

Analyse comparative de différentes démarches de modélisation hydrologique pour la représentation de la couverture forestière dans le bassin versant de la Houille

(Contribution au projet INTERREG : P2IH)

Deborah DERAEDT

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT

ANNÉE ACADEMIQUE 2010-2011

Promoteur(s): Dr. Ir. Aurore DEGRE

Le présent document n'engage que son auteur

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique¹ de Gembloux Agro-Bio Tech.

¹ Dans ce cas, l'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de GxABT.

Analyse comparative de différentes démarches de modélisation hydrologique pour la représentation de la couverture forestière dans le bassin versant de la Houille

(Contribution au projet INTERREG : P2IH)

Deborah DERAEDT

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT

ANNÉE ACADÉMIQUE 2010-2011

Promoteur(s): Dr. Ir. Aurore DEGRE

REMERCIEMENTS

Je tiens avant tout à remercier ma promotrice, Madame Aurore Degré pour son aide précieuse et sa grande disponibilité.

Je tiens également à adresser un tout grand merci à Messieurs Didier de Thysebaert, Didier Deglin et Sébastien Gailliez ainsi que tout le service des cours d'eau non navigables du SpW pour leur accueil, leur aide et leur humour lors de la partie « stage » de mon TFE.

Je remercie Mr Stéphane Becquevort pour les trajets vers les sites d'étude, son aide à l'installation des capteurs et au prélèvement des échantillons de terre.

Merci à Mr François Ridremont du service de Gestion des Ressources forestières et des Milieux naturels pour son aide au choix des sites d'étude et à la mise en place des capteurs.

Je remercie Mr Alexandre Prescler, d'Ardenne Rive de Meuse, pour toutes les informations et données qu'il m'a fournies pour la partie française du bassin versant.

Je voudrais dire merci à Joran Beekerk van Ruth pour son aide à la calibration des capteurs et pour le temps qu'il a passé à répondre à mes questions.

Merci aussi à tous les professeurs et assistants qui ont participé à ma formation au cours de ces années passées à Gembloux.

Et toutes les autres personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

A vous tous, je dis MERCI !

RÉSUMÉ

La représentation de la couverture forestière est très souvent négligée par les modèles plus simplificateurs. Elle a néanmoins un impact non négligeable, par exemple, de par les prélèvements qui suivent une variation saisonnière. La comparaison des deux modèles globaux, PDM et GR4J, a mis en évidence une faible qualité de simulation sur le bassin versant fortement boisé de la Houille (Belgique). Dans le cas de PDM les résultats sont décevants aussi bien en calibration qu'en validation, avec des critères de Nash valant respectivement 0.65 et 0.52. La calibration de GR4J était un peu plus prometteuse mais la validation a prouvé la faiblesse du modèle lorsqu'il s'agit de simuler les pics dus à la fonte des neiges avec un coefficient de Nash passant de 0.81 à 0.65. Le modèle EPIC a été testé en y introduisant les paramètres de végétation conseillés pour SWAT (qui utilise le même module de croissance végétale) pour l'épicéa et le chêne. Les paramètres caractérisant le sol sont ajustés aux valeurs de teneur en eau obtenues sur deux sites de mesures. L'un est situé sous une pessière et l'autre sous une chênaie. La comparaison de la simulation du modèle EPIC ainsi construit et des mesures *in situ* montrent de grande différence en termes de prélèvement d'eau. Le modèle a tendance à surestimer fortement la consommation d'eau de la végétation. Ceci prouve l'importance d'utiliser des paramètres de végétation corrects afin de rester représentatif de la dynamique du site et à plus grande échelle, du bassin versant.

ABSTRACT

The more simplistic models often overlook the representation of forest cover. Nevertheless it has a significant impact with water uptakes that follows a seasonal variation for example. The comparison of the two global models, PDM and GR4J, highlights the poor quality of simulation on the wooded watershed of the Houille (Belgium). In the case of PDM results are disappointing both in calibration and in validation. The Nash criteria are 0.65 and 0.52 respectively. Calibration of GR4J was a little more promising. But the validation has proved the weakness of the model to simulate the peaks coming from melting snow. The Nash coefficients go down from 0.81 to 0.65. We have tested the EPIC model with the plant parameters recommended for SWAT (which uses the same plant growth module) for spruce and oak. The parameters characterizing the soil are adjusted to the water content values obtained on two measurement sites. One is located in a spruce stand and the other in an oak stand. The comparison of the EPIC model simulation, as describes before, and *in situ* measurements shows an important difference in terms of water uptake. The model tends to overestimate trees water consumption. It proves the importance of using proper plant parameters to remain representative of the site dynamics and on larger scale, of the watershed dynamics.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	i
Résumé	ii
Abstract	ii
Table des matières	iii
Liste des sigles et abréviations	v
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	viii
1. Introduction.....	1
2. Bibliographie.....	3
2.1. Les différents schémas de modélisation.....	3
2.1.1. Les modèles « boite noire ».....	4
2.1.2. Les modèles « boite grise ».....	5
2.1.3. Les modèles conceptuels à base physique	6
2.1.4. Les modèles physiques	6
2.2. Le bassin versant de la Houille	8
2.2.1. Contexte du Projet INTERREG	8
2.2.2. L'hydrographie.....	9
2.2.3. La topographie	10
2.2.4. La géologie et la pédologie	11
2.2.5. L'occupation du sol.....	12
2.3. La métrologie.....	13
2.3.1. La limnimétrie	13
2.3.2. La météorologie	18
2.3.3. Les mesures d'humidité.....	22
3. Matériel et méthode	25
3.1. Les modèles utilisés.....	25
3.1.1. PDM	25
3.1.2. GR4J.....	28
3.1.3. EPIC.....	32
3.2. Le matériel de mesure du taux d'humidité	37

3.3.	Les sites de mesure.....	39
3.4.	Les démarches de modélisation.....	41
3.4.1.	La calibration	41
3.4.2.	La validation	42
3.4.3.	Les fonctions objectifs choisies.....	43
4.	Résultats	45
4.1.	PDM	45
4.1.1.	Pas de temps journalier	45
4.1.2.	Pas de temps horaire	49
4.2.	GR4J	52
4.3.	Mesures de teneur en eau	55
4.4.	EPIC	58
5.	Discussion	61
5.1.	PDM	61
5.2.	GR4J	62
5.3.	Comparaison de PDM et GR4J.....	64
5.4.	Teneur en eau.....	65
5.5.	Comparaison d'EPIC et des mesures de teneur en eau.....	66
6.	Conclusion	70
7.	Perspectives.....	71
8.	Bibliographie.....	74
9.	Annexes.....	80
9.1.	Vérification de la cohérence des données limnimétriques.....	80
9.2.	Vérification de la cohérence des données météorologiques	83
9.3.	Calibration des capteurs	84

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ADCP : Acoustic Doppler Current Profiler

DdF : Débit-Durée-Fréquence

ddp : Différence De Potentiel

EPIC : Erosion Productivity Impact Calculator

ETo : EvapoTranspiration de référence

ETM : EvapoTranspiration Maximale

ETP : EvapoTranspiration Potentielle

ETR : EvapoTranspiration Réelle

GIS : Geographic Information System

GR4J : modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier

HRU : Hydrological Response Units

LAI : Leaf Area Index

P2IH : Projet Interreg Inondations Houille

PDM : Probability Distributed Model

SHE : Système Hydrologique Européen

SWAT : Soil and Water Assessment Tool

TDR : Time Domain Reflectrometry

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Représentation du cycle de l'eau selon Aristote	1
Figure 2 : Classification schématique des modèles hydrologiques.....	1
Figure 3 : Aménagements de lutte contre les inondations à Givet	8
Figure 4 : La Houille à Vencimont	8
Figure 5 : Localisation du bassin versant de la Houille	9
Figure 6 : Modèle numérique de terrain.....	10
Figure 7 : Classes des pentes	10
Figure 8 : Carte géologique	11
Figure 9 : Carte numérique des sols de Wallonie.....	11
Figure 10 : Carte d'occupation du sol	12
Figure 11 : Localisation des stations limnimétriques	17
Figure 12 : Représentation du modèle PDM	25
Figure 13 : Structure de GR4J	28
Figure 14 : Zone d'influence du capteur	37
Figure 15 : Calibration des capteurs	35
Figure 16 : Photographie aérienne de la pessière (site 1).....	39
Figure 17 : Zoom sur le bas du profil (site 1)	39
Figure 18 : Profil du sol du site 1	39
Figure 19 : Photographie aérienne de la chênaie (site 2).....	40
Figure 20 : Zoom sur le bas du profil (site 2)	40
Figure 21 : Profil du sol du site 2.....	40
Figure 22 : Série chronologique des débits journaliers observés et simulés par PDM.....	47
Figure 23 : Comparaison des débits journaliers observés et simulés par PDM.....	47
Figure 24 : Série chronologique des débits journaliers observés et simulés par PDM.	48
Figure 25 : Comparaison des débits journaliers observés et simulés par PDM.....	48
Figure 26: Série chronologique des débits horaires observés et simulés par PDM.....	50
Figure 27 : Comparaison des débits horaires observés et simulés par PDM.	50
Figure 28 : Série chronologique des débits horaires observés et simulés par PDM.....	51
Figure 29: Comparaison des débits horaires observés et simulés par PDM.....	51
Figure 30 : Série chronologique des débits observés et simulés par GR4J.	53
Figure 31 : Comparaison des débits observés et simulés par GR4J.....	53
Figure 32 : Série chronologique des débits observés et simulés par GR4J.....	54
Figure 33 : Comparaison des débits observés et simulés par GR4J.....	54
Figure 34 : Evolution de la teneur en eau du sol à trois profondeurs sous la pessière.	56
Figure 35 : Evolution de la teneur en eau du sol à trois profondeurs la une chênaie.	57
Figure 36 : Evolution de la teneur en eau simulée dans les différentes couches du profil sous la pessière.....	59
Figure 37 : Evolution de la teneur en eau simulée dans les différentes couches du profil sous la chênaie	60
Figure 38 : Comparaison des débits observés et simulés par GR4J.....	62
Figure 39 : Comparaison des débits observés et simulés par GR4J.....	64
Figure 40 : Evolution des teneurs en eau du sol observée et simulée par EPIC sous la pessière	68

