshwater ressources	Ressources totales en eau douce	/	Cumul des actual external inflows et de l'eau utile
		/	Recharge into the aquifer	Ressource en eau souterraine annuellement disponible	*RECH*	Volume total d'eau alimentant la zone saturée d'un aquifère
		/	Groundwater available for annual abstraction	Ressource en eau souterraine exploitable	/	Recharge diminuée du taux moyen annuel à long terme de l'écoulement requis pour maintenir la qualité écologique des eaux de surface.
	Rapportage WEI+	*(= P-Eta+ExIn)*	LTAA Freshwater Availability	Disponibilité en **eau douce** à long terme	/	Disponibilité moyenne en eau douce sur une longue période, normalement 20 années consécutives ou plus. Ces valeurs devraient être basées sur des valeurs moyennes annuelles sur une période d'au moins 20 ans.
		ABS	Total Annual Freshwater Abstraction	Volume total annuel d'eau douce prélevé	*Abs*	Tout volume d'eau douce prélevé, quelle que soit la source, qu'elle soit temporaire ou permanente. Les eaux d'exhaure et de drainage sont comprises. Sont exclues les eaux des stations hydroélectriques. Les eaux de pluies prélevées pour utilisation devraient être inclues dans les prélèvements au sein des eaux de surface.
		Cool	Annual Abstraction for Cooling purspose in electricity production	Volume total d'eau annuellement prélevé pour le refroidissement des centrales hydroélectriques	*Cool*	Tout volume d'eau douce prélevé, quelle que soit la source, qu'elle soit temporaire ou permanente, pour le refroidissement des centrales hydroélectriques.
		R	Total Annual Returned Water	Volume total annuel d'eau douce restitué	*Return*	Volume total annuel d'eau prélevé et restitué à la ressource en eau douce que ce soit avant (pertes) ou après (effluents traités ou non) utilisation. Ce terme inclut l'eau directement déversée par les utilisateurs (domestique, industriel,…)

Tableau II.2 : Terminologie, abréviations et définitions des paramètres demandés dans les tableaux de rapportage « Inland Waters » et « WEI+ » - LTAA : Long Term Annual Average

Country	RBD code	River Basin District (RBD) name	*Data source*	*Reference year*	Total Annual Freshwater Abstraction	Annual Abstraction for Cooling pursposes in electricity production	Total Annual Returned Water	*Data Source*	*Reference year*	Precipitation (P) (annual)	Actual Evapotranspiration (Eta) (annual)	External Inflow (ExIn) (annual)	*LTAA Reference period*	LTAA Freshwater Availability (= P-Eta+ExIn)
Belgium	BEEscaut_RW	Scheldt												
Belgium	BEEscaut_Schelde_BR	Scheldt												
Belgium	BEMaas_VL	Meuse												
Belgium	BEMeuse_RW	Meuse												
Belgium	BERhin_RW	Rhine												
Belgium	BESchelde_VL	Scheldt												
Belgium	BESeine_RW	Seine												

Tableau II.3 : Tableau de rapportage WEI⁺ du groupe d'experts WS&D – Phase de test du calcul du WEI⁺

II.2. INDICATEURS QUANTITATIFS GLOBAUX DE GESTION DE LA RESSOURCE EN EAU ACTUELLEMENT UTILISÉS : WEI ET WEI+

II.2.1. WEI

Le WEI, Water Exploitation Index, est un indicateur du niveau de pression exercée par l'activité humaine sur les ressources naturelles en eau d'un territoire afin de définir si ce dernier souffre de problèmes de « *water-stress* » (Update on Water Scarcity and Droughts indicator development – Mai 2012).

Le WEI est défini comme suit :

$$WEI = \frac{Annual\ total\ freshwater\ abstraction}{Available\ long-term\ freshwater\ resources} \quad [1]$$

Où le terme « *Available long-term freshwater resources* » est l'équivalent du terme « LTAA *Freshwater Availabilty »* du Tableau II.2, soit le cumul de (P-Eta) et de ExIn.

Le WEI est donc un indicateur global intégrant à la fois les eaux de surface et les eaux souterraines. Il est généralement calculé sur une base nationale.

Un équivalent pour les eaux souterraines serait l'Exploitation Index largement reconnu par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) et par l'Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE) et défini comme suit :

$$Exploitation\ Index = \frac{Mean\ total\ annual\ demand\ for\ grounwater}{Long-term\ annual\ average\ groundwater\ ressources} \quad [2]$$

Les seuils définis pour le WEI sont les suivants :

- 0 à 20 % : faible stress hydrique (water-stress);
- 20 à 40 % : stress hydrique moyen;
- Plus de 40 % : stress hydrique sévère.

Ces seuils sont des valeurs moyennes empiriques et les régions possédant un WEI inférieur à 40 % peuvent néanmoins connaître des périodes de water-stress sévère durant les périodes d'étiage ou de sécheresse prononcée (EEA report, n/2005).

A l'échelle de la Belgique, et selon le rapport 2005 de l'European Agency (EEA report, 4/2005), le calcul du WEI place la Belgique dans un état de « water-stress » sévère (Figure II.1).

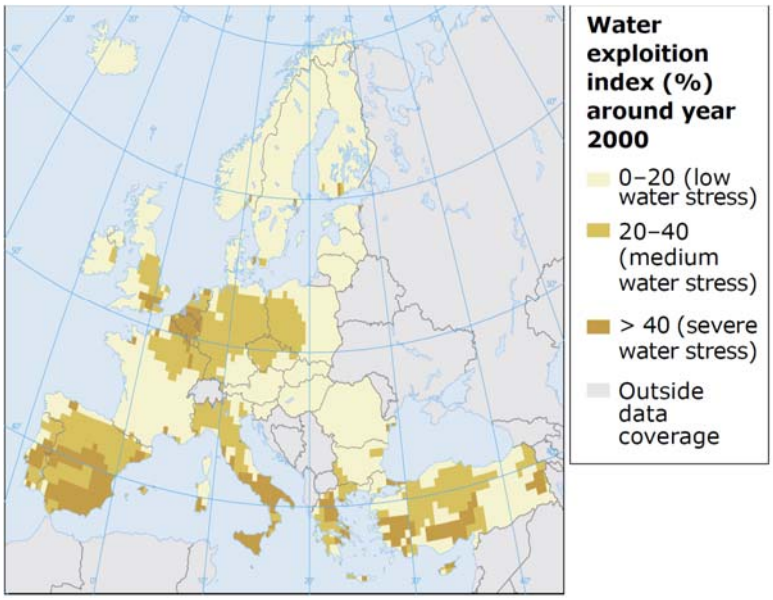


Figure II.1 : WEI en Europe – Source : European Environment outlook, EEA report, N°4/2005.

Une source plus récente (EEA report, N°1/2012) place la Belgique en « medium water-stress » mais le détail par région place la Wallonie en état de « faible water-stress » (Figure II.2).

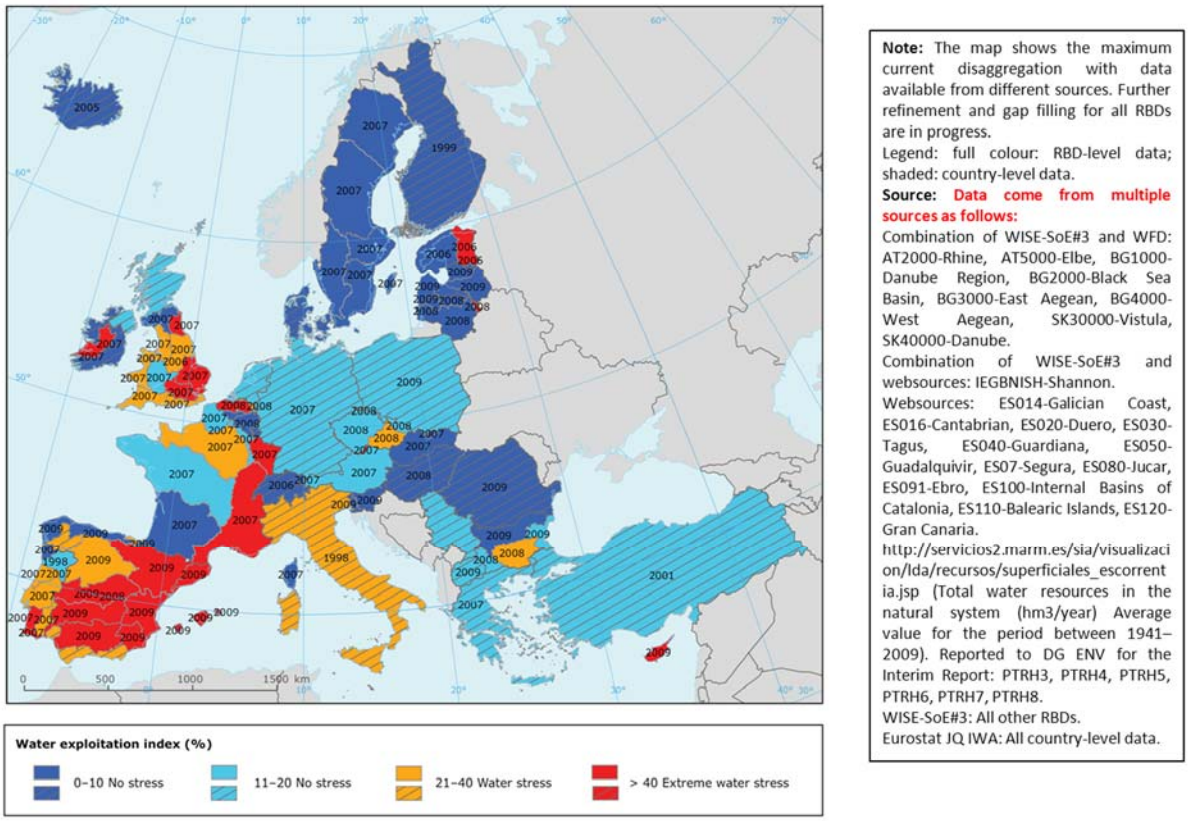


Figure II.2 : WEI en Europe – source : EEA Report, N°1/2012.

Les données utilisées proviennent de multiples sources (Figure II.2 – Colonne de droite) et leur traçabilité n'est pas évidente. Il semble donc intéressant de calculer le WEI au moyen des données simulées par EPIC-grid (voir première partie de ce rapport).

Le Tableau II.4 présente le calcul du WEI à l'échelle de la Wallonie pour les années 1995 et 2000 à 2007.

- Les données de précipitation et d'évapotranspiration réelle (Eta) sont des données issues du modèle Epic-grid et résultent du cumul de la lame d'eau annuelle de chaque grandeur à l'échelle de la masse d'eau souterraine (données Agro-BioTech Gembloux, 2012).
- Les valeurs *Actual External Inflow* (ExIn) et *Annual Freshwater Abstraction* (Abs) sont les valeurs rapportées en 2010 par la cellule Etat de l'Environnement Wallon dans le rapportage *Inland Water* d'Eurostat/OCDE (source DGARNE – Etat de l'Environnement Wallon)

La formule [1] a été appliquée sur une base annuelle (*total freshwater resources* à l'échelle annuelle – colonne E) et sur base d'une période LTAA (Long Term Annual Average) de 10 ans (cellule U). Cette seconde option permet de minimiser l'effet de la fluctuation des réserves à court terme.

Sur base annuelle, le WEI est compris entre 16 et 32 %. Selon cet indicateur, la Wallonie est placée en état de *Water-Stress* léger à moyen (Tableau II.4 – colonne G).

Le WEI calculé à partir de la moyenne sur dix ans de la *Total Freshwater Resources* est compris entre 18 et 26 %. La gamme de WEI est alors moins large et toujours indicatrice d'un état de water-stress léger à modéré (Tableau II.4 – colonne H).

Afin de vérifier la cohérence des gammes de valeurs introduites dans le calcul du WEI, mais aussi du WEI^+ (cf chapitre suivant), un bilan hydrogéologique annuel simplifié a été réalisé à l'échelle de la Wallonie (Tableau II.5).

L'équation de ce bilan est la suivante :

$$Internal\ Flow + Actual\ External\ Inflow = (Annual\ Freshwater\ Abstraction - Return) + Total\ Actual\ Outflow + \Delta\ Réserve + Fermeture. \quad [3]$$

La fluctuation annuelle de la réserve (ΔRéserve) n'étant pas quantifiée, elle est englobée dans le terme de fermeture.

A priori, les fluctuations de stockage doivent être relativement faibles comparativement aux volumes d'eau totaux entrant et sortant de la Wallonie. Cette valeur, cumulée à la marge d'erreur liée aux méthodes de mesure et de simulation des différentes données, devrait engendrer un terme de fermeture raisonnable.

Pour les années 1995 et 2000 à 2007, le terme de fermeture du bilan hydrogéologique annuel est compris entre – 18 % et + 19 %. Rappelons qu'un terme de fermeture positif est indicatif d'un bilan déficitaire, tandis qu'un terme de fermeture négatif est indicatif d'un bilan excédentaire.

Pour les années 2003 et 2005, les bilans hydrogéologiques sont excédentaires (les volumes d'eau quittant la Wallonie sont supérieurs aux volumes d'eau entrant). Ces deux années, surtout 2003, étant des années plus sèches (Figure II.3), il est possible que les débits d'étiage des rivières, n'entrant pas dans la gamme de valeurs couverte par les courbes de tarage, aient été surestimés.

Pour les autres années, le bilan est généralement déficitaire. Les principales entrées et sorties d'eau de la Wallonie considérées dans le bilan et dans les divers rapportages sont celles des grands cours d'eau de Wallonie (Tableau II.6). Or, il existe toute une série de petits bassins versants drainés vers l'extérieur de la Wallonie (Figure II.4) qui, lorsqu'ils sont pris en considération dans le bilan, permettent de diminuer le déficit d'une valeur de l'ordre de 5% (Tableau II.7). La liste des stations de jaugeage permettant d'affiner le bilan est reprise dans le tableau de la Figure II.4. Pour les bilans excédentaires, il est évident que la prise en considération de ces bassins augmente d'autant l'excédent (Tableau II.7).