Figure 41 : Evolution des teneurs en eau du sol observée et simulée par EPIC sous la chênaie.	69
Figure 42 : Graphique de comparaison des débits de la Houille en 2001	80
Figure 43 : Graphique des lames d'eau écoulées	81
Figure 44 : Graphique de comparaison des précipitations et des lames d'eau à Gedinne.....	82
Figure 45 : Courbe DdF - Débit-durée-Fréquence	82
Figure 46 : Graphique des précipitations cumulées.....	83
Figure 47 : Courbe de calibration du sol de la pessière à 16 cm de profondeur	85
Figure 48 : Courbe de calibration du sol de la pessière à 43.5 cm de profondeur.....	85
Figure 49 : Courbe de calibration du sol de la pessière à 67 cm de profondeur	86
Figure 50 : Courbe de calibration du sol de la chênaie à 16 cm de profondeur.....	86
Figure 51 : Courbe de calibration du sol de la chênaie à 43.5 cm de profondeur	87
Figure 52 : Courbe de calibration du sol de la chênaie à 67 cm de profondeur	87

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Constantes diélectriques de différents matériaux.....	23
Tableau 2 : Différence relative des coefficients d'écoulement observés et simulés	45
Tableau 3 : Critère de Nash-Sutcliffe de la calibration et de la validation du modèle PDM au pas de temps journalier.....	45
Tableau 4 : Différence relative des coefficients d'écoulement observés et simulés.....	49
Tableau 5 : Critère de Nash-Sutcliffe de la calibration et de la validation du modèle PDM au pas de temps horaire	49
Tableau 6 : Différence relative des coefficients d'écoulement observés et simulés.....	52
Tableau 7 : Critère de Nash-Sutcliffe de la calibration et de la validation du modèle PDM	52
Tableau 8 : Différence relative des coefficients d'écoulement observés et simulés.....	61
Tableau 9 : Critère de nash-sutcliffe de la calibration et de la validation du modèle PDM journalier et horaire.....	62
Tableau 10 : Comparaison des coefficient de Nash de la validation 2009-2010.....	63
Tableau 11 : Critère de Nash-Sutcliffe de la calibration et de la validation des deux modèles	65
Tableau 12 : Critère de Nash-Sutcliffe des pics de crues de la calibration et de la validation des deux modèles	65
Tableau 13 : Densité apparente des couches de sol utilisées pour la calibration	84
Tableau 14 : Mesures de calibration	84

1. INTRODUCTION

Dans un premier temps expliquée par des mythes pour être ensuite mieux appréhendée, l'eau est un élément qui a toujours fasciné l'homme. Anaxagore (500-428 av. JC) fut l'un des premiers à expliquer le cycle de l'eau d'une manière plus « scientifique ».

« ... Rivers are formed from rains and from the waters in the earth; for the earth is hollow and holds water in its cavities...»

« ... The Nile increases during the summer when waters are carried into it from the snows in the southern regions... » (Anaxagore traduit par Curd, 2007)

Platon (428-347 av. JC), de son côté, pensait que l'eau des mers se déplaçait jusque sous les montagnes, au centre de la terre, pour y former un réservoir ; le Tartaros. Le mouvement d'oscillation de l'eau autour de la terre la faisait alors remonter jusqu'aux sources qui alimentaient les rivières (L'Hote, 1990).

Aristote (384-322 av. JC) reprit le concept de son maître pour le critiquer et modifier quelques points. Selon lui, les précipitations alimentent elles aussi les réservoirs. Il pensait également que ni le ciel ni la terre ne peuvent contenir toute l'eau, il faut donc nécessairement qu'elle se transforme en vapeur par l'action du soleil pour prendre moins de place². Ainsi en se refroidissant, elle forme à nouveau de l'eau sous forme de précipitations ou sous forme de sources. Les rivières jaillissent des montagnes au dessus des réservoirs car ces montagnes étant froides, l'eau se condense et suinte de la terre (Figure 1). Il réfute ainsi l'idée du Tartaros et de l'oscillation des eaux qui le forment (Aristote traduit par Barthélemy Saint-Hilaire, 1963).

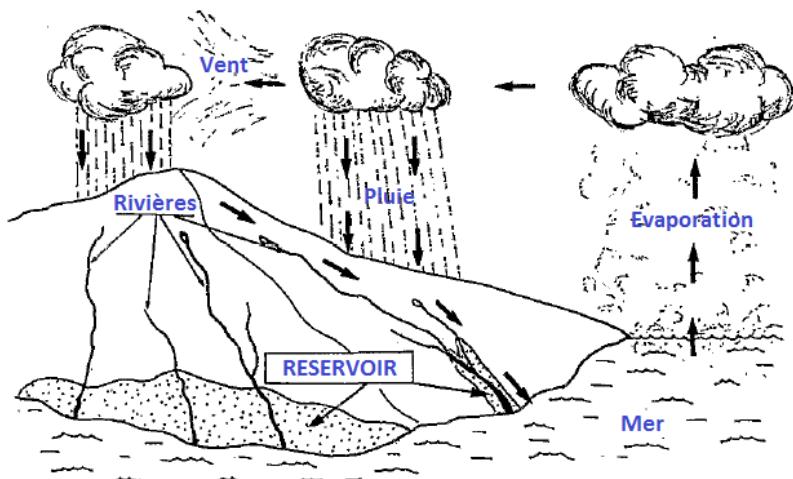


FIGURE 1 : PRÉSENTATION DU CYCLE DE L'EAU SELON ARISTOTE (L'HOTE, 1990)

Grâce à Léonard de Vinci (1452-1519) et Pierre Perrault (1608-1680) le cycle de l'eau va enfin aboutir au concept communément accepté de nos jours (L'Hote, 1990).

Bien que l'eau ait été rapidement domptée à travers de nombreux ouvrages tels que des puits, des ponts, des aqueducs, des barrages,... il fallut attendre l'ingénieur irlandais Mulvany, en

² Pour Aristote, l'eau sous forme de vapeur ne prend pas beaucoup de place puisqu'elle est invisible.

INTRODUCTION

1850, pour aboutir à la première modélisation hydrologique (Musy *et al.*, 2004). Celle-ci consistait en une relation entre les précipitations et le débit qui prend en compte la superficie du bassin versant et un coefficient de ruissellement. Cette formule, bien que fortement simplificatrice, est encore utilisée de nos jours en raison de sa simplicité.

Par la suite, les XXème et XXIème siècles furent très fructueux en termes d'amélioration des modèles hydrologiques. En 1933, Horton propose la première explication physique de l'origine des crues. Le sol infiltre la précipitation mais lorsque la capacité d'infiltration du sol est dépassée, l'eau excédentaire ruisselle et va gonfler les cours d'eau (Musy *et al.*, 2004). En 1966, à Standford, le premier modèle informatisé est créé. Sont alors apparus de très nombreux autres modèles d'où deux tendances peuvent se dégager. Une qui tend à rendre les modèles plus généraux et simples et l'autre qui va vers une spécialisation poussée. Plus récemment, avec l'apparition des GIS (Geographic Information System), une nouvelle vague de développement de modèles a été observée.

De nos jours, une grande diversité de modèles coexiste et c'est à l'ingénieur de déterminer celui qui se révèlera le plus approprié à la situation.

Parmi tous ces modèles seulement quelques uns prennent en compte la couverture forestière. Ce travail va permettre de comparer deux types de modèles qui ne tiennent pas compte du couvert et de déterminer leur efficacité quant à la représentation d'un bassin versant forestier, à savoir le bassin versant de la Houille. Un modèle conceptuel à base physique sera également utilisé afin de comparer ses simulations de teneur en eau dans le sol avec les mesures réalisées *in situ*. Les stations de mesure d'humidité sont placées en deux endroits, pour permettre la comparaison entre un couvert de feuillus et un couvert de conifères.

L'objectif de ce travail est de réaliser une première approche des paramètres disponibles dans la littérature pour chacun des trois modèles étudiés. Ceci afin d'évaluer leur efficacité dans le but ultérieur de pouvoir représenter correctement un bassin versant forestier. Il tentera également de mettre en avant quelques différences de comportement entre deux essences forestières ; le chêne (*Quercus petraea (Mattus.) Liebl.*) et l'épicéa (*Picea abies (L.) KARST*).

Ce travail commence par une bibliographie qui explique les différents types de modèles hydrologiques existants, présente le bassin versant étudié et détaille la métrologie utilisée. Ensuite un chapitre « Matériel et méthode » décrit les modèles et le matériel choisis pour ce travail et les raisons de ces choix. On retrouve également dans ce point un exposé théorique sur la calibration et la validation. La partie suivante présente les résultats et est suivie d'une discussion de ceux-ci. Ce travail se termine sur une conclusion et les perspectives.