Il est communément admis qu'un terme de fermeture de l'ordre de +/- 10 % témoigne d'une bonne fermeture d'un bilan hydrogéologique. Les termes de fermeture observés, tout en englobant les éventuelles variations de réserve, sont systématiquement inférieurs à +/- 20% (Tableau II.5 et Tableau II.7) et, étant donné l'échelle de travail, ceux-ci semblent indiquer une bonne cohérence des gammes de valeurs des divers paramètres intervenant dans le calcul du WEI.

	A	B	C*	D	E*	F	G*	H
	Precipitation	Eta	Internal Flow	Actual External Inflow	Total Freshwater Ressources	Annual Freshwater Abstraction	WEI sur base annuelle	WEI (LTAA = 10 ans)
	m³	*m³*	*m³*	*m³*	*m³*	*m³*	*%*	*%*
1995	17 540 073 098	9 061 096 514	8 478 976 584	8 389 762 517	16 868 739 101	3 497 395 939	21	26
1996	12 799 673 295	8 475 442 926	4 324 230 369					
1997	14 923 430 358	9 978 541 708	4 944 888 649					
1998	18 714 973 583	9 142 698 481	9 572 275 102					
1999	18 597 889 703	9 400 447 482	9 197 442 221					
2000	18 681 911 386	10 337 588 615	8 344 322 771	7 947 076 348	16 291 399 119	3 426 019 890	21	25
2001	20 382 162 366	9 355 189 927	11 026 972 439	9 190 853 602	20 217 826 041	3 164 808 361	16	24
2002	20 100 698 040	9 762 180 348	10 338 517 692	8 160 505 075	18 499 022 767	2 925 278 639	16	22
2003	13 430 336 658	9 367 422 766	4 062 913 892	4 446 934 387	8 509 848 279	2 690 855 989	32	20
2004	16 265 197 865	10 123 869 082	6 141 328 783	4 246 341 754	10 387 670 537	2 713 489 324	26	20
2005	14 338 063 772	9 741 333 346	4 596 730 426	3 581 536 522	8 178 266 948	2 604 269 482	32	19
2006	16 393 305 539	9 505 387 176	6 887 918 364	5 255 063 136	12 142 981 500	2 716 580 694	22	20
2007	18 591 986 505	10 601 629 554	7 990 356 951	6 916 231 613	14 906 588 564	2 477 405 491	17	18
2008	17 892 935 381	10 058 897 536	7 834 037 845	6 650 656 589	14 484 694 434			
2009	15 513 776 810	9 447 864 877	6 065 911 933	4 958 916 509	11 024 828 442			
2010	15 611 731 745	8 946 381 707	6 665 350 038					
Source des données	*Epic-grid (Dernière mise à jour - Septembre 2012)*	*Epic-grid (Dernière mise à jour - Septembre 2012)*	*Epic-grid (Dernière mise à jour - Septembre 2012)*	*Etat Environnement Wallon - Fiche Eurostat*	*Etat Environnement Wallon - Fiche Eurostat*	*Etat Environnement Wallon - Fiche Eurostat*		

	L	M	N	O	P
Cumul pour la période 2000-2009 (m³)	171 590 374 323	98 301 363 226	73 289 011 097	61 354 115 534	134 643 126 630
	Q	R	S	T	U
Moyenne annuelle pour la période 2000-2009 (m³)	17 159 037 432	9 830 136 323	7 328 901 110	6 135 411 553	13 464 312 663

*C=A-B
*E=C+D
*G=(F/E)*100
*H= (F/U)*100

Tableau II.4 : Calcul du WEI pour la Wallonie.

	A	B	C	D	E	F	Bilan	Bilan
	Internal Flow	Actual External Inflow	Total Freshwater Ressources	Annual Freshwater Abstraction	Production of electricity (cooling)	Total Actual Outflow	A+B-(D-E)-F	(A+B-(D-E)-F)/C*100
	m³	*m³*	*m³*	*m³*	*m³*	m³	m³	%
1995	8 478 976 584	8 389 762 517	16 868 739 101	3 497 395 939	2 373 241 000	12 487 982 595	3 256 601 568	19
1996	4 324 230 369							
1997	4 944 888 649							
1998	9 572 275 102							
1999	9 197 442 221							
2000	8 344 322 771	7 947 076 348	16 291 399 119	3 426 019 890	2 405 106 697	14 518 469 459	752 016 467	5
2001	11 026 972 439	9 190 853 602	20 217 826 041	3 164 808 361	2 171 497 009	17 257 396 822	1 967 117 867	10
2002	10 338 517 692	8 160 505 075	18 499 022 767	2 925 278 639	1 902 245 337	16 043 675 653	1 432 313 812	8
2003	4 062 913 892	4 446 934 387	8 509 848 279	2 690 855 989	1 625 646 300	9 016 556 899	-1 571 918 308	-18
2004	6 141 328 783	4 246 341 754	10 387 670 537	2 713 489 324	1 741 710 805	8 717 378 229	698 513 788	7
2005	4 596 730 426	3 581 536 522	8 178 266 948	2 604 269 482	1 734 679 095	7 811 580 413	-502 903 852	-6
2006	6 887 918 364	5 255 063 136	12 142 981 500	2 716 580 694	1 820 950 871	10 190 600 195	1 056 751 481	9
2007	7 990 356 951	6 916 231 613	14 906 588 564	2 477 405 491	1 641 652 961	13 024 420 169	1 046 415 865	7
2008	7 834 037 845	6 650 656 589	14 484 694 434					
2009	6 065 911 933	4 958 916 509	11 024 828 442					
2010	6 665 350 038							
Source des données	*Epic-grid (Dernière mise à jour - Septembre 2012)*	*Etat Environnement Wallon - Fiche Eurostat*	*Etat Environnement Wallon - Fiche Eurostat*	*Etat Environnement Wallon - Fiche Eurostat*	*Etat Environnement Wallon - Fiche Eurostat*	*Etat Environnement Wallon - Fiche Eurostat*	*Etat Environnement Wallon - Fiche Eurostat*	

Tableau II.5 : Bilan hydrogéologique simplifié à l'échelle de la Wallonie.

REGION WALLONNE

Superficie: 16 902 433 197 m²

	Précipitations		ETR		EU	
	Mm³	*mm*	*Mm³*	*mm*	*Mm³*	*mm*
1995	17 540	1 038	9 061	536	8 479	502
1996	12 800	757	8 475	501	4 324	256
1997	14 923	883	9 979	590	4 945	293
1998	18 715	1 107	9 143	541	9 572	566
1999	18 598	1 100	9 400	556	9 197	544
2000	18 682	1 105	10 338	612	8 344	494
2001	20 382	1 206	9 355	553	11 027	652
2002	20 101	1 189	9 762	578	10 339	612
2003	13 430	795	9 367	554	4 063	240
2004	16 265	962	10 124	599	6 141	363
2005	14 338	848	9 741	576	4 597	272
2006	16 393	970	9 505	562	6 888	408
2007	18 592	1 100	10 602	627	7 990	473
2008	17 893	1 059	10 059	595	7 834	463
2009	15 514	918	9 448	559	6 066	359
2010	15 612	924	8 946	529	6 665	394

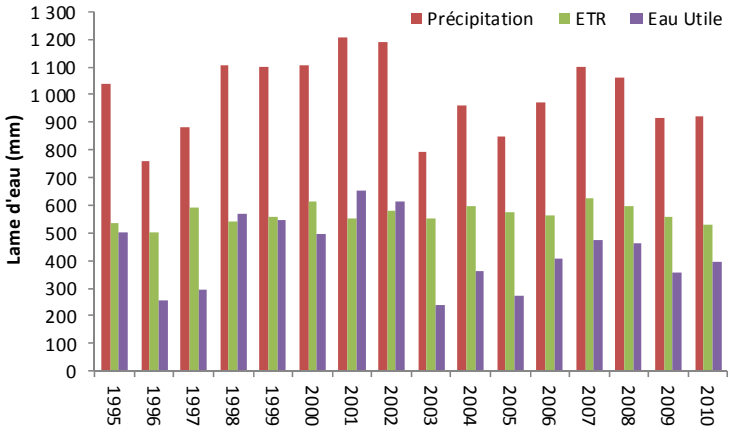
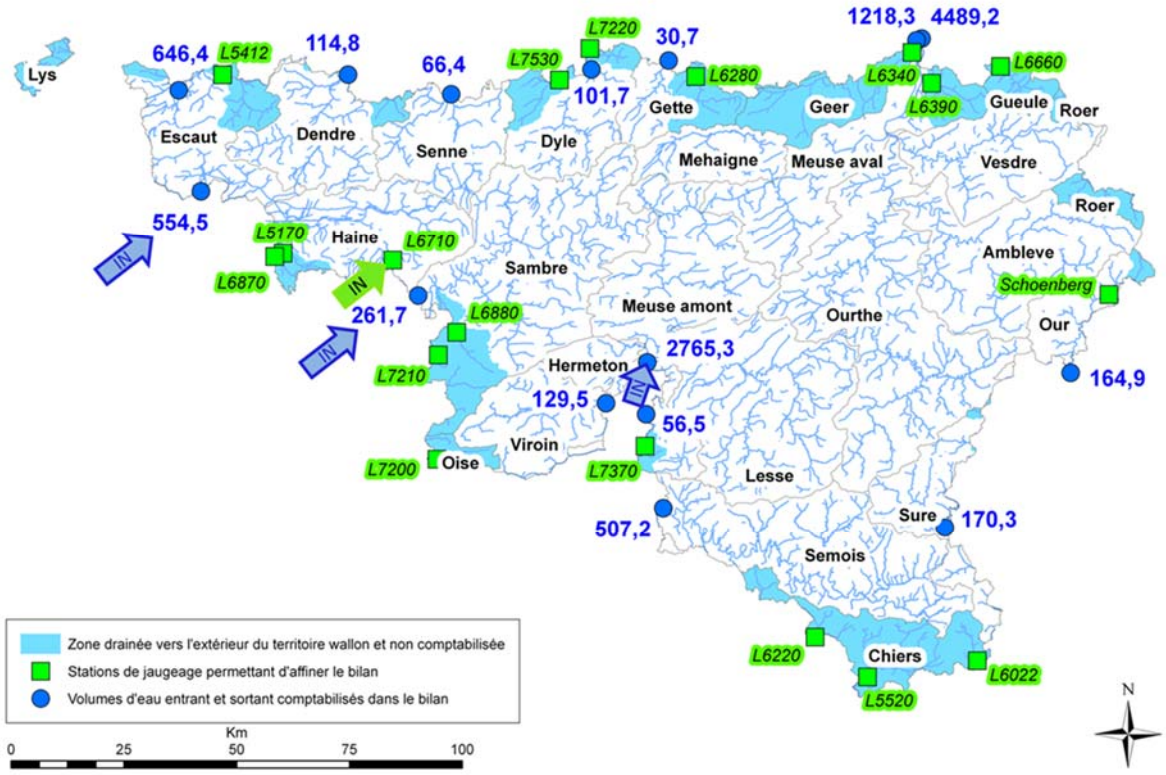


Figure II.3 : Lame d'eau annuelle de précipitation, d'évapotranspiration réelle et d'eau utile en Wallonie – Données EPIC-grid (AgroBioTech Gembloux, 2012).

Volumes d'eau annuels mesurés aux principales entrées et sorties du réseau hydrographique de la Région Wallonne																
	Escaut		Dendre	Dyle	Gette	Senne	C. Bxls-Charl	Semois	Houille	Viroin	Meuse		C. Albert	Sambre	Our	Sûre
	Entrée	*Exutoire*	*Exutoire*	*Exutoire*	*Exutoire*	*Exutoire*	*Exutoire*	*Exutoire*	*Exutoire*	*Exutoire*	*Entrée*	*Exutoire*	*Exutoire*	*Entrée*	*Exutoire*	*Exutoire*
	Blébaries	Pottes	Deux-Acren	Ottenburg	Hoegaarden	Clabecq	Clabecq	Bohan	Flohimont	Treignes	Heer	Lanaye	Eben-Emael	Erquelinnes	Ouren	
2000	1 024,4	1 194,0	209,7	106,8	34,6	122,9	76,9	1 155,5	118,1	301,1	6 393,2	9 524,9	1 283,7	529,5	220,1	Non précisé
2001	1 513,6	1 764,3	335,7	139,5	41,5	167,0	100,6	1 262,5	135,6	346,6	6 966,1	11 343,8	1 177,8	711,2	272,3	
2002	1 350,3	1 574,0	330,9	152,9	46,9	157,6	116,9	1 116,3	131,2	315,7	6 202,5	10 533,0	1 126,0	607,6	271,9	
2003	837,1	975,8	169,6	127,1	34,9	81,5	71,6	581,0	70,7	162,3	3 300,2	5 322,6	1 114,7	309,6	134,5	
2004	548,1	638,9	115,6	110,5	35,3	71,3	63,9	680,1	73,8	171,2	3 440,7	5 283,2	1 135,4	257,5	167,8	
2005	554,5	646,4	114,8	101,7	30,7	66,4	55,3	507,2	56,5	129,5	2 765,3	4 489,2	1 218,3	261,7	164,9	
2006	637,3	742,9	131,4	84,9	31,3	75,3	57,8	737,0	97,6	219,0	4 216,7	6 466,7	1 209,8	401,1	184,0	
2007	679,1	791,6	158,4	88,3	35,5	99,0	66,0	1 103,7	126,3	248,6	5 821,0	8 736,0	1 146,0	416,1	232,0	
2008	902,2	1 051,7	175,9	103,5	36,5	104,2	69,2	927,5	109,7	262,5	5 269,9	8 330,2	1 116,9	478,5	227,4	
2009	778,1	907,0	137,6	91,6	35,4	74,7	59,1	758,7	93,8	216,3	3 815,5	5 835,1	1 119,8	365,3	173,5	
Moyenne	**882,5**	**1 028,6**	**187,9**	**110,7**	**36,3**	**102,0**	**73,7**	**882,9**	**101,3**	**237,3**	**4 819,1**	**7 586,5**	**1 164,8**	**433,8**	**204,9**	**170,3**

Volume moyen annuel entrant en Région Wallonne	**6 135,4**	**Mm³**
Volume moyen annuel quittant la Région Wallonne	**11 887,3**	**Mm³**
Différence	**5 751,9**	**Mm³**

Tableau II.6 : Principaux volumes d'eau entrant et sortant annuellement de la Wallonie via le réseau superficiel (source : DGARNE – Cellule Etat de l'Environnement Wallon).



N° station	Bassin versant	Rivière	Localité	Coordonnées Lambert		Service	Volume annuel (m^3)	Volume annuel (m^3)	
				X	Y		année 2005	année 2006	
L7200	Oise	Oise	Macquenoise	135948	74007	SPW - DGO3	10 401 149	13 879 145	Sortie
L7220	Dyle et affluents	Nethen	Nethen	169876	165122	SPW - DGO3	8 877 971	7 160 393	Sortie
L5520	Chiers et affluents	Ton	Harnoncourt	231435	25671	SPW - DGO3	81 105 844	97 153 513	Sortie
L6220	Chiers et affluents	Marge	Villers-dt-Orval	219790	34463	SPW - DGO3	32 368 846	27 855 248	Sortie
L6660	Gueule	Gueule	Sippenaeken	260928	161171	SPW - DGO3	31 969 184	32 148 713	Sortie
L6340	Geer	Geer	Eben-Emael	241312	164275	SPW - DGO3	60 700 313	55 989 227	Sortie
L6280	Gette	Petite Gette	Opheylissem	193333	158910	SPW - DGO3	27 041 746	22 770 450	Sortie
L5170	Haine et affluents	G^{de} Honnelle	Baisieux	101819	119540	SPW - DGO3	17 422 258	24 852 643	Sortie
L7530	Dyle et affluents	Lasne	Rosières	163103	158162	SPW - DGO3	Pas de données	Pas de données	Sortie
L5412	Escaut et affluents	Rhosnes	Amougies	88408	159315	SPW - DGO3	38 594 545	34 977 791	Sortie
L6022	Chiers et affluents	Messancy	Athus	255779	29255	SPW - DGO3	25 447 471	26 028 040	Sortie
L6390	Meuse aval et affluents	Berwinne	Dalhem	245623	157426	SPW - DGO3	31 310 456	29 589 268	Sortie
L6710	Haine et affluents	Trouille	Givry	126144	118021	SPW - DGO3	8 639 381	10 253 959	Entrée
L6870	Haine et affluents	Anneau	Marchipont	99954	118836	SPW - DGO3	11 095 708	12 831 404	Sortie
L6880	Haute Sambre et affluents	Hantes	Beaumont	140342	102061	SPW - DGO3	20 277 767	32 726 974	Sortie
L7210	Haute Sambre et affluents	Thure	Grandrieu	136257	97061	SPW - DGO3	5 276 516	6 161 738	Sortie
L7370	Meuse amont et affluents	Hulles	Willerzie	182093	76885	SPW - DGO3	Pas de données	Pas de données	Sortie
Schoenberg	Our	Our	Schoenberg	284995	110412	SPW - DGO2	/	/	Sortie
						Total:	401 889 773	424 124 546	

Figure II.4 : Bassins versants non comptabilisés dans le bilan hydrogéologique.

	A	B	C	D	E	F	Bilan
	Total Freshwater Resources	**Annual Freshwater Abstraction**	**Production of electricity (cooling)**	**Total annuel outflow**	**Ajout entrées**	**Ajout sorties**	**(A+E)-(B-C)-(D+F)/(A+E)*100**
	m^3	*m^3*	*m^3*	*m^3*	*m^3*	*m^3*	*%*
2005	8 178 266 948	2 604 269 482	1 734 679 095	7 811 580 413	8 639 381	401 889 773	**-11**
2006	12 142 981 500	2 716 580 694	1 820 950 871	10 190 600 195	10 253 959	424 124 546	**5**

Tableau II.7 : Bilan hydrogéologique simplifié à l'échelle de la Wallonie après considération des bassins versants supplémentaires.

II.2.2. WEI+

Une nouvelle version de l'indicateur WEI est actuellement développée par le groupe d'experts WSD (Water Scarcity and Droughts). Le WEI^+ a pour objectif de mieux cerner l'équilibre entre les ressources en eau renouvelables et la consommation de cette eau. Il redéfinit la réelle exploitation en eau en considérant les volumes d'eau restitués au système et tente de solutionner les problèmes d'échelle spatiale et temporelle rencontrés avec le WEI (Update on Water Scarcity and Droughts indicator development – mai 2012).

L'ensemble des notions suivantes est issu du document « Update on Water Scarcity and Droughts indicateur development » datant du mois de mai 2012. Notons que ces travaux sont toujours en cours.

Le WEI^+ est défini comme suit :

$$WEI^+ = \frac{(Abstractions - Return)}{Renewable\ Water\ Resources} \quad [1]$$

La ressource en eau renouvelable (RWR) correspond à :

- $Renewable\ Water\ Resources = ExIn + (P - ETa) - \Delta S_{nat}$ [2]
- $Renewable\ Water\ Resources = Q_{nat}$ [3]
- $Renewable\ Water\ Resources = Outflow + (Abstraction - Return) - \Delta S_{art}$ [4]

Où

ΔS_{nat} est la variation de réserve naturelle ;

Q_{nat} est le débit sortant observé ;

ΔS_{art} est la variation de réserve des réservoirs artificiels.

Les autres termes sont définis dans le Tableau II.2.

L'équation [2] est applicable pour les bassins en conditions naturelles et pour les bassins avec altération anthropique.

L'équation [3] est applicable pour les bassins fermés en conditions naturelles.

L'équation [4] est applicable pour les bassins avec altération anthropique impliquant que le débit sortant est inférieur aux entrées dans le bassin considéré.

Notons que si la variation de la réserve naturelle tend vers zéro, les RWR sont l'équivalent des *Total Freshwater Resources (*Tableau II.2*)*.

Idéalement, les « *eflows* » (environmental flows) (cf Partie I chapitre I.3.3) et les « *Water Requirements* » (WR) devraient être considérés dans le calcul du WEI^+.

Les « *Water Requirements* » sont des volumes d'eau non disponibles pour l'exploitation car ils doivent être maintenus dans le bassin afin de répondre à différentes obligations légales telles que la navigation ou les seuils environnementaux définis dans les traités transfontaliers.

D'après le document de travail « Working Document of the TWG – EG WSD (Technical Working Group – Expert Group on Water Scarcity and Droughts)» (Janvier 2012), les « *eflows* » font partie intégrante des « *Water Requirements* ».

Tenant compte de ces paramètres supplémentaires et des équations [2] à [4], le WEI^+ peut être exprimé de la manière suivante :

- $$WEI^+ = \frac{(Abs - Return)}{(ExIn + (P - ETa) - \Delta S_{nat} - WR)} \quad [5]$$
- $$WEI^+ = \frac{(Abs - Return)}{(Outflow + (Abs - Return) - \Delta S_{art} - WR)} \quad [6]$$

Actuellement, aucune méthode de calcul des eflows homogénéisée à l'ensemble des états membres n'étant effective, les eflows sont exclus de la formule du WEI+ et seront intégrés dans la définition des seuils d'alerte définis. La définition de ces derniers n'est pas encore réalisée. Actuellement, la phase de test du calcul du WEI^+ repose donc sur les équations [1] à [4].

La formule [1] a été appliquée sur une base annuelle (RWR ou *total freshwater resources* à l'échelle annuelle – colonne E) et sur base d'une période LTAA (Long Term Annual Average) de 10 ans (Tableau II.8 - cellule U). Cette seconde option permet de minimiser l'effet de la fluctuation des réserves à court terme.

En ce qui concerne les *return* (Tableau II.8 – colonne I), seuls les volumes d'eau destinés au refroidissement des centrales électriques ont été considérés. Selon la définition (Tableau II.2), les *return* comprennent également les volumes d'eau restitués directement par l'utilisateur (domestique, industriel). La valeur de *return* est donc légèrement sous-estimée.

Le WEI^+ calculé sur base annuelle est compris entre 5 % et 13 %. Le WEI^+ calculé sur une base de 10 ans est compris entre 6 % et 8 %.

Les seuils n'étant pas encore définis par les experts, ces valeurs ne sont pas interprétables. Néanmoins, au regard des seuils du WEI, la Wallonie est placée en état de faible *Water-Stress*.

	A	B	C*	D	E*	F	G*	H	I	J*	K*
	Precipitation	Eta	Internal Flow	Actual External Inflow	Total Freshwater Ressources	Annual Freshwater Abstraction	WEI sur base annuelle	WEI (LTAA = 10 ans)	Production of electricity (cooling)	WEI^+ sur base annuelle	WEI^+ (LTAA=10 ans)
	m^3	m^3	m^3	m^3	m^3	m^3	%	%	m^3	%	%
1995	17 540 073 098	9 061 096 514	8 478 976 584	8 389 762 517	16 868 739 101	3 497 395 939	21	26	2 373 241 000	7	8
1996	12 799 673 295	8 475 442 926	4 324 230 369								
1997	14 923 430 358	9 978 541 708	4 944 888 649								
1998	18 714 973 583	9 142 698 481	9 572 275 102								
1999	18 597 889 703	9 400 447 482	9 197 442 221								
2000	18 681 911 386	10 337 588 615	8 344 322 771	7 947 076 348	16 291 399 119	3 426 019 890	21	25	2 405 106 697	6	8
2001	20 382 162 366	9 355 189 927	11 026 972 439	9 190 853 602	20 217 826 041	3 164 808 361	16	24	2 171 497 009	5	7
2002	20 100 698 040	9 762 180 348	10 338 517 692	8 160 505 075	18 499 022 767	2 925 278 639	16	22	1 902 245 337	6	8
2003	13 430 336 658	9 367 422 766	4 062 913 892	4 446 934 387	8 509 848 279	2 690 855 989	32	20	1 625 646 300	13	8
2004	16 265 197 865	10 123 869 082	6 141 328 783	4 246 341 754	10 387 670 537	2 713 489 324	26	20	1 741 710 805	9	7
2005	14 338 063 772	9 741 333 346	4 596 730 426	3 581 536 522	8 178 266 948	2 604 269 482	32	19	1 734 679 095	11	6
2006	16 393 305 539	9 505 387 176	6 887 918 364	5 255 063 136	12 142 981 500	2 716 580 694	22	20	1 820 950 871	7	7
2007	18 591 986 505	10 601 629 554	7 990 356 951	6 916 231 613	14 906 588 564	2 477 405 491	17	18	1 641 652 961	6	6
2008	17 892 935 381	10 058 897 536	7 834 037 845	6 650 656 589	14 484 694 434						
2009	15 513 776 810	9 447 864 877	6 065 911 933	4 958 916 509	11 024 828 442						
2010	15 611 731 745	8 946 381 707	6 665 350 038								
Source des données	*Epic-grid (Dernière mise à jour - Septembre 2012)*	*Epic-grid (Dernière mise à jour - Septembre 2012)*	*Epic-grid (Dernière mise à jour - Septembre 2012)*	*Etat Environnement Wallon - Fiche Eurostat*	*Etat Environnement Wallon - Fiche Eurostat*	*Etat Environnement Wallon - Fiche Eurostat*			*Etat Environnement Wallon - Fiche Eurostat*		

	L	M	N	O	P
Cumul pour la période 2000-2009 (m^3)	171 590 374 323	98 301 363 226	73 289 011 097	61 354 115 534	134 643 126 630
	Q	R	S	T	U
Moyenne annuelle pour la période 2000-2009 (m^3)	17 159 037 432	9 830 136 323	7 328 901 110	6 135 411 553	13 464 312 663

*C=A-B
*E=C+D
*G=(F/E)*100
*H= (F/U)*100
*J=(F-H)/E*100
*K=(F-H)/U*100

Tableau II.8 : Calcul du WEI^+ pour la Wallonie.

En se basant sur les seuils définis pour le WEI (20 % et 40 %), un test a été effectué afin de déterminer quel devrait être le volume destiné aux Water Requirement (y compris les eflows) pour que ces seuils soient respectés.

Partant de l'équation [5] et nommant Y la grandeur (WR-ΔS_{nat}), l'expression suivante peut être considérée :

$$Y = -\left[\frac{100*(Abs-Return)}{WEI^{+}} - (P - Eta) - ExIn\right] \quad [7]$$

En introduisant la valeur de 20 ou de 40 pour le WEI^{+} dans l'équation [7] et en considérant que la variation de réserve annuelle est relativement faible, une estimation des WR nécessaires au respect des seuils sélectionnés peut être obtenue. Rappelons que les véritables seuils adaptés au WEI^{+} restent à définir.

Ces estimations sont présentées sous forme de graphique à la Figure II.5. En guise d'exemple, pour l'année 2000, la ressource totale en eau douce (*Total Freshwater Resources*) peut être estimée à 16291,4 millions de m³. Les WR doivent être de l'ordre de :

- 69 % des *Total Freshwater Ressources* pour obtenir un WEI^{+} de 40 %, soit 11186,9 millions de m³;
- 84 % des *Total Freshwater Ressources* pour obtenir un WEI^{+} de 20 %, soit 13739,1 millions de m³.

Cela signifierait qu'avec le type de prélèvements effectués en l'an 2000, il resterait encore une ressource en eau douce disponible de l'ordre de :

- 2552,3 millions de m³ pour un WEI^{+} de 20 % ;
- 5104,6 millions de m³ pour un WEI^{+} de 40 %.

Notons que pour toutes les années considérées, le même ordre de grandeur de cette valeur résiduelle peut être dégagé (Figure II.5).