BIBLIOGRAPHIE

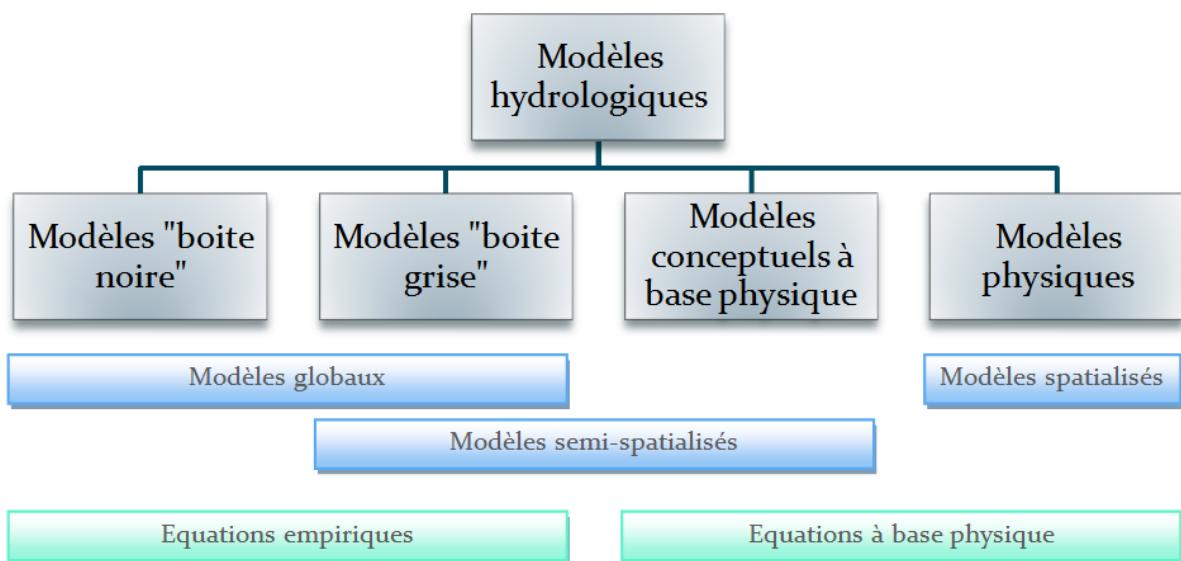


FIGURE 2 : CLASSIFICATION SCHÉMATIQUE DES MODÈLES HYDROLOGIQUES

2. BIBLIOGRAPHIE

2.1. LES DIFFÉRENTS SCHÉMAS DE MODÉLISATION

Avant de commencer l'élaboration d'un modèle deux questions doivent se poser. *Quels sont les phénomènes que je veux représenter ? Quels sont les paramètres dont je dispose pour y parvenir ?* En effet, la première fixe l'objectif et la seconde répertorie les moyens. Sans ces deux informations, la création d'un modèle est vouée à l'échec. Lors du choix du modèle à appliquer face à une situation donnée, les mêmes questions peuvent se poser.

Un modèle n'est qu'une version simplifiée, une représentation orientée d'un phénomène beaucoup plus complexe (Payraudeau, 2002). Les sorties de ce modèle dépendent de ses caractéristiques internes et des sollicitations externes. Ce sont des outils conçus pour un domaine d'application bien précis. Ils ont donc chacun leurs avantages et leurs limites (Ambroise, 1999 ; Hingray *et al.*, 2009). Le modèle sélectionné doit impérativement correspondre aux besoins de l'utilisateur et doit être le plus simple possible pour une précision choisie. Rien ne sert d'être plus complexe si ce n'est pour être plus précis. Il faut ainsi éviter les modèles qui présentent de la redondance. En plus d'apporter une complexité inutile, ils risquent de biaiser les résultats (Gnouma, 2006).

Lorsque le modèle est choisi, il faut absolument s'abstenir de l'utiliser comme un simple « presse bouton ». Il est très important de connaître les hypothèses simplificatrices et le fonctionnement du modèle afin de pouvoir réaliser une interprétation correcte des résultats (Ambroise, 1999).

Tous ces modèles peuvent être classés d'une multitude de façon (Perrin, 2000). Selon leur domaine d'application, selon leur mode de fonctionnement, selon leur dynamique, selon que le phénomène représenté est observable ou non... (de Marsily, 1994 ; Ganoulis, 1996 ; Garfias *et al.*, 1996 ; Gnouma, 2006). Ainsi deux modèles peuvent se retrouver dans un même groupe avec un type de classification, car ils utiliseraient par exemple tous les deux des formules physiquement basées, et dans des groupes totalement différents avec une autre classification, car l'un serait par exemple journalier et l'autre horaire.

Pour la réalisation de ce travail nous avons groupé les modèles hydrologiques en 4 classes (Figure 2) ; les modèles de type « boite noire », les modèles « boite grise »³, les modèles conceptuels à base physique et les modèles physiques (Beckers *et al.*, 2011). Ambroise (1999) propose de distinguer les modèles « boite grise » de type globaux et ceux de type semi-spatialisés. Le principe de fonctionnement étant le même, nous ne ferons pas la distinction entre les deux.

³ Les définitions de « boite noire » et de « boite grise » ne sont pas toujours les mêmes selon la discipline. Les descriptions reprises dans ce travail sont celles communément acceptées en hydrologie.

2.1.1. LES MODÈLES « BOITE NOIRE »

Les modèles de type « boite noire » utilisent des équations empiriques afin d'établir une relation entre les précipitations et les débits. Ce sont des modèles statistiques et globaux⁴ qui traitent des séries de données chronologiques (Ambroise, 1999 ; Garfias *et al.*, 1996). Ils portent le nom de boite noire car on ne se préoccupe pas de ce qu'il se passe à l'intérieur. Ces modèles ne prennent en compte que les données d'entrée et de sortie du bassin versant (Beckers *et al.*, 2011 ; Cunge, 1995 ; Gnouna, 2006). Les caractéristiques physiques de ce bassin versant ne sont pas utiles. Bien que certains paramètres aient un sens physique (ex. vitesse d'infiltration), les valeurs qui leur sont attribuées n'ont aucun lien avec des propriétés mesurables (Ambroise, 1999).

Le principe des modèles « boite noire » peut être résumé de la manière suivante : des valeurs sont choisies pour les différents paramètres dans le but de créer une relation entre les données d'entrée et de sortie. La simulation est comparée à ces données de sortie de manière à retenir les valeurs de paramètres qui donnent le meilleur coefficient de corrélation.

Ce type de modèle présente les avantages suivants : ils sont simples à appliquer (Adebnege, 1989), ils ne nécessitent pas beaucoup de paramètres, ni une connaissance du fonctionnement du bassin versant (Adebnege, 1989) pour obtenir des résultats pouvant être acceptables (Ambroise, 1999). Ils peuvent donc être appliqués sans difficulté aux bassins versants peu instrumentés pour la météorologie. Il est toutefois nécessaire d'avoir à disposition de longues séries de données dont la qualité conditionnera celle du modèle (Degré, 2008).

Il est toutefois important d'être extrêmement critique lorsque ce type de modèle est utilisé pour faire des extrapolations ou des prédictions, lorsque le bassin versant a subi des modifications ou lorsqu'il est transposé à un autre bassin versant (Adebnege, 1989 ; Ambroise, 1999 ; Dassargues, 1990). En effet, ces modèles ne sont pas adaptés à ce genre de situations (Cunge, 1995). Il est préférable de les utiliser uniquement dans la gamme de valeurs pour laquelle ils ont été calibrés et validés. Cette calibration nécessite de longues séries de données qui ne sont pas toujours disponibles (Adebnege, 1989). Les boites noires ont également le défaut de ne pas convenir à l'explication du fonctionnement interne du bassin versant étudié.

La simplicité qu'offrent les modèles globaux peut se révéler défavorable dans le cas de bassins versants de petite taille. En effet, les hétérogénéités sont plus marquées que dans de grands bassins (Ambroise, 1999 ; Graff, 2005).

Il ne faut pas perdre de vue que bon nombre de ces modèles utilise une approche linéaire des phénomènes d'écoulement alors que les réponses hydrologiques d'un bassin versant ont clairement une tendance non linéaire (Ambroise, 1999 ; Perrin, 2000).

Le modèle PDM (Probability Distributed Model) est un exemple de modèle « boite noire ».

⁴ C'est-à-dire que le bassin versant est considéré dans son ensemble.

2.1.2. LES MODÈLES « BOITE GRISE »

Les modèles « boite grise » ont une représentation conceptuelle du système. Ils peuvent être aussi bien globaux que semi-spatialisés. Dans ce dernier cas, le bassin versant est divisé en unités homogènes, appelées unités de réponse hydrologique, HRU (Ambroise, 1999 ; Beckers *et al.*, 2011). Celles-ci sont créées à partir de la carte des sols, d'occupation du sol, *etc.*

Ces modèles sont parfois appelés modèles « réservoir » en raison de leur mode de fonctionnement. En effet, le sol est représenté comme une succession de réservoirs interconnectés qui ne sont autres que des volumes de sol stockant temporairement l'eau. La pluie qui tombe sur le bassin versant, passe par les réservoirs répondant à des lois qui décrivent leurs interactions avec le milieu (végétation, nappe,...) (Ambroise, 1999 ; Perrin, 2000). Les équations qui expliquent le fonctionnement du bassin versant sont semi-empiriques, c'est-à-dire qu'elles sont une simplification des équations physiques. Il en existe deux types : les équations de bilan (conservation de la quantité d'eau) et les lois de vidange du réservoir (Ambroise, 1999 ; Perrin, 2000).