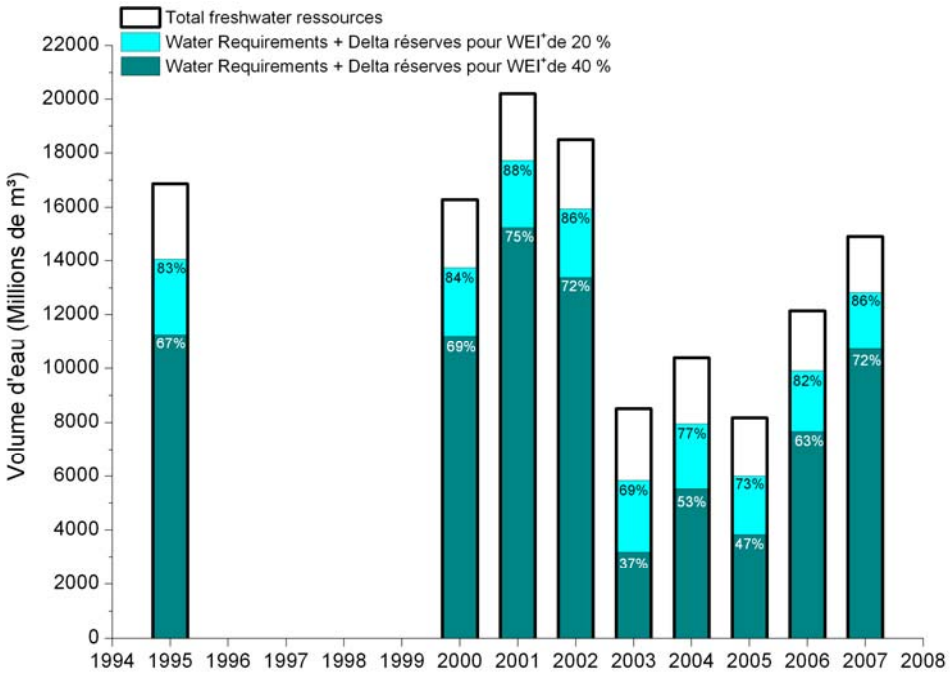


Figure II.5 : Proportion de la ressource en eau douce totale annuelle devant être réservée pour obtenir un WEI^{+} de 20 % ou de 40 %.

Notons finalement que les débats entre experts concernant la représentativité de l'indicateur WEI^+ sont toujours en cours et semblent très controversés (P. Meus (DGARNE), com.pers. ; C. Latour (DGARNE), com.pers.). Ces discussions risquent dès lors d'engendrer des modifications dans l'expression du WEI^+ telle que décrite ci-dessus voire le choix d'utiliser d'autres méthodes d'évaluation de la ressource en eau douce.

II.3. INDICATEURS QUANTITATIFS DE LA RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE

Une étude intitulée « Etude des tendances et des indicateurs quantitatifs d'aquifère et application sur le bassin du Triffoy (Belgique) » a récemment été réalisée à l'ULg (Pirmez, 2012). Un de ses objectifs est d'analyser les indicateurs qui pourraient être appliqués aux eaux souterraines, notamment en Wallonie. Ces indicateurs constituent des outils de synthèse qui se basent sur une approche systémique de l'évaluation de la situation quantitative des eaux souterraines (Pirmez, 2012).

Deux grands types d'indicateurs y sont distingués :

- Les indicateurs basés sur les variables indépendantes ;
- Les indicateurs basés sur les variables dépendantes.

La première catégorie reprend l'approche par bilan simplifié du taux d'exploitation.

La seconde catégorie, permettant de synthétiser la situation quantitative de la nappe à partir de données brutes (niveau d'eau, débit aux émergences) ou ajustées (débit de base, recharge), reprend les méthodes telles que :

- Les études de tendance ;
- La méthode des moyennes mensuelles,
- L'exploitation du modèle fréquentiel ;
- L'index de pondération multicritère ;
- La dérivée temporelle d'une variable.

A l'exception des deux dernières méthodes, tous ces indicateurs ont été appliqués sur le bassin du Triffoy (Condroz -commune de Marchin).

Ce travail apporte un état des lieux de la construction d'indicateurs de l'état quantitatif d'aquifères. Il décrit des méthodes simples et objectives basées sur l'utilisation de moyennes et de statistiques. Il relève la nécessité de posséder de longues chroniques de données de bonne qualité. Il souligne également la nécessité de définir des valeurs critiques en termes de débit de base, de taux d'exploitation et de niveaux d'eau. Il met en évidence, pour la détermination de valeur de débit critique d'étiage, l'intérêt de l'étude de l'interrelation entre les eaux de surface et les eaux souterraines et les fonctions écologiques que les eaux souterraines doivent satisfaire (Pirmez, 2012). En d'autres termes, la définition d'indicateur quantitatif des eaux souterraines doit nécessairement passer par l'évaluation des eflows.

II.4. CONCLUSIONS GÉNÉRALES

La première partie de cette étude a déjà permis de souligner que les paramètres :

- Precipitation ;
- Actual evapotranspiration (évapotranspiration réelle) ;
- Internal flow (eau utile) ;
- Recharge to the aquifer (ressource en eau souterraine annuellement renouvelable)

pouvaient être évalués à l'aide de l'outil EPIC-grid. Ces valeurs, disponibles à l'échelle annuelle, permettent une mise à jour des tableaux de rapportage « Inland Waters » de Eurostat /OCDE et « WEI^+ » de WSD.

Le calcul de l'indicateur quantitatif global WEI à l'échelle de la Wallonie à partir de ces données place la Wallonie en état de *water-stress* léger à modéré.

Le bilan hydrogéologique annuel simplifié réalisé à l'échelle de la Wallonie a permis de constater que, bien qu'ils paraissent négligeables, les volumes d'eau quittant annuellement les petits bassins versants drainés vers l'extérieur du territoire représentaient environ 5 % des volumes d'eau entrant. Les considérer permet donc d'améliorer la qualité des rapportages.

Le calcul de l'indicateur quantitatif global WEI^+ à l'échelle de la Wallonie donne des résultats inférieurs à 10 %. Ces derniers ne peuvent être interprétés en termes d'état de *water-stress* car les seuils d'alerte n'ont pas encore été définis par les experts en charge de la conception de cet indicateur. En outre, les débats entre experts concernant la représentativité de l'indicateur WEI^+ sont toujours en cours et semblent très controversés. Ces discussions risquent dès lors d'engendrer des modifications dans l'expression du WEI^+ telle que décrite ci-dessus, voire le choix d'utiliser d'autres méthodes d'évaluation de la ressource en eau douce.

Finalement, sur base de l'étude récente de Pirmez (2012) concernant les indicateurs quantitatifs des eaux souterraines, la définition de ces derniers doit inévitablement passer par la quantification des eflows.

Références bibliographiques

OUVRAGES, PERIODIQUES, PROCEEDINGS ET RAPPORTS TECHNIQUES

APERe asbl, Ministère de la Wallonie et Division de l'Energie (2003) *Vade-Mecum non-technologique de candidat à la réhabilitation d'un site hydroénergétique*, 41 p.

Armitage P. et Petts G.E. (1992) Biotic score and prediction to assess the effects of water abstraction on river macroinvertebrates for conservation purposes. *Aquat.Conserv*., 2, pp. 1-17.

Arthington A. H. et Pusey. B. J. (2003). Flow restoration and protection in Australian rivers. *River Research and Applications,* 19, pp. 377–395.

Bonniver I. (2011) *Etude hydrogéologique et dimensionnement par modélisation du « Système – Traçage » du réseau karstique de Han-sur-Lesse (Massif de Boine – Belgique).*Thèse de doctorat*,* FUNDP, Ed. Presses Universitaires de Namur, 349 p.

Brouyère S., Gesels J., Jamin P., Robert T., Thomas L., Dassargues A., Bastien J., Van Wittenberge F., Rorive A., Dossin F., Lacour J-L., Le Madec D., Nogarède P., Hallet V. (2009) *Rapport de caractérisation géologique et hydrogéologique des masses d'eau souterraines RWM012 et RWM023. 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 Wallonie* (Projet Synclin'Eau).

Castany G. (1998) *Hydrogéologie – Principes et méthodes.* Ed. Dunod, 236 p.

Chapuis R.P. (2007) *Guide des essais de pompage et leurs interprétations*. Bibliothèque et archives nationales du Québec, 156 p.

Dassargues A. (2000) *Modélisation des réservoirs souterrains – Notes de cours*. ULg, non édité, 234 p.

Dassargues A., Brouyère S., Corbeanu H., Dachy M., Gardin N. et Orban. P. (2004) *Caractérisation et modélisation des nappes d'eau souterraine*. Rapport final Novembre 2000 - Octobre 2004, HGE-ULg – GEOMAC, In : PIRENE Programme Intégré de Recherche Environnement-Eau, 106 p.

Derycke F. et Fried J.J. (1982) *Bilan des ressources en eau souterraine de la Belgique.* CECA, CEE, CEEA, Bruxelles – Luxembourg, 260 p.

Dewez A et Dautrebande S. (1996) In : *Programme-Action Hesbaye, Rapport de synthèse*, 167 p. Etude réalisée par : la Station de Phytotechnie du Centre de Recherches Agronomiques de Gembloux, l'Unité d'Hydraulique Agricole de la Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, les Laboratoires de Géologie de l'Ingénieur, d'Hydrogéologie et de Prospection Géophysique de l'Université de Liège.
Etude financée par : la Commission des Communautés Européennes, le Ministère de l'Environnement, des Ressources Naturelles et de l'Agriculture de la Région Wallonne, et le Groupement d'Intérêt Economique réunissant la Société Wallonne des Distributions d'Eau et la Compagnie Intercommunale Liégeoise des Eaux.

EEA (European Environment Agency) (2005) *European Environment Outlook,* EEA Report n°4/2005, 87 p.

EEA (European Environment Agency) (2012) *Towards efficient use of water resources in Europe,* EEA Report n°1/2012, 68 p.

EVERBECQ E., DELIÈGE J.F., BOUROUAG T. ET MARKATOS M. (2004) *Elaboration du module « Qualité des eaux de surface » et élaboration du modèle intégré MOIRA (Modèle Intégré pour les Ressources Aquatiques).*Rapport final Novembre 2000 - Octobre 2004, ULg – CEME, In : PIRENE Programme Intégré de Recherche Environnement-Eau, 140 p.

GANDOLFI C., FACCHI A. ET MAGGI D. (2006) Comparison of 1D models of water flow in unsaturated soils. *Environ. Modell.Softw.*, 21, pp. 1759-1764.

GINOT V. (1998). EVHA : *Evaluation de l'habitat physique des poissons en rivière - Guide de l'Utilisateur Version 2.0*. Cemagref Division Biologie des Ecosystèmes Aquatiques - Laboratoire d'Hydroécologie Quantitative.

GRANIER A. (1996) Evaporation des forêts*. C.R. Acad. Agric. Fr.*, 82, pp. 119-132.

GRANIER A. BRÉDA N., BIRON P. ET VILLETTE S. (1999) A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling*. 116 (2-3), pp. 269-283.

HALLET V ET MONJOIE A. (1996) Programme Action-Hesbaye. Rapport scientifique – LGIH. Ministère de la Wallonie, Division de l'Eau – Service des eaux souterraines.

HALLET V. ET BARBIER F. (2007) *Etude bibliographique visant à préciser le cadre géologique et hydrogéologique au droit des mailles du modèle EPIC-grid*. Convention de sous-traitance entre la Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux et les Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix de Namur. 46 pp. + annexes.

HALLET V. ET MEUS P. (2011) Contexte hydrogéologique des systèmes karstiques de la région de Rochefort (Vallées de la Wamme et de la Lomme). *Geological Survey of Belgium - Professional Paper 2011/2*, 309, pp. 39-46.

HIRTT L. (2009) Méthodologie intégrée de détermination du débit réservé : application au cas du Crupet. Mémoire. Université de Liège – Gembloux Agro-Bio Tech. 77 p. + annexes.

HUART M. ET T'SERSTEVENS J.J. (APERe asbl) (2006) *L'exploitation des ressources en eaux de surface en Wallonie pour des usages hydroénergétiques*. Dossier scientifique. Etat de l'Environnement Wallon, 17 pp.

KLIMCHOUK A.B. (2004). Towards defining, delimiting and classifying epikarst: Its origin, processes and variants of geomorphic evolution. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers,* 2(1), 13 p.

LOZET J. et MATHIEU C. (1997). *Dictionnaire de science du sol. Lavoisier*, Paris, 3e éd., 488 p.

NEITSCH S.L., ARNOLD J.G., KINIRY J.R., SRINIVASAN R. ET WILLIAMS J.R. (2002) *Soil and Water Assessment Tool User's Manual version 2000.* GSWRL Report 02-02 ; BRC Report 02-06, TR-192. College Station, Texas : Texas Water Resources Institute.

PENMAN H.L. (1948) Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. London*, A193, pp. 120-146.

PERSOONS E. ET SULMON R.P. (2004) *Caractérisation des incertitudes des mesures hydrologiques*. Rapport final Novembre 2000 – Octobre 2004. UCL – Unité de Génie Rural. In : PIRENE Programme Intégré de Recherche Environnement-Eau, 50 p.

PIRMEZ M. (2012) Etude des tendances et des indicatuers quantitatifs d'aquifères et application sur le bassin du Triffoy (Belgique). Mémoire, ULg, 135 p.

POFF, L. & ZIMMERMAN J. K. (2010). Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform the science and management of environmental flows. *Freshwater Biology*, 55, pp. 194–205.

SANCHEZ NAVARRO R. et SCHMIDT G (2012) *Environmental flows as a tool to achieve the WFD objectives.* Discussion paper. Draft 2.0 Version Draft préparée par Intecsa-Inarsa S.A. comme base de travail pour les différents groupes du CIS (Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive). European Commission.

SOHIER C. (2011) *Développement d'un modèle hydrologique sol et zone vadose afin d'évaluer l'impact des pollutions diffuses et des mesures d'atténuation sur la qualité des eaux en Wallonie*. Thèse de Doctorat. Université de Liège – Gembloux Agro-Bio Tech, 338 p. + annexes.

SOPHOCLEOUS M (2000) *From safe yields to sustainable development of water ressources – the Kansas Experience*. Journal of Hydrology. Vol. 235, pp. 27-43.

SOUCHON Y., VALENTIN S. ET CAPRA H. (1998). Peut-on rendre plus objective la détermination des débits réservés par une approche scientifique ? *La Houille blanche*, 53(8), pp. 41-45.

STATZNER B. et HIGLER B. (1986) Stream hydraulics as a major determinant of benthic invertebrate zonation patterns. *Freshwat. Biol.*, 16, pp. 127-139.

THARME R. (2003). A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications,* 19, pp. 397-441.

THORNTHWAITE C.W. (1948) An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38, pp. 55–94.

TROMME O. ET MONJOIE A. (2001*) Marché de service pour la réalisation d'extensions au modèle global de simulation hydrologique MOHICAN*. Sixième rapport d'avancement. Période Mai-Juin 2001.

WILLIAMS J.R., JONES C.A. ET DYKE P.T. (1984) A modelling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Transactions of the ASAE*, 27, pp. 129-144.

SITES INTERNET

AQUAPOLE – Pôle de recherche et d'expertise en sciences de l'eau.
http://www.aquapole.ulg.ac.be/

MUSY A. (2005) *Cours « Hydrologie générale ».* Laboratoire d'Hydrologie et Aménagements (ISTE/HYDRAM). http://echo2.epfl.ch/e-drologie/

REBILLARD V. (2006). Détermination et mise en place de régimes réservés pour les cours d'eau. Site internet : www.agroparistech.fr Rapport technique, ENGREF CEMAGREF.

LEGIFRANCE – Service Public de la diffusion du droit.

http://www.legifrance.gouv.fr/

SPW-DGO3 (2012). Etat des nappes d'eau souterraine de Wallonie. Edition : Service public de Wallonie, DGO 3 (DGARNE), Belgique. Dépôt légal **D/2012/11802/106** - ISBN **978-2-8056-0111-8**.
http://environnement.wallonie.be/de/eso/atlas/

SPW-DGO3. Etat des lieux des masses d'eau souterraines :
http://spw.wallonie.be/dce/spip.php?rubrique67

Water Scarcity and Droughts in European Union, European Commission (DG ENV) :
http://ec.europa.eu/environment/water/quantity/scarcity_en.htm

DIRECTIVES EUROPEENNES

DIRECTIVE 2000/60/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau – Abréviation : Directive-Cadre sur l'Eau ou DCE.

ANNEXE :

BILANS HYDROLOGIQUES ANNUELS EPIC-GRID DE 1995 À 2010 À L'ÉCHELLE DE LA MASSE D'EAU SOUTERRAINE

(*DONNÉES AGRO-BIOTECH GEMBLOUX – ULG – 2012*)

1995													
Masse d'eau	**Superficie**	**P**	**ETR**	**EU**	**RD**	**RHL**	**Percolation de base**	**P**	**ETR**	**EU**	**RD**	**RHL**	**Percolation de base**
	m²	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*
RWE013	870 133 971	808	514	294	199	9	147	703	447	256	173	8	128
RWE017	86 861 741	855	498	357	177	19	209	74	43	31	15	2	18
RWE030	477 432 014	853	509	344	75	79	253	407	243	164	36	38	121
RWE031	241 733 768	825	504	321	90	9	279	199	122	78	22	2	67
RWE032	72 550 750	754	508	246	39	10	265	55	37	18	3	1	19
RWE051	964 840 205	783	511	272	77	34	212	755	493	262	74	33	205
RWE053	205 850 010	758	530	228	41	14	237	156	109	47	8	3	49
RWE061	389 398 842	761	509	252	203	3	107	296	198	98	79	1	42
RWE160	483 824 023	832	535	297	275	26	61	403	259	144	133	13	30
RWM011	417 403 193	842	519	323	75	81	209	351	217	135	31	34	87
RWM012	460 640 152	923	541	382	129	189	104	425	249	176	59	87	48
RWM015	226 796 940	908	509	399	122	45	280	206	115	90	28	10	64
RWM016	300 197 285	857	500	357	145	92	138	257	150	107	44	28	41
RWM021	1 660 735 661	976	521	455	186	167	138	1 621	865	756	309	277	229
RWM022	442 872 648	1 000	545	455	131	291	89	443	241	202	58	129	39
RWM023	1 504 713 830	1 031	543	488	192	275	60	1 551	817	734	289	414	90
RWM040	429 369 733	763	514	249	39	15	236	328	221	107	17	6	101
RWM041	305 462 640	792	523	269	67	87	179	242	160	82	20	27	55
RWM052	141 721 513	957	537	420	98	23	331	136	76	60	14	3	47
RWM071	38 152 200	939	450	489	235	115	117	36	17	19	9	4	4
RWM072	78 379 828	800	455	345	147	68	116	63	36	27	12	5	9
RWM073	46 079 017	886	464	422	167	38	184	41	21	19	8	2	8
RWM091	64 138 241	1 293	502	791	221	62	522	83	32	51	14	4	33
RWM092	535 996 023	1 304	515	789	337	125	344	699	276	423	181	67	184
RWM093	132 936 146	1 211	505	706	401	46	278	161	67	94	53	6	37
RWM094	53 425 567	1 302	542	760	460	82	240	70	29	41	25	4	13
RWM100	3 310 726 844	1 216	578	638	230	362	91	4 026	1 914	2 112	761	1 198	301
RWM102	109 778 086	1 409	639	770	294	432	125	155	70	85	32	47	14
RWM103	1 501 683 208	1 420	548	872	302	522	74	2 132	823	1 309	454	784	111
RWM141	134 244 004	950	528	422	144	174	170	128	71	57	19	23	23
RWM142	206 869 093	1 035	510	525	258	209	85	214	106	109	53	43	18
RWM151	286 221 112	912	534	378	144	59	223	261	153	108	41	17	64
RWR092	53 127 075	1 175	506	669	516	55	152	62	27	36	27	3	8
RWR101	668 137 834	1 199	534	665	244	355	105	801	357	444	163	237	70
Région Wallonne	**16 902 433 197**							**17 540**	**9 061**	**8 479**	**3 265**	**3 561**	**2 378**

1996													
Masse d'eau	**Superficie**	**P**	**ETR**	**EU**	**RD**	**RHL**	**Percolation de base**	**P**	**ETR**	**EU**	**RD**	**RHL**	**Percolation de base**
	m²	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*
RWE013	870 133 971	724	522	202	103	4	61	630	454	176	90	3	53
RWE017	86 861 741	704	477	227	107	9	83	61	41	20	9	1	7
RWE030	477 432 014	706	504	202	55	26	88	337	241	96	26	12	42
RWE031	241 733 768	693	505	188	52	3	95	168	122	45	13	1	23
RWE032	72 550 750	665	514	151	29	3	83	48	37	11	2	0	6
RWE051	964 840 205	685	485	200	71	12	78	661	468	193	69	12	75
RWE053	205 850 010	612	501	111	30	3	53	126	103	23	6	1	11
RWE061	389 398 842	665	504	161	94	1	41	259	196	63	37	0	16
RWE160	483 824 023	750	530	220	148	10	24	363	256	106	72	5	12
RWM011	417 403 193	680	471	209	67	29	85	284	197	87	28	12	35
RWM012	460 640 152	729	492	237	95	68	41	336	227	109	44	31	19
RWM015	226 796 940	758	467	291	123	16	111	172	106	66	28	4	25
RWM016	300 197 285	632	469	163	84	25	51	190	141	49	25	8	15
RWM021	1 660 735 661	714	476	238	95	71	56	1 186	791	395	158	118	93
RWM022	442 872 648	767	522	245	82	92	28	340	231	109	36	41	12
RWM023	1 504 713 830	719	487	232	97	86	26	1 082	733	349	146	129	39
RWM040	429 369 733	647	518	129	27	5	76	278	222	55	12	2	33
RWM041	305 462 640	652	500	152	34	36	58	199	153	46	10	11	18
RWM052	141 721 513	774	504	270	95	10	149	110	71	38	13	1	21
RWM071	38 152 200	706	407	299	158	51	51	27	16	11	6	2	2
RWM072	78 379 828	623	429	194	100	27	41	49	34	15	8	2	3
RWM073	46 079 017	639	435	204	94	16	86	29	20	9	4	1	4
RWM091	64 138 241	836	489	347	93	26	225	54	31	22	6	2	14
RWM092	535 996 023	847	489	358	134	62	155	454	262	192	72	33	83
RWM093	132 936 146	788	467	321	167	20	126	105	62	43	22	3	17
RWM094	53 425 567	805	500	305	187	27	86	43	27	16	10	1	5
RWM100	3 310 726 844	822	525	297	119	117	46	2 721	1 738	983	394	387	152
RWM102	109 778 086	965	560	405	129	170	85	106	61	44	14	19	9
RWM103	1 501 683 208	891	504	387	144	209	36	1 338	757	581	216	314	54
RWM141	134 244 004	790	547	243	72	71	68	106	73	33	10	10	9
RWM142	206 869 093	777	508	269	140	81	41	161	105	56	29	17	8
RWM151	286 221 112	765	531	234	111	24	83	219	152	67	32	7	24
RWR092	53 127 075	795	488	307	189	19	65	42	26	16	10	1	3
RWR101	668 137 834	775	480	295	117	117	54	518	321	197	78	78	36
Région Wallonne	**16 902 433 197**							**12 800**	**8 475**	**4 324**	**1 734**	**1 268**	**980**

1997													
Masse d'eau	**Superficie**	**P**	**ETR**	**EU**	**RD**	**RHL**	**Percolation de base**	**P**	**ETR**	**EU**	**RD**	**RHL**	**Percolation de base**
	m²	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*
RWE013	870 133 971	734	549	185	98	5	72	639	478	161	85	4	63
RWE017	86 861 741	757	544	213	97	10	97	66	47	19	8	1	8
RWE030	477 432 014	749	558	191	45	31	103	358	266	91	21	15	49
RWE031	241 733 768	735	554	181	47	4	118	178	134	44	11	1	29
RWE032	72 550 750	751	563	188	32	5	118	54	41	14	2	0	9
RWE051	964 840 205	677	538	139	46	14	81	653	519	134	44	14	78
RWE053	205 850 010	694	570	124	29	4	75	143	117	26	6	1	15
RWE061	389 398 842	738	562	176	103	1	57	287	219	69	40	0	22
RWE160	483 824 023	733	553	180	136	10	30	355	268	87	66	5	15
RWM011	417 403 193	701	545	156	44	32	87	293	227	65	18	13	36
RWM012	460 640 152	761	578	183	75	72	49	351	266	84	35	33	23
RWM015	226 796 940	754	546	208	78	19	121	171	124	47	18	4	27
RWM016	300 197 285	786	590	196	102	30	60	236	177	59	31	9	18
RWM021	1 660 735 661	806	572	234	92	86	62	1 339	950	389	153	143	103
RWM022	442 872 648	874	619	255	77	126	40	387	274	113	34	56	18
RWM023	1 504 713 830	830	599	231	98	106	32	1 249	901	348	147	159	48
RWM040	429 369 733	743	590	153	31	7	109	319	253	66	13	3	47
RWM041	305 462 640	710	569	141	30	34	74	217	174	43	9	10	23
RWM052	141 721 513	839	584	255	70	11	167	119	83	36	10	2	24
RWM071	38 152 200	721	484	237	131	47	47	28	18	9	5	2	2
RWM072	78 379 828	733	534	199	102	27	50	57	42	16	8	2	4
RWM073	46 079 017	787	546	241	119	15	73	36	25	11	5	1	3
RWM091	64 138 241	1 117	575	542	144	39	350	72	37	35	9	3	22
RWM092	535 996 023	1 107	594	513	195	83	219	593	318	275	105	44	117
RWM093	132 936 146	1 048	579	469	256	27	167	139	77	62	34	4	22
RWM094	53 425 567	975	593	382	241	34	107	52	32	20	13	2	6
RWM100	3 310 726 844	1 021	634	387	148	165	63	3 380	2 099	1 281	490	546	209
RWM102	109 778 086	1 177	654	523	167	245	97	129	72	57	18	27	11
RWM103	1 501 683 208	1 131	611	520	184	265	45	1 698	918	781	276	398	68
RWM141	134 244 004	937	657	280	84	97	103	126	88	38	11	13	14
RWM142	206 869 093	949	626	323	174	94	51	196	130	67	36	19	11
RWM151	286 221 112	899	660	239	109	28	112	257	189	68	31	8	32
RWR092	53 127 075	1 003	573	430	288	30	95	53	30	23	15	2	5
RWR101	668 137 834	1 038	576	462	175	187	79	694	385	309	117	125	53
Région Wallonne	**16 902 433 197**							**14 923**	**9 979**	**4 945**	**1 928**	**1 669**	**1 232**

1998													
Masse d'eau	**Superficie**	**P**	**ETR**	**EU**	**RD**	**RHL**	**Percolation de base**	**P**	**ETR**	**EU**	**RD**	**RHL**	**Percolation de base**
	m²	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*
RWE013	870 133 971	952	546	406	217	9	147	828	475	353	189	8	128
RWE017	86 861 741	991	533	458	190	19	208	86	46	40	17	2	18
RWE030	477 432 014	936	533	403	79	74	232	447	254	192	38	35	111
RWE031	241 733 768	899	520	379	85	7	239	217	126	92	21	2	58
RWE032	72 550 750	890	534	356	49	11	284	65	39	26	4	1	21
RWE051	964 840 205	1 010	555	455	110	42	281	974	535	439	106	41	271
RWE053	205 850 010	878	548	330	53	13	223	181	113	68	11	3	46
RWE061	389 398 842	931	550	381	243	3	119	363	214	148	95	1	46
RWE160	483 824 023	1 025	562	463	337	29	63	496	272	224	163	14	30
RWM011	417 403 193	987	540	447	94	95	230	412	225	187	39	40	96
RWM012	460 640 152	949	548	401	121	152	91	437	252	185	56	70	42
RWM015	226 796 940	950	517	433	123	34	231	215	117	98	28	8	52
RWM016	300 197 285	949	526	423	174	77	136	285	158	127	52	23	41
RWM021	1 660 735 661	986	522	464	149	152	129	1 637	867	771	247	252	214
RWM022	442 872 648	1 081	597	484	121	263	81	479	264	214	54	116	36
RWM023	1 504 713 830	1 013	533	480	163	226	59	1 524	802	722	245	340	89
RWM040	429 369 733	995	551	444	75	18	277	427	237	191	32	8	119
RWM041	305 462 640	969	550	419	70	107	168	296	168	128	21	33	51
RWM052	141 721 513	1 036	560	476	106	22	340	147	79	67	15	3	48
RWM071	38 152 200	934	443	491	215	102	105	36	17	19	8	4	4
RWM072	78 379 828	925	484	441	172	70	118	73	38	35	13	5	9
RWM073	46 079 017	974	485	489	201	39	175	45	22	23	9	2	8
RWM091	64 138 241	1 294	499	795	217	59	518	83	32	51	14	4	33
RWM092	535 996 023	1 307	516	791	303	124	341	701	277	424	162	66	183
RWM093	132 936 146	1 156	494	662	355	42	249	154	66	88	47	6	33
RWM094	53 425 567	1 110	510	600	348	56	165	59	27	32	19	3	9
RWM100	3 310 726 844	1 272	553	719	241	354	103	4 211	1 831	2 380	798	1 172	341
RWM102	109 778 086	1 643	604	####	333	514	155	180	66	114	37	56	17
RWM103	1 501 683 208	1 345	528	817	266	471	73	2 020	793	1 227	399	707	110
RWM141	134 244 004	1 270	600	670	197	233	202	170	81	90	26	31	27
RWM142	206 869 093	1 178	556	622	294	208	97	244	115	129	61	43	20
RWM151	286 221 112	1 165	589	576	225	68	239	333	169	165	64	19	68
RWR092	53 127 075	1 149	480	669	460	50	146	61	26	36	24	3	8
RWR101	668 137 834	1 240	508	732	258	357	121	828	339	489	172	239	81
Région Wallonne	**16 902 433 197**							**18 715**	**9 143**	**9 572**	**3 287**	**3 359**	**2 468**