Un ou plusieurs paramètres définissent les caractéristiques de vidange et différentes équations permettent le passage de l'eau d'un réservoir à l'autre avec une dynamique propre (Perrin, 2007). La plupart du temps, chaque réservoir est caractérisé par une variable qui représente son niveau d'eau (Ambroise, 1999). Il est indispensable de connaître les forçages atmosphériques (pluies, ETP, ...) à chaque pas de temps. L'état initial de remplissage des réservoirs est quelques fois nécessaire.

Grâce à ce type de modèle, il est possible de simuler toutes les variables hydrologiques. Néanmoins, lorsque le calage se fait uniquement sur les débits, ce qui est le cas la plupart du temps, ces autres variables sont à utiliser avec précaution (Ambroise, 1999).

Les paramètres utilisés n'ont aucune signification physique et ne peuvent être mesurés, ils demandent donc une calibration. Cette calibration est propre à un bassin versant. Le modèle ne peut dès lors plus être utilisé lorsque le bassin a subi des modifications, ni être transposé à un autre bassin versant (Adebne, 1989 ; Ambroise, 1999 ; Payraudeau, 2002).

Au-delà de leur simplicité, les modèles « boite grise » globaux présentent le désavantage de ne pas prendre en compte l'hétérogénéité du bassin versant puisque les valeurs des paramètres sont des moyennes pour toute la zone simulée. Ce problème est partiellement résolu par les modèles semi-spatialisés. En effet, ceux-ci permettent de représenter l'hétérogénéité macroscopique.

Malheureusement, la segmentation en HRU est relativement intuitive et peu guidée par une analyse des phénomènes dominants. Le nombre d'unités à traiter est plutôt limité par la capacité de calcul (Payraudeau, 2002). En effet, les modèles spatialisés sont plus lourds à exécuter du fait de leur meilleure prise en compte des zones homogènes (Ambroise, 1999).

Les modèles GR (modèles du Génie Rural) sont des exemples de modèles « boite grise »

2.1.3. LES MODÈLES CONCEPTUELS À BASE PHYSIQUE

Les modèles conceptuels à base physique sont semi-spatialisés (excepté lorsqu'ils sont utilisés en une dimension) et donc divisés en HRU. Le bassin versant est à nouveau représenté comme une cascade de réservoirs reliés entre eux. Les caractéristiques de chacun de ces réservoirs sont fonction du type de sol, *etc.* Tous les phénomènes pris en compte par le modèle sont des représentations simplifiées de la réalité (Edijatno *et al.*, 1999). Cependant, cette fois, certains paramètres sont basés sur des propriétés physiques mesurables, comme par exemple la porosité ou la teneur en eau (Beckers *et al.*, 2011). Les formules qu'utilise ce modèle ont une base semi-empirique.

Ce type de modèle demande une quantité de données caractérisant le bassin versant plus importante que les modèles précédents. Bien que ces propriétés soient facilement mesurables en un endroit, la réalisation d'un relevé sur l'ensemble du bassin versant serait laborieuse de par le nombre de points de mesures qui serait nécessaire. De ce fait, les données proviennent le plus souvent de cartes telles que la carte des sols, le modèle numérique de terrain... et sont dérivées à partir de fonctions de pédotransfert.

Il faut toutefois veiller à ce que le modèle soit exempt de toute erreur de structure qui pourrait être compensée, lors de la calibration, par des valeurs aberrantes pour les paramètres non mesurés (Zehe, 2007).

Les modèles conceptuels à base physique combinent les avantages des modèles « boite noire et grise » et ceux des modèles physiques, respectivement : la simplicité, la quantité de données nécessaires et une représentation basée sur des paramètres physiques mesurables.

Les modèles EPIC-grid (Erosion Productivity Impact Calculator) et SWAT (Soil and Water Assessment Tool) sont des exemples de modèles conceptuels à base physique.

2.1.4. LES MODÈLES PHYSIQUES

Il faut savoir que les modèles physiques, proprement dits, n'existent pas. En effet, ils consisteraient en maquettes créées par l'homme avec des profils de sol, une faune et une flore,... comme dans la réalité. Ce qui est techniquement impossible.

Sous l'appellation « modèle physique », nous retrouvons donc des modèles qui se veulent représentatifs de la réalité, qui utilisent une pléiade de variables⁵ (Payraudeau, 2002) et des équations et lois scientifiquement acceptées (Ganoulis, 1996). Comme par exemple l'équation de Richards pour les écoulements en milieu non saturé ou celle de Darcy pour les écoulements en milieu saturé (Ambroise, 1999).

⁵ Tels que la porosité, la granulométrie, les caractéristiques de la végétation,...

Equation de Richards (Musy *et al.*, 1991)

—

Avec $c(h)$, la capacité capillaire,
 h , la hauteur de la colonne d'eau,
 t , le temps,
 $K(h)$, la conductivité hydraulique,
 z , l'altitude.

Equation de Darcy (Musy *et al.*, 1991)

Avec q , le débit,
 K , la conductivité hydraulique,
 H , la hauteur de la colonne d'eau au dessus de la couche filtrante.

Les paramètres ont une signification physique et sont mesurables sur le terrain. Lorsqu'ils sont tous mesurés, cela offre l'avantage de ne pas nécessiter de calibration (Granson *et al.*, 2000).

Les modèles physiques sont de type spatialisé, c'est-à-dire que le domaine étudié est totalement discréteisé. Pour chaque nœud créé, les équations sont résolues par itérations ; en 1, 2 ou 3 dimensions (Garfias, 1996). Pour cela, il est nécessaire de connaître la courbe de rétention d'eau (courbe pF) du sol étudié⁶, les conditions initiales en chaque point et les conditions aux limites. Ces dernières sont situées en surface et en pied de colonne pour une simulation à une dimension. On y ajoute les conditions en bordure du volume modélisé lorsqu'on passe à des dimensions supérieures. Les conditions aux limites concernent les flux et les pressions.⁷

Comme expliqué précédemment, ces modèles sont les seuls capables de prédictions (Beckers, 2011 ; Dassargues, 1990 ; Payraudeau, 2002 ; Refsgaard, 1997 ; Withaker, 2003). Ils demandent une quantité importante de données qui rend leur utilisation relativement lourde⁸ (Ambroise, 1999 ; Payraudeau, 2002). De plus, toutes les données ne sont pas toujours disponibles. Lorsqu'un paramètre est manquant, sa valeur doit être approchée par calibration, par des valeurs trouvées dans la littérature (Beven, 2001) ou de manière subjective (Hundecha, 2001), ce qui rend le modèle peu différent d'un modèle conceptuel à base physique (Ambroise, 1999).

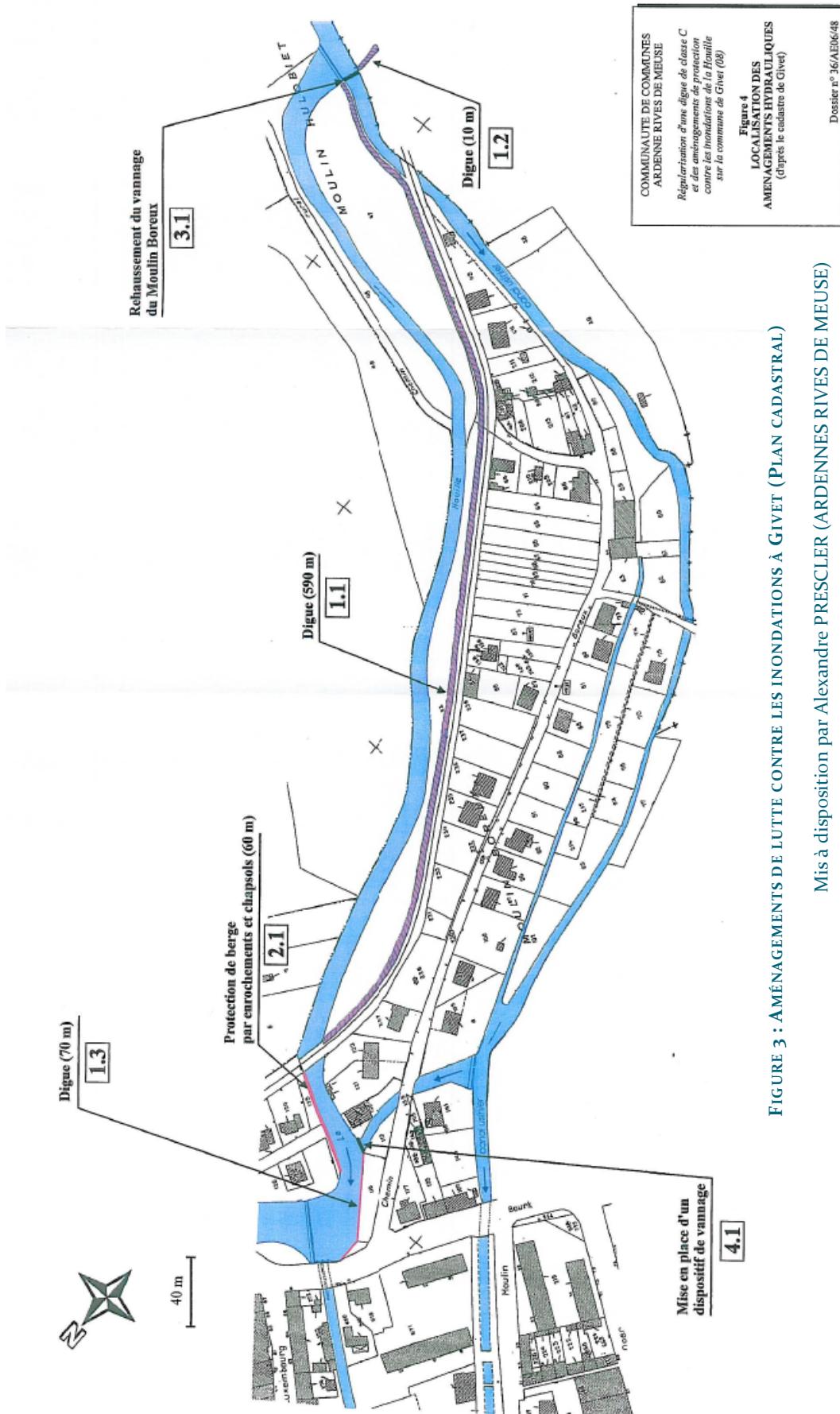
Les modèles Mike SHE (Système Hydrologique Européen) et Hydrus sont des exemples de modèles physiques

⁶ La courbe pF est la relation continue entre la tension $h(\theta)$ et la teneur en eau θ . La plupart du temps, l'hypothèse de non hystérèse est posée. C'est-à-dire que la courbe est identique lors de la dessiccation et lors de l'humidification.