1999													
Masse d'eau	**Superficie**	**P**	**ETR**	**EU**	**RD**	**RHL**	**Percolation de base**	**P**	**ETR**	**EU**	**RD**	**RHL**	**Percolation de base**
	m²	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*
RWE013	870 133 971	930	562	368	210	8	139	809	489	320	183	7	121
RWE017	86 861 741	964	538	426	194	19	207	84	47	37	17	2	18
RWE030	477 432 014	934	544	390	82	64	218	446	260	186	39	31	104
RWE031	241 733 768	937	552	385	97	8	251	227	133	93	23	2	61
RWE032	72 550 750	883	543	340	50	10	252	64	39	25	4	1	18
RWE051	964 840 205	924	552	372	96	39	233	892	533	359	93	38	225
RWE053	205 850 010	854	568	286	47	14	244	176	117	59	10	3	50
RWE061	389 398 842	901	565	336	217	3	107	351	220	131	84	1	42
RWE160	483 824 023	976	585	391	304	24	59	472	283	189	147	12	29
RWM011	417 403 193	943	549	394	92	89	203	394	229	164	38	37	85
RWM012	460 640 152	944	543	401	129	162	94	435	250	185	59	75	43
RWM015	226 796 940	927	517	410	123	37	229	210	117	93	28	8	52
RWM016	300 197 285	950	540	410	165	96	144	285	162	123	50	29	43
RWM021	1 660 735 661	1 008	537	471	176	156	127	1 674	892	782	292	259	211
RWM022	442 872 648	1 089	585	504	136	265	71	482	259	223	60	117	31
RWM023	1 504 713 830	1 061	550	511	183	244	56	1 597	828	769	275	367	84
RWM040	429 369 733	962	590	372	55	20	315	413	253	160	24	9	135
RWM041	305 462 640	932	572	360	84	91	196	285	175	110	26	28	60
RWM052	141 721 513	962	548	414	98	19	288	136	78	59	14	3	41
RWM071	38 152 200	933	448	485	221	105	107	36	17	19	8	4	4
RWM072	78 379 828	938	498	440	175	73	137	74	39	34	14	6	11
RWM073	46 079 017	977	492	485	190	40	194	45	23	22	9	2	9
RWM091	64 138 241	1 321	544	777	204	56	502	85	35	50	13	4	32
RWM092	535 996 023	1 307	563	744	291	115	319	701	302	399	156	62	171
RWM093	132 936 146	1 268	538	730	404	42	262	169	72	97	54	6	35
RWM094	53 425 567	1 179	557	622	373	57	172	63	30	33	20	3	9
RWM100	3 310 726 844	1 250	563	687	235	339	90	4 138	1 864	2 274	778	1 122	298
RWM102	109 778 086	1 446	538	908	312	452	129	159	59	100	34	50	14
RWM103	1 501 683 208	1 405	577	828	278	444	68	2 110	866	1 243	417	667	102
RWM141	134 244 004	1 151	588	563	172	194	185	155	79	76	23	26	25
RWM142	206 869 093	1 133	526	607	282	212	89	234	109	126	58	44	18
RWM151	286 221 112	1 081	578	503	177	68	250	309	165	144	51	19	72
RWR092	53 127 075	1 177	538	639	433	48	136	63	29	34	23	3	7
RWR101	668 137 834	1 240	522	718	249	330	111	828	349	480	166	220	74
Région Wallonne	**16 902 433 197**							**18 598**	**9 400**	**9 197**	**3 291**	**3 263**	**2 334**

2000													
Masse d'eau	**Superficie**	**P**	**ETR**	**EU**	**RD**	**RHL**	**Percolation de base**	**P**	**ETR**	**EU**	**RD**	**RHL**	**Percolation de base**
	m²	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*
RWE013	870 133 971	939	591	348	193	9	139	817	514	303	168	8	121
RWE017	86 861 741	997	569	428	190	20	209	87	49	37	17	2	18
RWE030	477 432 014	945	575	370	75	74	238	451	275	177	36	35	114
RWE031	241 733 768	894	558	336	82	8	236	216	135	81	20	2	57
RWE032	72 550 750	966	591	375	51	12	320	70	43	27	4	1	23
RWE051	964 840 205	897	577	320	81	34	207	865	557	309	78	33	200
RWE053	205 850 010	836	592	244	42	11	191	172	122	50	9	2	39
RWE061	389 398 842	980	598	382	240	3	129	382	233	149	93	1	50
RWE160	483 824 023	964	611	353	265	25	57	466	296	171	128	12	28
RWM011	417 403 193	927	583	344	77	81	196	387	243	144	32	34	82
RWM012	460 640 152	965	608	357	115	160	100	445	280	164	53	74	46
RWM015	226 796 940	981	560	421	119	40	279	222	127	95	27	9	63
RWM016	300 197 285	933	600	333	146	71	135	280	180	100	44	21	41
RWM021	1 660 735 661	1 013	609	404	148	154	119	1 682	1 011	671	246	256	198
RWM022	442 872 648	1 092	658	434	107	260	80	484	291	192	47	115	35
RWM023	1 504 713 830	1 057	627	430	155	235	62	1 590	943	647	233	354	93
RWM040	429 369 733	947	611	336	54	19	291	407	262	144	23	8	125
RWM041	305 462 640	898	599	299	56	85	174	274	183	91	17	26	53
RWM052	141 721 513	1 048	592	456	99	22	334	149	84	65	14	3	47
RWM071	38 152 200	929	503	426	194	94	103	35	19	16	7	4	4
RWM072	78 379 828	895	526	369	153	66	120	70	41	29	12	5	9
RWM073	46 079 017	952	531	421	165	36	186	44	24	19	8	2	9
RWM091	64 138 241	1 393	593	800	188	65	554	89	38	51	12	4	36
RWM092	535 996 023	1 389	598	791	307	132	348	744	321	424	165	71	187
RWM093	132 936 146	1 416	588	828	441	54	335	188	78	110	59	7	45
RWM094	53 425 567	1 305	622	683	409	71	207	70	33	36	22	4	11
RWM100	3 310 726 844	1 230	637	593	202	317	97	4 072	2 109	1 963	669	1 050	321
RWM102	109 778 086	1 406	663	743	255	392	140	154	73	82	28	43	15
RWM103	1 501 683 208	1 450	622	828	260	511	77	2 177	934	1 243	390	767	116
RWM141	134 244 004	1 178	671	507	166	180	190	158	90	68	22	24	26
RWM142	206 869 093	1 107	635	472	240	177	88	229	131	98	50	37	18
RWM151	286 221 112	1 106	663	443	182	63	227	317	190	127	52	18	65
RWR092	53 127 075	1 255	575	680	476	53	153	67	31	36	25	3	8
RWR101	668 137 834	1 227	593	634	215	323	115	820	396	424	144	216	77
Région Wallonne	**16 902 433 197**							**18 682**	**10 338**	**8 344**	**2 953**	**3 249**	**2 379**

2001													
Masse d'eau	**Superficie**	**P**	**ETR**	**EU**	**RD**	**RHL**	**Percolation de base**	**P**	**ETR**	**EU**	**RD**	**RHL**	**Percolation de base**
	m²	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*
RWE013	870 133 971	1 083	554	529	306	12	202	942	482	460	266	10	176
RWE017	86 861 741	1 123	503	620	279	27	296	98	44	54	24	2	26
RWE030	477 432 014	1 070	519	551	112	100	322	511	248	263	53	48	154
RWE031	241 733 768	1 038	517	521	133	11	347	251	125	126	32	3	84
RWE032	72 550 750	1 063	560	503	67	17	433	77	41	36	5	1	31
RWE051	964 840 205	1 046	548	498	127	49	312	1 009	529	480	123	47	301
RWE053	205 850 010	897	568	329	52	15	262	185	117	68	11	3	54
RWE061	389 398 842	1 066	563	503	335	5	165	415	219	196	130	2	64
RWE160	483 824 023	1 056	564	492	380	33	76	511	273	238	184	16	37
RWM011	417 403 193	1 054	542	512	114	112	275	440	226	214	48	47	115
RWM012	460 640 152	1 068	531	537	164	222	129	492	245	247	76	102	59
RWM015	226 796 940	1 073	488	585	167	52	340	243	111	133	38	12	77
RWM016	300 197 285	960	518	442	165	102	158	288	156	133	50	31	47
RWM021	1 660 735 661	1 100	524	576	210	187	159	1 827	870	957	349	311	264
RWM022	442 872 648	1 191	567	624	154	349	101	527	251	276	68	155	45
RWM023	1 504 713 830	1 128	537	591	202	302	69	1 697	808	889	304	454	104
RWM040	429 369 733	943	561	382	54	18	294	405	241	164	23	8	126
RWM041	305 462 640	964	571	393	80	101	198	294	174	120	24	31	60
RWM052	141 721 513	1 155	523	632	144	30	451	164	74	90	20	4	64
RWM071	38 152 200	1 038	425	613	273	134	139	40	16	23	10	5	5
RWM072	78 379 828	968	474	494	184	85	157	76	37	39	14	7	12
RWM073	46 079 017	987	478	509	177	44	219	45	22	23	8	2	10
RWM091	64 138 241	1 558	568	990	242	71	630	100	36	63	16	5	40
RWM092	535 996 023	1 552	560	992	391	149	414	832	300	532	210	80	222
RWM093	132 936 146	1 492	554	938	512	57	359	198	74	125	68	8	48
RWM094	53 425 567	1 549	565	984	557	103	304	83	30	53	30	6	16
RWM100	3 310 726 844	1 341	580	761	238	369	104	4 440	1 920	2 519	788	1 222	344
RWM102	109 778 086	1 566	628	938	258	417	139	172	69	103	28	46	15
RWM103	1 501 683 208	1 550	577	973	301	547	82	2 328	866	1 461	452	821	123
RWM141	134 244 004	1 178	577	601	163	190	193	158	77	81	22	26	26
RWM142	206 869 093	1 151	546	605	272	197	92	238	113	125	56	41	19
RWM151	286 221 112	1 119	566	553	189	70	254	320	162	158	54	20	73
RWR092	53 127 075	1 440	574	866	617	66	184	77	30	46	33	4	10
RWR101	668 137 834	1 346	551	795	250	370	125	899	368	531	167	247	84
Région Wallonne	**16 902 433 197**							**20 382**	**9 355**	**11 027**	**3 784**	**3 824**	**2 936**

2002													
Masse d'eau	**Superficie**	**P**	**ETR**	**EU**	**RD**	**RHL**	**Percolation de base**	**P**	**ETR**	**EU**	**RD**	**RHL**	**Percolation de base**
	m²	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*
RWE013	870 133 971	1 089	592	497	291	11	166	948	515	432	253	10	144
RWE017	86 861 741	1 183	592	591	277	24	263	103	51	51	24	2	23
RWE030	477 432 014	1 069	570	499	108	87	277	510	272	238	52	42	132
RWE031	241 733 768	974	552	422	114	9	266	235	133	102	28	2	64
RWE032	72 550 750	969	552	417	55	12	315	70	40	30	4	1	23
RWE051	964 840 205	1 145	620	525	141	47	310	1 105	598	507	136	45	299
RWE053	205 850 010	908	599	309	50	13	222	187	123	64	10	3	46
RWE061	389 398 842	1 071	583	488	316	4	143	417	227	190	123	2	56
RWE160	483 824 023	1 109	614	495	374	28	67	537	297	239	181	14	32
RWM011	417 403 193	1 073	585	488	119	102	249	448	244	204	50	43	104
RWM012	460 640 152	1 082	587	495	162	199	114	498	270	228	75	92	53
RWM015	226 796 940	1 025	540	485	153	43	271	232	122	110	35	10	61
RWM016	300 197 285	988	541	447	173	95	158	297	162	134	52	29	47
RWM021	1 660 735 661	1 109	561	548	210	176	149	1 842	932	910	349	292	247
RWM022	442 872 648	1 206	619	587	161	296	99	534	274	260	71	131	44
RWM023	1 504 713 830	1 139	584	555	212	266	63	1 714	879	835	319	400	95
RWM040	429 369 733	938	557	381	55	18	281	403	239	164	24	8	121
RWM041	305 462 640	1 051	603	448	103	109	205	321	184	137	31	33	63
RWM052	141 721 513	1 200	599	601	157	26	392	170	85	85	22	4	56
RWM071	38 152 200	1 044	481	563	263	113	120	40	18	21	10	4	5
RWM072	78 379 828	997	512	485	197	76	146	78	40	38	15	6	11
RWM073	46 079 017	1 004	499	505	195	39	202	46	23	23	9	2	9
RWM091	64 138 241	1 402	521	881	243	65	595	90	33	57	16	4	38
RWM092	535 996 023	1 472	551	921	386	136	405	789	295	494	207	73	217
RWM093	132 936 146	1 443	549	894	510	51	316	192	73	119	68	7	42
RWM094	53 425 567	1 490	585	905	551	88	258	80	31	48	29	5	14
RWM100	3 310 726 844	1 279	585	694	255	357	96	4 234	1 937	2 298	844	1 182	318
RWM102	109 778 086	1 465	597	868	348	473	123	161	66	95	38	52	14
RWM103	1 501 683 208	1 473	571	902	315	509	77	2 212	857	1 355	473	764	116
RWM141	134 244 004	1 204	589	615	198	218	208	162	79	83	27	29	28
RWM142	206 869 093	1 154	561	593	288	211	92	239	116	123	60	44	19
RWM151	286 221 112	1 094	596	498	184	66	255	313	171	143	53	19	73
RWR092	53 127 075	1 348	542	806	557	59	168	72	29	43	30	3	9
RWR101	668 137 834	1 232	514	718	272	358	115	823	343	480	182	239	77
Région Wallonne	**16 902 433 197**							**20 101**	**9 762**	**10 339**	**3 898**	**3 593**	**2 699**