⁷ Degré A., *Cours d'écoulement de l'eau dans le sol*, 2008.

⁸ Bien que cette limitation ne soit plus vraiment un souci à l'heure actuelle au vu des performances des ordinateurs.

BIBLIOGRAPHIE



2.2. LE BASSIN VERSANT DE LA HOUILLE

2.2.1. CONTEXTE DU PROJET INTERREG

Le bassin versant de la Houille est soumis à de fréquentes inondations (Figure 4). Ce problème récurrent touche essentiellement la partie française du bassin. Ainsi lors des crues de l'hiver 2001, en plus de nombreuses habitations inondées, le village de Landrichamps s'est retrouvé isolé et les industries de Givet et de Fromelennes ont dû recourir au chômage technique. En Belgique, seule une vingtaine de maisons ont été concernées.⁹



FIGURE 4 : LA HOUILLE À VENCIMONT EN TEMPS NORMAL (A), EN TEMPS DE CRUE (B) (PHOTO D.DEGLIN)

Peu d'aménagements de lutte contre les inondations existent sur le bassin versant de la Houille. Dans la commune de Gedinne, l'étang (8000 m²) du camping de la Croix-Scaille est maintenu à un niveau bas pour faire office de bassin d'orage¹⁰. La commune de Beauraing n'a aucun aménagement de ce type car la Houille ne traverse pas ses zones urbanisées¹¹.

Suite aux importantes inondations de janvier et février 1995, la ville de Givet a décidé de mettre en place trois digues, un vannage et un empierrement de berge comme présenté à la Figure 3.

Ces aménagements ont été réalisés sans aucune consultation des autres parties concernées. C'est dans ce contexte qu'une proposition de projet (P2IH : Projet Interreg Inondations Houille) a été introduite au titre du programme transfrontalier INTERREG IV « Coopération européenne » France – Wallonie – Vlaanderen. Ceci avec pour objectif une collaboration entre la France et la Wallonie afin de remédier au problème de manière commune.

⁹ Dossier de demande de financement au titre du Programme Transfrontalier INTERREG IV « Coopération Territoriale Européenne » France – Wallonie – Vlaanderen. 2008 (fiche projet P2IH).

¹⁰ D'après Michel ANDRE, du service de l'urbanisme à la commune de Gedinne.

¹¹ D'après Catherine MARCHAL, conseillère en aménagement du territoire de l'urbanisme à la commune de Beauraing

2.2.2. L'HYDROGRAPHIE

Située dans la province de Namur, en bordure ouest de l'Ardenne belge, la Houille est un petit cours d'eau de première catégorie¹² et est de ce fait gérée par la Direction des Cours d'Eau non navigables (DGO3 - SpW). Elle prend sa source sur le plateau de la Croix-Scaille à Houdremont (400 m) et se jette dans la Meuse à Givet (102 m). Son bassin versant s'étend sur 233,5 km² dont 197 km² en Wallonie et 36,5 km² en France. L'affluent principal de la Houille est la Hulle, elle draine environ le quart du bassin versant (Figure 5).

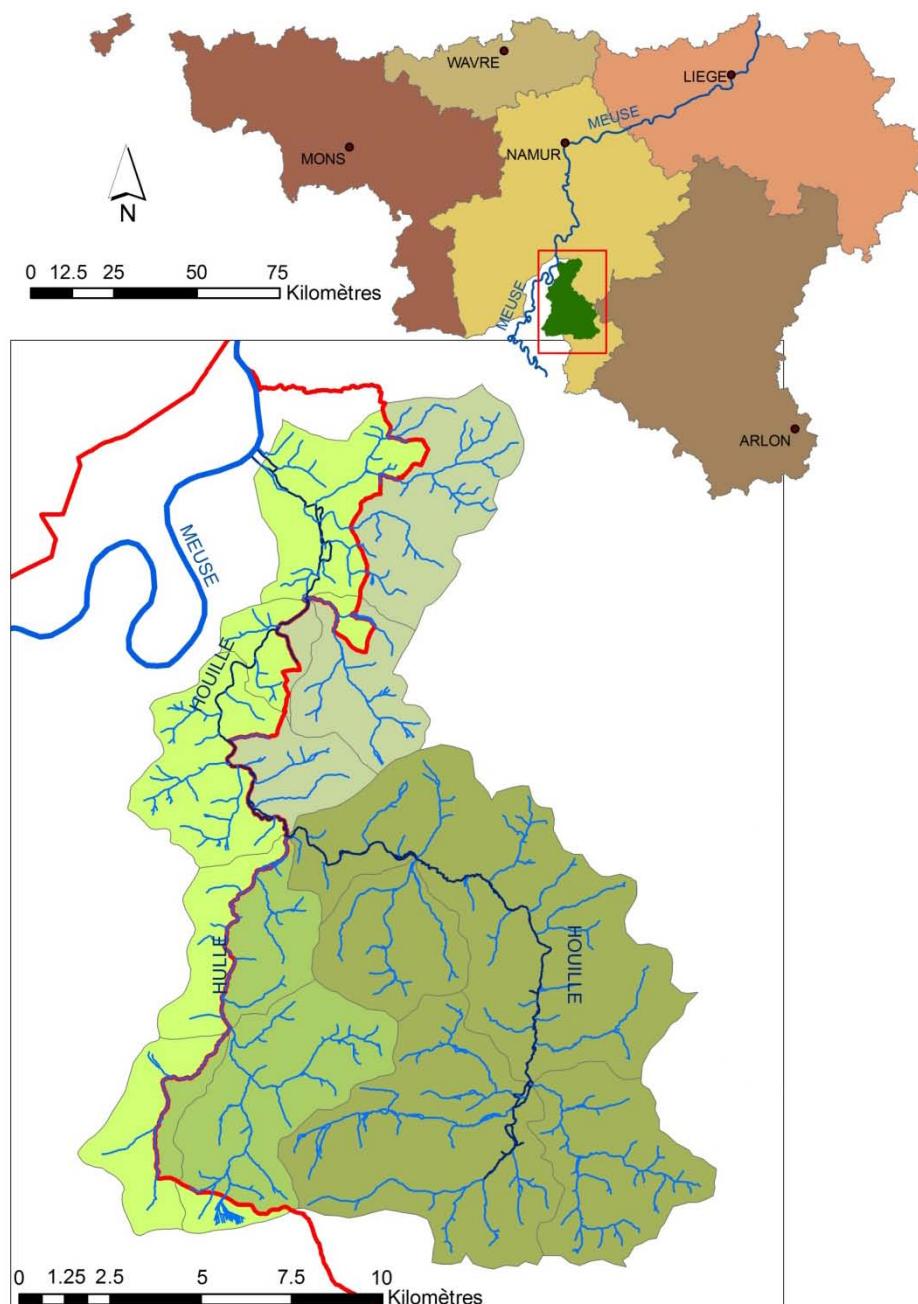


FIGURE 5 : LOCALISATION DU BASSIN VERSANT DE LA HOUILLE (DONNÉES SPW – DGO3 - DCENN)

¹² Sont repris sous l'appellation cours d'eau de catégorie 1, les cours d'eau non navigables ayant les caractéristiques suivantes : un bassin hydrographique de plus de 5000 ha, une largeur comprise entre 5 et 35 mètres et une vitesse d'écoulement se situant entre 0,25 et 1 m/s (hormis en période de crue ou d'étiage) (Aqualim, 2011).