2003													
Masse d'eau	**Superficie**	**P**	**ETR**	**EU**	**RD**	**RHL**	**Percolation de base**	**P**	**ETR**	**EU**	**RD**	**RHL**	**Percolation de base**
	m²	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*
RWE013	870 133 971	680	555	125	116	7	90	592	483	109	101	6	78
RWE017	86 861 741	649	514	135	92	13	127	56	45	12	8	1	11
RWE030	477 432 014	647	529	118	38	39	137	309	253	56	18	19	65
RWE031	241 733 768	630	535	95	46	5	149	152	129	23	11	1	36
RWE032	72 550 750	653	546	107	26	7	176	47	40	8	2	1	13
RWE051	964 840 205	696	548	148	57	23	128	672	529	143	55	22	123
RWE053	205 850 010	604	517	87	26	8	143	124	106	18	5	2	29
RWE061	389 398 842	699	559	140	136	2	62	272	218	55	53	1	24
RWE160	483 824 023	698	560	138	155	15	42	338	271	67	75	7	20
RWM011	417 403 193	677	549	128	49	48	106	283	229	53	20	20	44
RWM012	460 640 152	687	549	138	71	90	58	316	253	64	33	41	27
RWM015	226 796 940	680	525	155	65	24	149	154	119	35	15	5	34
RWM016	300 197 285	685	508	177	96	61	95	206	153	53	29	18	29
RWM021	1 660 735 661	758	547	211	101	102	69	1 259	908	350	168	169	115
RWM022	442 872 648	736	558	178	67	134	44	326	247	79	30	59	19
RWM023	1 504 713 830	779	567	212	105	136	36	1 172	853	319	158	205	54
RWM040	429 369 733	639	522	117	27	11	186	274	224	50	12	5	80
RWM041	305 462 640	674	553	121	43	52	142	206	169	37	13	16	43
RWM052	141 721 513	689	539	150	48	11	144	98	76	21	7	2	20
RWM071	38 152 200	727	493	234	135	59	61	28	19	9	5	2	2
RWM072	78 379 828	672	498	174	100	40	78	53	39	14	8	3	6
RWM073	46 079 017	694	492	202	99	22	118	32	23	9	5	1	5
RWM091	64 138 241	979	513	466	137	35	305	63	33	30	9	2	20
RWM092	535 996 023	993	534	459	210	85	201	532	286	246	113	46	108
RWM093	132 936 146	951	516	435	287	26	169	126	69	58	38	3	22
RWM094	53 425 567	968	558	410	303	49	151	52	30	22	16	3	8
RWM100	3 310 726 844	895	588	307	132	174	56	2 963	1 947	1 016	437	576	185
RWM102	109 778 086	959	600	359	149	211	81	105	66	39	16	23	9
RWM103	1 501 683 208	990	553	437	168	259	41	1 487	830	656	252	389	62
RWM141	134 244 004	841	567	274	100	120	121	113	76	37	13	16	16
RWM142	206 869 093	860	549	311	174	121	56	178	114	64	36	25	12
RWM151	286 221 112	752	547	205	95	36	142	215	157	59	27	10	41
RWR092	53 127 075	921	541	380	323	31	87	49	29	20	17	2	5
RWR101	668 137 834	866	519	347	141	175	65	579	347	232	94	117	43
Région Wallonne	**16 902 433 197**							**13 430**	**9 367**	**4 063**	**1 899**	**1 819**	**1 410**

2004													
Masse d'eau	**Superficie**	**P**	**ETR**	**EU**	**RD**	**RHL**	**Percolation de base**	**P**	**ETR**	**EU**	**RD**	**RHL**	**Percolation de base**
	m²	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*
RWE013	870 133 971	764	576	188	109	5	64	665	501	164	95	4	56
RWE017	86 861 741	834	557	277	128	11	109	72	48	24	11	1	9
RWE030	477 432 014	761	561	200	51	27	95	363	268	95	24	13	45
RWE031	241 733 768	680	538	142	40	4	96	164	130	34	10	1	23
RWE032	72 550 750	710	579	131	27	4	101	52	42	10	2	0	7
RWE051	964 840 205	860	609	251	83	18	128	830	588	242	80	17	123
RWE053	205 850 010	796	609	187	38	5	97	164	125	38	8	1	20
RWE061	389 398 842	778	599	179	128	1	47	303	233	70	50	0	18
RWE160	483 824 023	846	605	241	177	12	33	409	293	117	86	6	16
RWM011	417 403 193	807	588	219	63	36	93	337	245	91	26	15	39
RWM012	460 640 152	822	593	229	85	72	47	379	273	105	39	33	22
RWM015	226 796 940	795	551	244	86	17	123	180	125	55	20	4	28
RWM016	300 197 285	862	578	284	126	43	80	259	174	85	38	13	24
RWM021	1 660 735 661	880	581	299	109	98	76	1 461	965	497	181	163	126
RWM022	442 872 648	898	624	274	82	133	35	398	276	121	36	59	16
RWM023	1 504 713 830	905	600	305	121	130	37	1 362	903	459	182	196	56
RWM040	429 369 733	890	603	287	47	10	156	382	259	123	20	4	67
RWM041	305 462 640	846	619	227	44	45	98	258	189	69	13	14	30
RWM052	141 721 513	867	579	288	84	11	175	123	82	41	12	2	25
RWM071	38 152 200	810	499	311	153	60	61	31	19	12	6	2	2
RWM072	78 379 828	835	529	306	133	42	67	65	41	24	10	3	5
RWM073	46 079 017	870	533	337	150	24	108	40	25	16	7	1	5
RWM091	64 138 241	1 193	579	614	159	47	403	77	37	39	10	3	26
RWM092	535 996 023	1 201	585	616	234	99	265	644	314	330	125	53	142
RWM093	132 936 146	1 180	572	608	321	36	224	157	76	81	43	5	30
RWM094	53 425 567	1 080	595	485	287	38	118	58	32	26	15	2	6
RWM100	3 310 726 844	1 109	625	484	177	203	73	3 672	2 069	1 602	586	672	242
RWM102	109 778 086	1 145	616	529	161	239	101	126	68	58	18	26	11
RWM103	1 501 683 208	1 195	603	592	200	329	53	1 795	906	889	300	494	80
RWM141	134 244 004	1 127	678	449	132	144	136	151	91	60	18	19	18
RWM142	206 869 093	1 069	614	455	233	136	66	221	127	94	48	28	14
RWM151	286 221 112	1 024	657	367	147	36	145	293	188	105	42	10	42
RWR092	53 127 075	1 264	617	647	440	42	130	67	33	34	23	2	7
RWR101	668 137 834	1 060	568	492	179	211	89	708	380	329	120	141	59
Région Wallonne	**16 902 433 197**							**16 265**	**10 124**	**6 141**	**2 305**	**2 009**	**1 439**

2005													
Masse d'eau	**Superficie**	**P**	**ETR**	**EU**	**RD**	**RHL**	**Percolation de base**	**P**	**ETR**	**EU**	**RD**	**RHL**	**Percolation de base**
	m²	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*
RWE013	870 133 971	841	617	224	127	5	72	732	537	195	111	4	63
RWE017	86 861 741	824	580	244	110	11	111	72	50	21	10	1	10
RWE030	477 432 014	801	595	206	51	30	108	382	284	98	24	14	52
RWE031	241 733 768	764	588	176	52	3	92	185	142	43	13	1	22
RWE032	72 550 750	893	638	255	51	5	140	65	46	19	4	0	10
RWE051	964 840 205	720	572	148	53	15	97	695	552	143	51	14	94
RWE053	205 850 010	630	555	75	23	5	93	130	114	15	5	1	19
RWE061	389 398 842	984	656	328	215	2	75	383	255	128	84	1	29
RWE160	483 824 023	812	616	196	153	11	35	393	298	95	74	5	17
RWM011	417 403 193	689	541	148	43	28	83	288	226	62	18	12	35
RWM012	460 640 152	703	535	168	65	61	43	324	246	77	30	28	20
RWM015	226 796 940	694	499	195	67	15	112	157	113	44	15	3	25
RWM016	300 197 285	698	510	188	93	40	75	210	153	56	28	12	23
RWM021	1 660 735 661	750	534	216	82	81	58	1 246	887	359	136	135	96
RWM022	442 872 648	836	613	223	69	106	32	370	271	99	31	47	14
RWM023	1 504 713 830	799	571	228	94	105	32	1 202	859	343	141	158	48
RWM040	429 369 733	683	539	144	30	10	159	293	231	62	13	4	68
RWM041	305 462 640	655	555	100	27	34	85	200	170	31	8	10	26
RWM052	141 721 513	823	572	251	63	11	169	117	81	36	9	2	24
RWM071	38 152 200	683	451	232	116	48	53	26	17	9	4	2	2
RWM072	78 379 828	682	478	204	99	35	68	53	37	16	8	3	5
RWM073	46 079 017	717	479	238	108	20	99	33	22	11	5	1	5
RWM091	64 138 241	913	586	327	89	25	206	59	38	21	6	2	13
RWM092	535 996 023	976	613	363	150	71	152	523	329	195	80	38	81
RWM093	132 936 146	927	591	336	209	20	128	123	79	45	28	3	17
RWM094	53 425 567	931	622	309	212	31	96	50	33	17	11	2	5
RWM100	3 310 726 844	969	587	382	144	179	63	3 208	1 943	1 265	477	593	209
RWM102	109 778 086	1 188	603	585	178	287	106	130	66	64	20	32	12
RWM103	1 501 683 208	966	607	359	134	199	34	1 451	912	539	201	299	51
RWM141	134 244 004	891	554	337	98	128	134	120	74	45	13	17	18
RWM142	206 869 093	966	561	405	200	141	66	200	116	84	41	29	14
RWM151	286 221 112	794	555	239	97	34	134	227	159	68	28	10	38
RWR092	53 127 075	920	590	330	253	24	72	49	31	18	13	1	4
RWR101	668 137 834	964	550	414	157	188	70	644	367	277	105	126	47
Région Wallonne	**16 902 433 197**							**14 338**	**9 741**	**4 597**	**1 844**	**1 609**	**1 215**

2006													
Masse d'eau	**Superficie**	**P**	**ETR**	**EU**	**RD**	**RHL**	**Percolation de base**	**P**	**ETR**	**EU**	**RD**	**RHL**	**Percolation de base**
	m²	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*
RWE013	870 133 971	824	559	265	149	7	98	717	486	231	130	6	85
RWE017	86 861 741	849	529	320	142	14	156	74	46	28	12	1	14
RWE030	477 432 014	805	541	264	57	48	157	384	258	126	27	23	75
RWE031	241 733 768	734	528	206	55	5	141	177	128	50	13	1	34
RWE032	72 550 750	837	588	249	41	8	199	61	43	18	3	1	14
RWE051	964 840 205	855	590	265	75	20	144	825	569	256	72	19	139
RWE053	205 850 010	733	580	153	30	4	73	151	119	31	6	1	15
RWE061	389 398 842	889	589	300	205	2	85	346	229	117	80	1	33
RWE160	483 824 023	837	579	258	183	15	40	405	280	125	89	7	19
RWM011	417 403 193	818	557	261	64	44	132	341	232	109	27	18	55
RWM012	460 640 152	849	555	294	99	104	67	391	256	135	46	48	31
RWM015	226 796 940	838	518	320	98	24	169	190	117	73	22	5	38
RWM016	300 197 285	862	555	307	134	48	98	259	167	92	40	14	29
RWM021	1 660 735 661	891	548	343	118	111	91	1 480	910	570	196	184	151
RWM022	442 872 648	979	581	398	112	203	56	434	257	176	50	90	25
RWM023	1 504 713 830	930	565	365	134	159	48	1 399	850	549	202	239	72
RWM040	429 369 733	852	557	295	46	12	177	366	239	127	20	5	76
RWM041	305 462 640	773	570	203	35	41	82	236	174	62	11	13	25
RWM052	141 721 513	917	548	369	91	16	252	130	78	52	13	2	36
RWM071	38 152 200	815	472	343	167	67	73	31	18	13	6	3	3
RWM072	78 379 828	809	497	312	136	48	85	63	39	24	11	4	7
RWM073	46 079 017	881	509	372	156	28	126	41	23	17	7	1	6
RWM091	64 138 241	1 180	563	617	165	43	398	76	36	40	11	3	26
RWM092	535 996 023	1 189	557	632	237	92	276	637	299	339	127	49	148
RWM093	132 936 146	1 219	563	656	349	36	227	162	75	87	46	5	30
RWM094	53 425 567	1 123	580	543	321	41	126	60	31	29	17	2	7
RWM100	3 310 726 844	1 076	567	509	186	228	81	3 562	1 877	1 685	616	755	268
RWM102	109 778 086	1 207	566	641	194	311	124	133	62	70	21	34	14
RWM103	1 501 683 208	1 233	578	655	226	335	56	1 852	868	984	339	503	84
RWM141	134 244 004	990	518	472	125	162	162	133	70	63	17	22	22
RWM142	206 869 093	1 007	522	485	228	170	81	208	108	100	47	35	17
RWM151	286 221 112	903	576	327	123	37	145	258	165	94	35	11	42
RWR092	53 127 075	1 280	606	674	445	43	136	68	32	36	24	2	7
RWR101	668 137 834	1 112	543	569	213	239	99	743	363	380	142	160	66
Région Wallonne	**16 902 433 197**							**16 393**	**9 505**	**6 888**	**2 525**	**2 268**	**1 712**