BIBLIOGRAPHIE

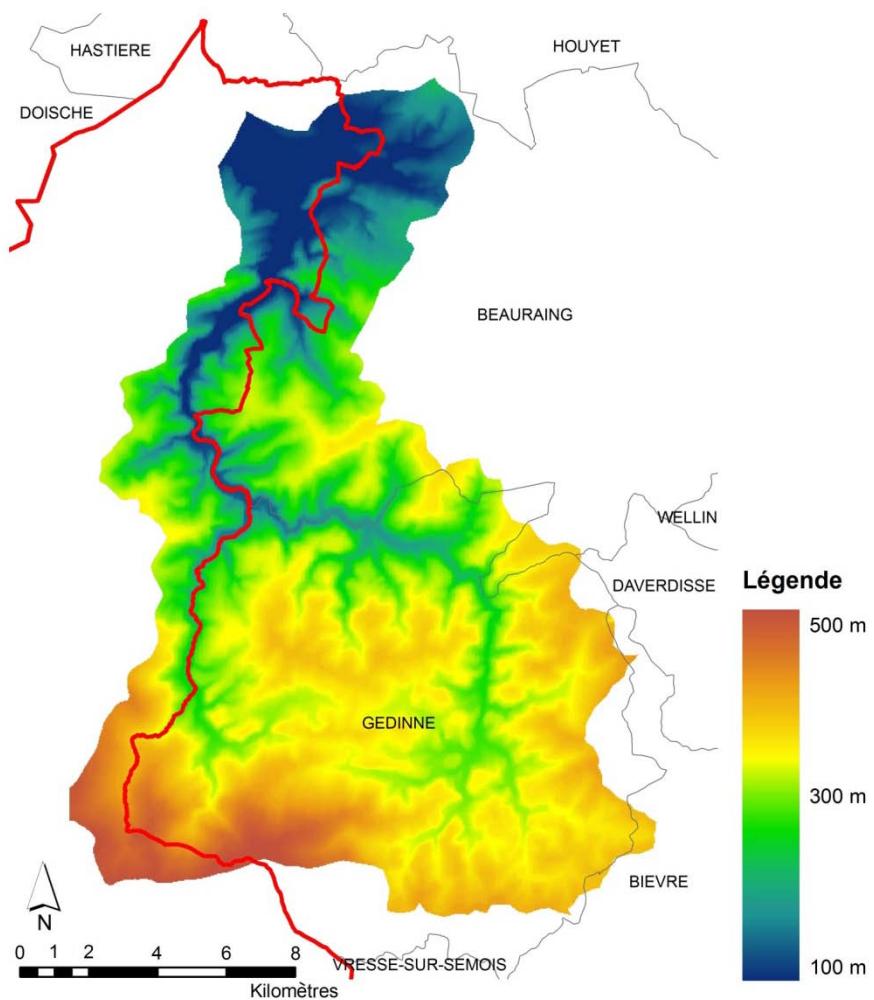


FIGURE 6 : MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN (DONNÉES SPW – DGO3 - DCENN)

2.2.3. LA TOPOGRAPHIE

Le point culminant du bassin versant de la Houille se trouve à une altitude de 500 mètres aux environs de la station météorologique de Willerzie. Le point le plus bas est l'exutoire de la Houille qui se trouve à une altitude de 102 mètres (Figure 6).

La pente moyenne du bassin versant est de 9,9% ce qui correspond à un relief relativement fort accidenté (Figure 7). La partie amont du bassin versant présente quelques petites zones plus planes qui correspondent au plateau de la Croix-Scaille. En aval, essentiellement du côté français, une plaine alluviale peut également être observée.

En 1994, le lit mineur de la Houille a fait l'objet d'un levé topographique à partir de la confluence avec la Houllette à Gedinne jusqu'au pont aval de Vencimont. Cela représente environ 7800 m de linéaire de cours d'eau. Les profils en travers successifs (environ 180 profils), distants en moyenne de 45 m, reprennent aussi bien les éléments naturels que les ouvrages hydrauliques.

Un relevé lidar¹³ a été réalisé en février 2011.

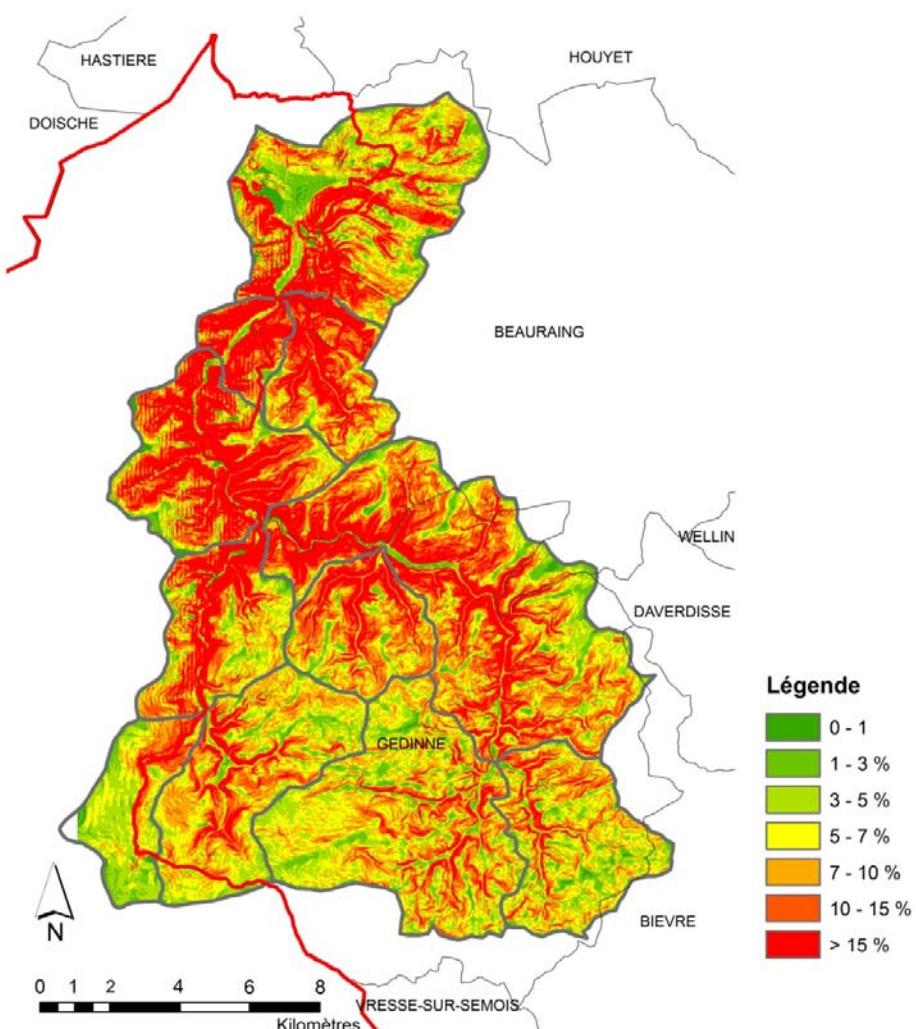


FIGURE 7 : CLASSES DES PENTES (DONNÉES SPW – DGO3 - DCENN)

¹³ Lidar est l'acronyme de "Light Detection And Ranging". Il s'agit d'une méthode de télédétection basée sur la réflexion de la lumière laser.

BIBLIOGRAPHIE

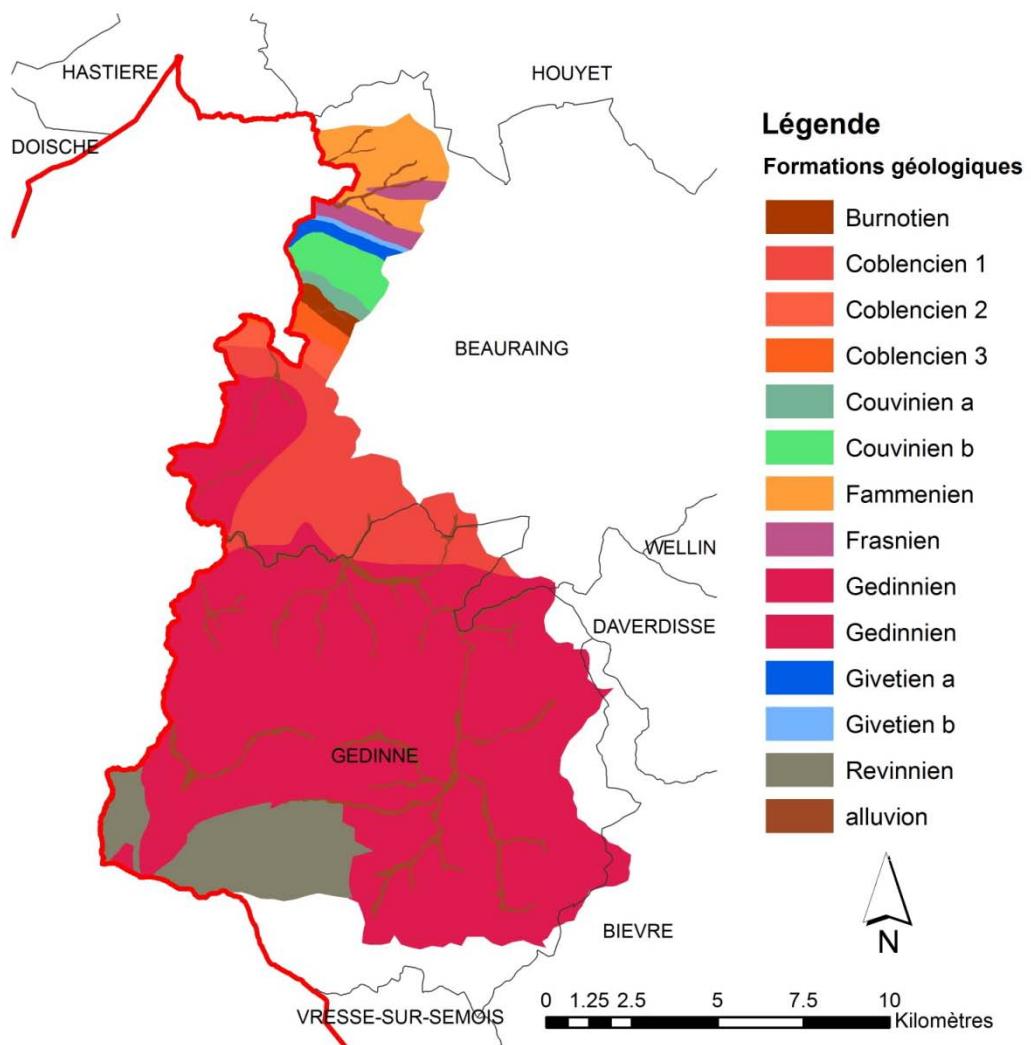


FIGURE 8 : CARTE GÉOLOGIQUE (DONNÉES SPW – DGO3 - DCENN)

2.2.4. LA GÉOLOGIE ET LA PÉDOLOGIE

La carte géologique utilisée est la carte géologique de Belgique digitalisée à l'échelle 1/40.000 (Figure 8). Du fait de l'utilisation de l'ancien système de projection (Bonne) et de l'échelle de la carte, il ne faut pas en attendre une grande précision. Cependant, il est tout de même possible d'affirmer que le bassin versant de la Houille est composé de formations géologiques du quaternaire (environ 10 %) et du primaire (environ 90 %). Toujours d'après cette carte, nous pouvons dire que près de 70 % de la superficie est occupée par la formation géologique du gedinnien (primaire, dévonien), 10 % de coblencien (primaire, dévonien) 5 % de fammenien (primaire, dévonien).

L'altération de ces roches donne naissance à des sols essentiellement limono-caillouteux. Les fonds de vallée sont, quant à eux, tapissés d'un sol limoneux alluvial.

La carte numérique des sols de Wallonie (Figure 9) nous indique qu'à peu près la moitié du bassin versant est couvert par un sol limono-caillouteux à charge schisto-phylladeuse et à drainage naturel presque exclusivement favorable. Le drainage du bassin versant est favorable sur les trois quart de la superficie.

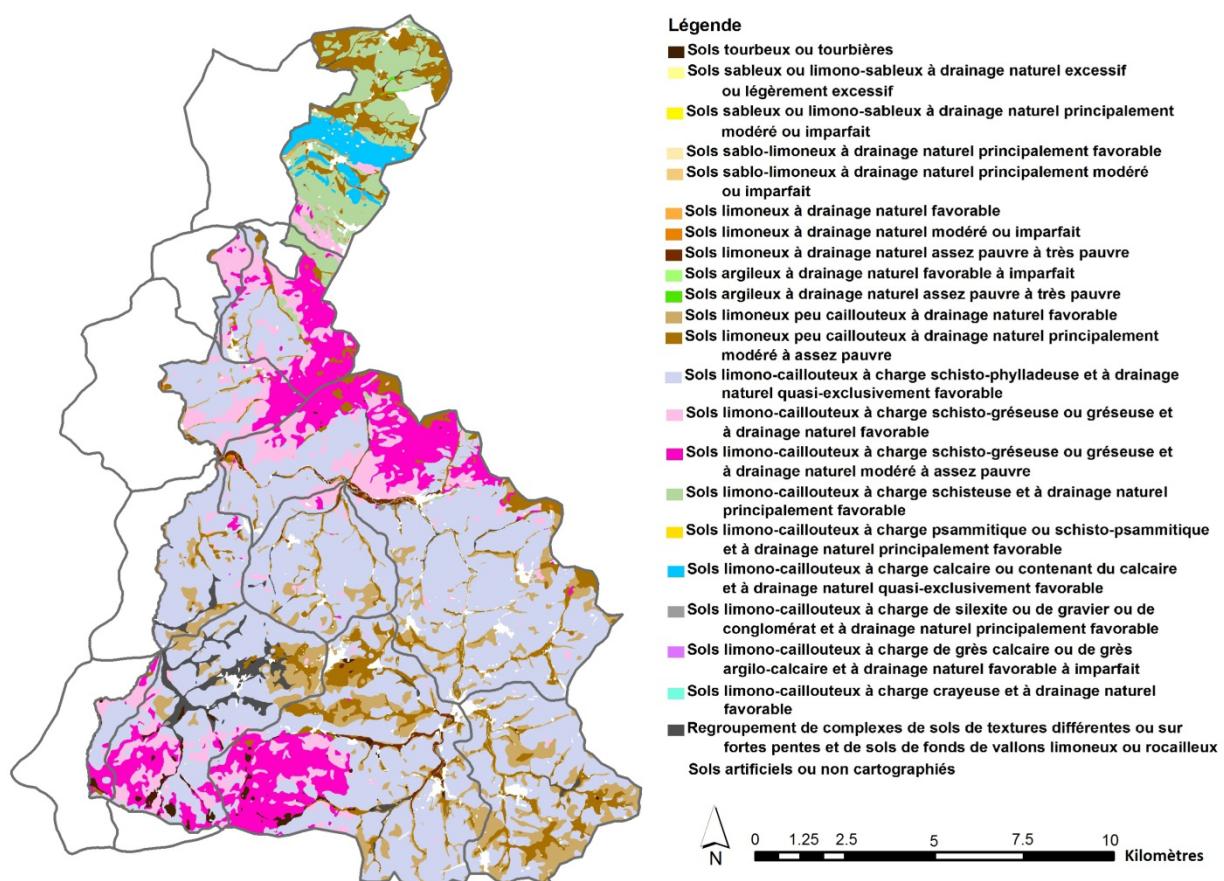


FIGURE 9 : CARTE NUMÉRIQUE DES SOLS DE WALLONIE (DONNÉES SPW – DGO3 - DCENN)

2.2.5. L'OCCUPATION DU SOL

Le bassin versant de la Houille possède une couverture essentiellement forestière. En effet, pour la partie belge, les bois et forêts représentent près de 65% de la superficie. Les quelques sols moins en pente, moins caillouteux et avec un bon drainage sont utilisés à des fins agricoles. Les champs et les prairies occupent un peu moins de 30% du territoire.

D'après le parcellaire forestier, la couverture est principalement composée de hêtres (*Fagus sylvatica L.*) et de chênes (*Quercus petraea (Mattus.) Liebl.* et *Quercus robur L.*) pour les feuillus, et d'épicéas (*Picea abies (L.) KARST*) pour les conifères¹⁴.

Le type d'exploitation des parcelles forestières est variable selon l'essence et selon le propriétaire de la parcelle. Les chênaies et hêtraies sont généralement exploitées par coupes progressives, ce qui permet une régénération et une exploitation simultanée. Le sol est couvert en permanence, ses propriétés restent donc plus ou moins constantes dans le temps. Les pessières peuvent, quant à elles, être exploitées de différentes manières ; soit par coupe à blanc, soit par coupe rase avec réserve de quelques arbres ou encore par coupe en coulisse. Dans ces trois cas, le sol est temporairement nu (partiellement ou totalement), ce qui peut modifier ses caractéristiques physiques.

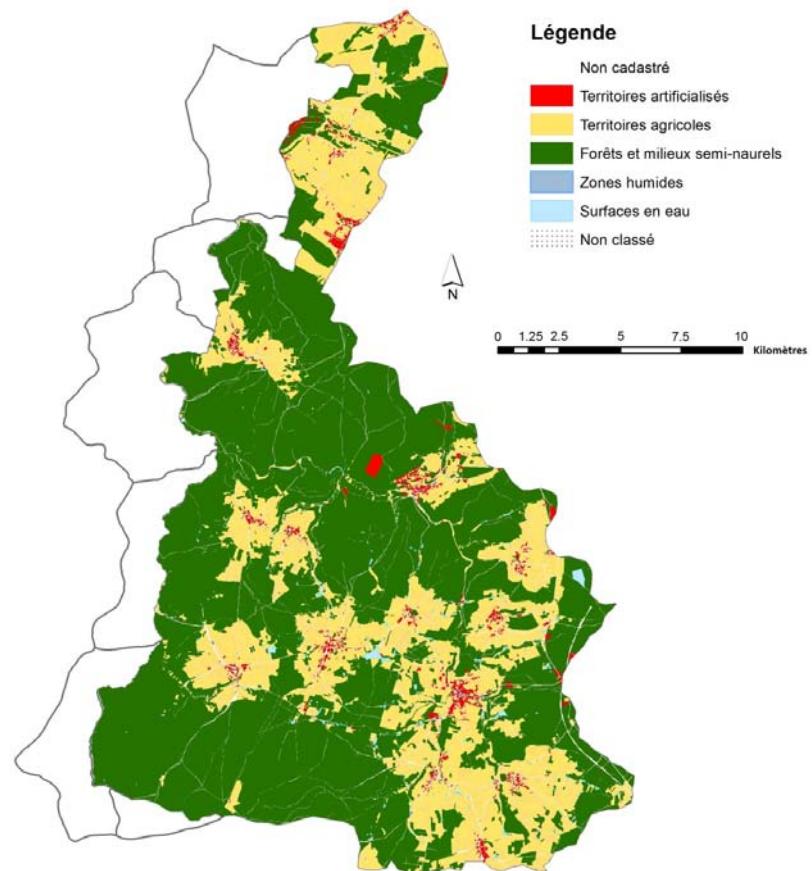


FIGURE 10 : CARTE D'OCCUPATION DU SOL (DONNÉES SPW - DGO3 - DCENN)

¹⁴ Cependant lors de la prospection de sites pour l'installation des capteurs d'humidité, nous avons pu constater que les conifères étaient plus souvent des douglas ou des mélanges douglas/épicéas que des épicéas en monoculture. Il en est de même pour les chênaies qui comportent régulièrement une certaine proportion de hêtres.