2007													
Masse d'eau	**Superficie**	**P**	**ETR**	**EU**	**RD**	**RHL**	**Percolation de base**	**P**	**ETR**	**EU**	**RD**	**RHL**	**Percolation de base**
	m²	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*
RWE013	870 133 971	897	594	303	180	7	112	781	517	264	157	6	97
RWE017	86 861 741	940	598	342	155	15	163	82	52	30	13	1	14
RWE030	477 432 014	851	582	269	58	50	161	406	278	128	28	24	77
RWE031	241 733 768	808	581	227	56	5	147	195	140	55	14	1	36
RWE032	72 550 750	865	584	281	42	9	234	63	42	20	3	1	17
RWE051	964 840 205	874	588	286	78	27	183	843	567	276	75	26	177
RWE053	205 850 010	837	586	251	44	10	171	172	121	52	9	2	35
RWE061	389 398 842	939	596	343	239	3	105	366	232	134	93	1	41
RWE160	483 824 023	888	590	298	229	20	51	430	285	144	111	10	25
RWM011	417 403 193	858	572	286	68	56	160	358	239	119	28	23	67
RWM012	460 640 152	903	588	315	105	126	78	416	271	145	48	58	36
RWM015	226 796 940	898	557	341	104	29	199	204	126	77	24	7	45
RWM016	300 197 285	887	569	318	137	58	112	266	171	95	41	17	34
RWM021	1 660 735 661	966	594	372	139	124	105	1 604	986	618	231	206	174
RWM022	442 872 648	1 070	656	414	127	222	64	474	291	183	56	98	28
RWM023	1 504 713 830	1 058	646	412	164	187	51	1 592	972	620	247	281	77
RWM040	429 369 733	891	582	309	49	15	238	383	250	133	21	6	102
RWM041	305 462 640	852	590	262	47	64	129	260	180	80	14	20	39
RWM052	141 721 513	993	596	397	95	19	286	141	84	56	13	3	41
RWM071	38 152 200	903	514	389	189	80	84	34	20	15	7	3	3
RWM072	78 379 828	888	528	360	153	54	102	70	41	28	12	4	8
RWM073	46 079 017	914	524	390	164	29	147	42	24	18	8	1	7
RWM091	64 138 241	1 361	670	691	195	55	459	87	43	44	13	4	29
RWM092	535 996 023	1 388	668	720	308	113	308	744	358	386	165	61	165
RWM093	132 936 146	1 458	681	777	473	45	281	194	91	103	63	6	37
RWM094	53 425 567	1 395	683	712	460	68	199	75	36	38	25	4	11
RWM100	3 310 726 844	1 288	662	626	227	298	90	4 264	2 192	2 073	752	987	298
RWM102	109 778 086	1 560	662	898	281	450	146	171	73	99	31	49	16
RWM103	1 501 683 208	1 485	707	778	283	444	68	2 230	1 062	1 168	425	667	102
RWM141	134 244 004	1 213	621	592	185	199	187	163	83	79	25	27	25
RWM142	206 869 093	1 145	620	525	259	172	79	237	128	109	54	36	16
RWM151	286 221 112	1 022	629	393	154	48	178	293	180	112	44	14	51
RWR092	53 127 075	1 245	648	597	453	44	132	66	34	32	24	2	7
RWR101	668 137 834	1 328	645	683	250	332	114	887	431	456	167	222	76
Région Wallonne	**16 902 433 197**							**18 592**	**10 602**	**7 990**	**3 039**	**2 877**	**2 014**

2008													
Masse d'eau	**Superficie**	**P**	**ETR**	**EU**	**RD**	**RHL**	**Percolation de base**	**P**	**ETR**	**EU**	**RD**	**RHL**	**Percolation de base**
	m²	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*
RWE013	870 133 971	930	620	310	184	8	121	809	539	270	160	7	105
RWE017	86 861 741	970	618	352	170	16	169	84	54	31	15	1	15
RWE030	477 432 014	963	611	352	83	64	204	460	292	168	40	31	97
RWE031	241 733 768	934	598	336	89	7	215	226	145	81	22	2	52
RWE032	72 550 750	860	588	272	42	9	228	62	43	20	3	1	17
RWE051	964 840 205	886	618	268	79	27	171	855	596	259	76	26	165
RWE053	205 850 010	813	631	182	36	10	177	167	130	37	7	2	36
RWE061	389 398 842	935	618	317	221	3	93	364	241	123	86	1	36
RWE160	483 824 023	904	604	300	236	20	52	437	292	145	114	10	25
RWM011	417 403 193	868	605	263	68	57	147	362	253	110	28	24	61
RWM012	460 640 152	885	586	299	102	130	82	408	270	138	47	60	38
RWM015	226 796 940	872	564	308	100	30	194	198	128	70	23	7	44
RWM016	300 197 285	969	616	353	155	77	132	291	185	106	47	23	40
RWM021	1 660 735 661	936	570	366	138	135	103	1 554	947	608	229	224	171
RWM022	442 872 648	1 016	606	410	112	230	73	450	268	182	50	102	32
RWM023	1 504 713 830	1 001	571	430	162	220	58	1 506	859	647	244	331	87
RWM040	429 369 733	935	628	307	50	16	258	401	270	132	21	7	111
RWM041	305 462 640	842	614	228	47	58	148	257	188	70	14	18	45
RWM052	141 721 513	969	620	349	93	16	244	137	88	49	13	2	35
RWM071	38 152 200	854	482	372	175	83	86	33	18	14	7	3	3
RWM072	78 379 828	919	543	376	154	62	118	72	43	29	12	5	9
RWM073	46 079 017	1 017	562	455	195	34	174	47	26	21	9	2	8
RWM091	64 138 241	1 287	575	712	185	55	471	83	37	46	12	4	30
RWM092	535 996 023	1 295	581	714	282	113	309	694	311	383	151	61	166
RWM093	132 936 146	1 237	580	657	364	40	252	164	77	87	48	5	33
RWM094	53 425 567	1 326	614	712	424	73	215	71	33	38	23	4	11
RWM100	3 310 726 844	1 199	594	605	208	309	92	3 970	1 967	2 003	689	1 023	305
RWM102	109 778 086	1 412	622	790	256	406	140	155	68	87	28	45	15
RWM103	1 501 683 208	1 334	590	744	242	434	68	2 003	886	1 117	363	652	102
RWM141	134 244 004	1 112	590	522	150	181	189	149	79	70	20	24	25
RWM142	206 869 093	1 120	595	525	253	186	83	232	123	109	52	38	17
RWM151	286 221 112	1 019	642	377	144	50	190	292	184	108	41	14	54
RWR092	53 127 075	1 209	585	624	443	46	134	64	31	33	24	2	7
RWR101	668 137 834	1 249	584	665	231	320	116	835	390	444	154	214	78
Région Wallonne	**16 902 433 197**							**17 893**	**10 059**	**7 834**	**2 873**	**2 973**	**2 078**

2009													
Masse d'eau	**Superficie**	**P**	**ETR**	**EU**	**RD**	**RHL**	**Percolation de base**	**P**	**ETR**	**EU**	**RD**	**RHL**	**Percolation de base**
	m²	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*
RWE013	870 133 971	777	555	222	123	6	86	676	483	193	107	5	75
RWE017	86 861 741	782	540	242	108	11	114	68	47	21	9	1	10
RWE030	477 432 014	748	534	214	48	35	120	357	255	102	23	17	57
RWE031	241 733 768	742	525	217	53	5	148	179	127	52	13	1	36
RWE032	72 550 750	767	542	225	35	7	174	56	39	16	3	1	13
RWE051	964 840 205	727	532	195	57	18	110	701	513	188	55	17	106
RWE053	205 850 010	694	547	147	30	6	110	143	113	30	6	1	23
RWE061	389 398 842	799	553	246	161	2	79	311	215	96	63	1	31
RWE160	483 824 023	766	553	213	157	13	37	371	268	103	76	6	18
RWM011	417 403 193	703	508	195	47	39	97	293	212	81	20	16	40
RWM012	460 640 152	735	520	215	75	73	50	339	240	99	35	34	23
RWM015	226 796 940	727	488	239	72	18	122	165	111	54	16	4	28
RWM016	300 197 285	686	475	211	92	40	73	206	143	63	28	12	22
RWM021	1 660 735 661	803	517	286	99	97	72	1 334	859	475	164	161	120
RWM022	442 872 648	880	559	321	83	164	46	390	248	142	37	73	20
RWM023	1 504 713 830	917	578	339	124	147	43	1 380	870	510	187	221	65
RWM040	429 369 733	683	529	154	28	8	132	293	227	66	12	3	57
RWM041	305 462 640	656	519	137	26	33	83	200	159	42	8	10	25
RWM052	141 721 513	793	558	235	57	10	156	112	79	33	8	1	22
RWM071	38 152 200	773	448	325	159	64	65	29	17	12	6	2	2
RWM072	78 379 828	673	445	228	97	37	73	53	35	18	8	3	6
RWM073	46 079 017	739	468	271	100	23	114	34	22	12	5	1	5
RWM091	64 138 241	1 153	582	571	144	39	360	74	37	37	9	3	23
RWM092	535 996 023	1 201	590	611	227	90	254	644	316	327	122	48	136
RWM093	132 936 146	1 193	606	587	308	31	195	159	81	78	41	4	26
RWM094	53 425 567	1 236	624	612	349	51	152	66	33	33	19	3	8
RWM100	3 310 726 844	1 077	595	482	173	210	72	3 566	1 970	1 596	573	695	238
RWM102	109 778 086	1 194	627	567	186	262	102	131	69	62	20	29	11
RWM103	1 501 683 208	1 217	597	620	209	314	51	1 828	897	931	314	472	77
RWM141	134 244 004	1 028	601	427	129	130	147	138	81	57	17	17	20
RWM142	206 869 093	957	534	423	199	139	67	198	110	88	41	29	14
RWM151	286 221 112	836	558	278	106	33	129	239	160	80	30	9	37
RWR092	53 127 075	1 077	577	500	321	34	104	57	31	27	17	2	6
RWR101	668 137 834	1 084	576	508	183	209	85	724	385	339	122	140	57
Région Wallonne	**16 902 433 197**							**15 514**	**9 448**	**6 066**	**2 212**	**2 043**	**1 455**

2010												
Masse d'eau	**Superficie**	**P**	**ETR**	**RD**	**RHL**	**Percolation de base**	**P**	**ETR**	**EU**	**RD**	**RHL**	**Percolation de base**
	m²	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*mm*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*	*Mm³*
RWE013	870 133 971	861	558	172	7	103	749	486	264	150	6	90
RWE017	86 861 741	905	535	171	14	150	79	46	32	15	1	13
RWE030	477 432 014	907	551	88	53	175	433	263	170	42	25	84
RWE031	241 733 768	867	544	92	6	184	210	132	78	22	1	44
RWE032	72 550 750	800	548	50	7	180	58	40	18	4	1	13
RWE051	964 840 205	791	544	83	19	120	763	525	238	80	18	116
RWE053	205 850 010	711	535	39	5	85	146	110	36	8	1	17
RWE061	389 398 842	797	551	164	2	78	310	215	96	64	1	30
RWE160	483 824 023	879	570	230	19	39	425	276	150	111	9	19
RWM011	417 403 193	806	532	72	44	128	336	222	114	30	18	53
RWM012	460 640 152	830	520	106	100	61	382	240	143	49	46	28
RWM015	226 796 940	835	501	114	24	167	189	114	76	26	5	38
RWM016	300 197 285	727	475	115	39	75	218	143	76	35	12	23
RWM021	1 660 735 661	847	496	121	106	84	1407	824	583	201	176	140
RWM022	442 872 648	920	530	105	185	61	407	235	173	47	82	27
RWM023	1 504 713 830	858	517	125	147	43	1291	778	513	188	221	65
RWM040	429 369 733	739	520	40	8	129	317	223	94	17	3	55
RWM041	305 462 640	735	541	41	38	70	225	165	59	13	12	21
RWM052	141 721 513	906	533	109	14	220	128	76	53	15	2	31
RWM071	38 152 200	845	436	198	73	73	32	17	16	8	3	3
RWM072	78 379 828	717	454	119	40	67	56	36	21	9	3	5
RWM073	46 079 017	753	442	140	25	119	35	20	14	6	1	5
RWM091	64 138 241	1077	529	135	38	338	69	34	35	9	2	22
RWM092	535 996 023	1163	524	233	103	244	623	281	343	125	55	131
RWM093	132 936 146	1108	536	330	34	213	147	71	76	44	5	28
RWM094	53 425 567	1184	535	364	62	188	63	29	35	19	3	10
RWM100	3 310 726 844	1014	541	158	209	73	3357	1791	1566	523	692	242
RWM102	109 778 086	1210	549	173	286	115	133	60	73	19	31	13
RWM103	1 501 683 208	1095	532	171	286	47	1644	799	845	257	429	71
RWM141	134 244 004	1188	525	157	177	214	159	70	89	21	24	29
RWM142	206 869 093	1022	493	230	165	78	211	102	109	48	34	16
RWM151	286 221 112	879	520	131	41	151	252	149	103	37	12	43
RWR092	53 127 075	1041	544	359	37	111	55	29	26	19	2	6
RWR101	668 137 834	1045	522	176	237	85	698	349	349	118	158	57
Région Wallonne	**16 902 433 197**						**15 612**	**8 946**	**6 665**	**2 377**	**2 097**	**1 587**