2.3. LA MÉTROLOGIE

2.3.1. LA LIMNIMÉTRIE

La limnimétrie regroupe la technologie et la méthodologie des mesures de hauteur d'eau des rivières et fleuves (Thébé *et al.*, 1999). Elle permet, par l'intermédiaire des courbes de tarage, de déterminer le débit du cours d'eau. Ces courbes sont obtenues grâce à des jaugeages qui sont des mesures de hauteur d'eau et de vitesse de l'eau sur toute une section. A partir de ces vitesses, il est possible d'obtenir le débit qui peut ensuite être relié à la hauteur d'eau correspondante. On obtient ainsi une série de points (débit, hauteur d'eau) qui permettent d'établir la relation entre ces deux paramètres. Ce qui permet par la suite de déterminer le débit juste à partir de la hauteur d'eau. Il est important que ces mesures de vitesse d'eau (converties en débit) se fassent de manière régulière. Il arrive, en effet, que la courbe change suite à une modification dans le tracé du cours d'eau, un déplacement de la toise,... Les événements extrêmes sont évidemment très intéressants à mesurer car ils permettent de ne pas avoir recours à l'extrapolation de la courbe de tarage qui se révèle souvent de mauvaise qualité.

Les mesures de hauteur d'eau peuvent être directes ou indirectes. Les méthodes indirectes mesurent une autre grandeur que celle dont on a besoin (ici la hauteur d'eau). La conversion de cette grandeur mesurée en hauteur d'eau se fait par après. Les mesures de débit sont, quant à elles, toutes indirectes.

LES MESURES DE HAUTEURS D'EAU

Les mesures de la hauteur d'eau se font par différents types de limnimètres :

- L'échelle limnimétrique
- Le limnimètre à pression hydrostatique
- Le limnimètre bulle à bulle
- Le limnimètre à ultrasons
- Le limnimètre radar

Il est à noter que la mesure de hauteur d'eau peut également se faire par le biais d'ouvrage d'art tels que des déversoirs ou des canaux jaugeurs, *etc* (Sigonnez, 2006). Mais ceux-ci ne seront pas développés dans ce travail car ils sont très peu utilisés en Belgique.

L'ÉCHELLE LIMNIMÉTRIQUE

L'échelle limnimétrique est une mire émaillée ou non qui indique le niveau de l'eau. L'échelle permet une précision qui va généralement jusqu'au demi-centimètre (Courivaud, 2002 ; Musy, 2004).

Toutes les stations limnimétriques sont équipées d'une échelle limnimétrique. Une fois les coordonnées x, y et z du zéro fixées, elle sert à contrôler régulièrement et facilement que le limnimètre ne subit aucune dérive (Thébé *et al.*, 1999).

BIBLIOGRAPHIE

Il est important de veiller à ce que les coordonnées du zéro de l'échelle ne change pas au cours du temps, ce qui modifierait la courbe de tarage.

LE LIMNIMÈTRE À PRESSION HYDROSTATIQUE

Egalement appelé capteur capacitif en raison de son mode de fonctionnement, le limnimètre à pression hydrostatique mesure la hauteur d'eau à partir de la pression qui règne autour de lui. Il est constitué d'un condensateur dont une plaque est fixe et l'autre mobile. A une distance entre les deux plaques correspond une tension (Musy, 2004). Le capteur possède à son extrémité une membrane de silice, céramique, titane, ou autre... qui est solidaire de la plaque mobile du condensateur.

Une fois immergé, la pression est transmise à la membrane qui modifie la position de la plaque. Il en résulte une modification de la tension mesurée. A partir de cette différence il est possible de calculer la hauteur d'eau à l'aide de l'équation d'étalonnage du capteur.

LE LIMNIMÈTRE BULLE À BULLE

Il s'agit en fait d'un second type de limnimètre à pression mais il est plus communément appelé « bulle à bulle ».

Son fonctionnement est basé sur le principe suivant : la pression d'un gaz qui s'échappe librement d'une conduite vers un liquide est équivalente à la pression hydrostatique exercée par le liquide sur l'embouchure de la conduite (Courivaud, 2002). De l'air (ou de l'azote) sous pression est donc envoyé dans un régulateur d'air afin d'obtenir un débit constant pour ensuite traverser une conduite qui descend dans l'eau. A cette conduite est raccordé un manomètre qui mesure à tout instant la pression qui y règne. La valeur mesurée est équivalente à la pression qui règne à l'extrémité du tube (Musy 2004 ; Thébé *et al.*, 1999).

LE LIMNIMÈTRE À ULTRASONS

Le principal avantage du limnimètre à ultrasons est qu'il n'est pas en contact avec l'eau. Ce qui lui permet d'éviter les dégâts que des débris charriés par le cours d'eau pourraient causer. Néanmoins, le fait de ne pas avoir de contact peut se révéler être un désavantage lorsqu'il y a beaucoup de matière en suspension et lorsqu'il y a du vent. En effet, ce type de capteur est relativement sensible aux conditions atmosphériques (Courivaud, 2002). Une partie du problème est résolu par une correction des mesures en fonction de la température (Thébé *et al.*, 1999).

L'émetteur/récepteur envoie des ondes ultrasonores vers la surface de l'eau qui les réfléchit vers ce même capteur. Celui-ci détermine la distance à la surface libre grâce au temps de parcours des ondes (Sigonnez, 2006).

LE LIMNIMÈTRE RADAR

Le principe de fonctionnement est le même que celui du limnimètre à ultrasons excepté que dans ce cas le signal émis est une micro-onde. Le temps d'aller-retour de l'onde permet de déterminer la distance à laquelle se trouve la surface de l'eau (Courivaud, 2002).

Par rapport au système à ultrasons, le capteur radar offre l'avantage de ne pas être influencé par les conditions météorologiques. Seules la conductivité et la constante diélectrique de l'air influencent le temps de parcours de l'onde. Ceci entraîne une baisse de précision lorsque la surface de l'eau est couverte d'écume ou lorsqu'il s'agit d'un cours d'eau fort agité.

LES MESURES DE DÉBIT

Les mesures ponctuelles de débit peuvent se faire par différentes méthodes. Les principales sont les suivantes :

- Le moulinet hydrométrique
- Le courantomètre électromagnétique
- L'ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)

L'EXPLORATION MANUELLE DU DÉBIT

LE MOULINET HYDROMÉTRIQUE

Le moulinet hydrométrique permet de mesurer la vitesse de l'eau à l'endroit où il est plongé. Il est constitué d'une hélice qui doit être placée à contre courant. Le nombre de tours fait par le moulinet est connu et enregistré grâce à un contact électrique qui se produit après un nombre de tours déterminé. Le temps de mesure doit être connu afin de déterminer la vitesse de rotation de l'hélice. Celle-ci peut être reliée à la vitesse de l'eau à l'aide de la courbe d'étalonnage du moulinet en question.

Lorsque le courant est trop important, le moulinet est monté sur un lest, appelé saumon.

La vitesse de l'eau n'étant pas constante sur toute la section, la mesure faite au moulinet doit être répétée en plusieurs endroits. Cette méthode est appelée jaugeage par exploration du champ de vitesse. La largeur du cours d'eau est divisée par plusieurs verticales, leur espacement dépend de la répartition des vitesses dans la section. Le nombre de verticales doit être tel que le débit entre chacune d'entre elles soit « dans la mesure du possible inférieur à 5 % du [débit] total et ne dépasse en aucun cas 10 % » (Norme ISO 748). Les mesures se font sur ces verticales à plusieurs profondeurs. Le débit est ensuite approché par une double intégration (selon la verticale et selon l'horizontale) qui peut être simplifiée par la formule suivante¹⁵ :

¹⁵ Degré A., *Cours d'hydrologie générale*, 2008.

BIBLIOGRAPHIE

Deux méthodes simplificatrices existent. Elles consistent à limiter le nombre de profondeurs de mesures à une ou deux. La méthode à deux points se contente des profondeurs correspondant à 0,2 et 0,8 fois la hauteur de la verticale. Tandis que la méthode à un point ne prend une mesure qu'à 0,4 fois la profondeur à cet endroit depuis le fond du cours d'eau.¹⁵

LE COURANTOMÈTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Il s'agit d'un capteur qui utilise la loi de Faraday afin de déterminer la vitesse du courant. Son principe est simple, une bobine crée un champ magnétique. L'eau étant un conducteur, lorsqu'elle traverse le champ, elle produit une différence de potentiel (ddp) dont l'amplitude est proportionnelle à sa vitesse. Deux électrodes transmettent cette ddp au boîtier de mesure par l'intermédiaire d'un câble.¹⁶

Le courantomètre est très sensible aux irrégularités du courant, il est donc indispensable de l'utiliser en écoulement laminaire. Les mesures doivent être réalisées en plusieurs points comme pour le moulinet hydrométrique et le même calcul du débit s'applique.

L'ADCP

L'Acoustic Doppler Current Profiler ou ADCP se base sur la vitesse des particules en suspension dans l'eau pour évaluer le débit. Il faut donc faire l'hypothèse que ces particules se déplacent à la même vitesse que l'eau.

Des ondes acoustiques (ultrasons) directionnelles sont envoyées dans l'eau. Les particules étant en mouvement, elles réfléchissent les ondes qui reviennent au récepteur avec une fréquence modifiée. Ce phénomène est appelé effet Doppler. Ce changement de fréquence étant proportionnel à la vitesse des particules, il est possible de calculer cette vitesse (Courivaud, 2002).

Il faut cependant noter que les mesures ne sont pas prises en compte sur le pourtour (fond, berges et surface) de la section car elles sont erronées. Cette zone morte est présente sur une hauteur définie par l'équation suivante :

(Le Coz, 2007)

Avec, d , la hauteur de la zone morte [m],
 P , la hauteur d'eau [m],
 β , l'angle formé par le faisceau avec la verticale [°].

¹⁶ Degré A., *Cours d'hydrologie générale*, 2008.

BIBLIOGRAPHIE

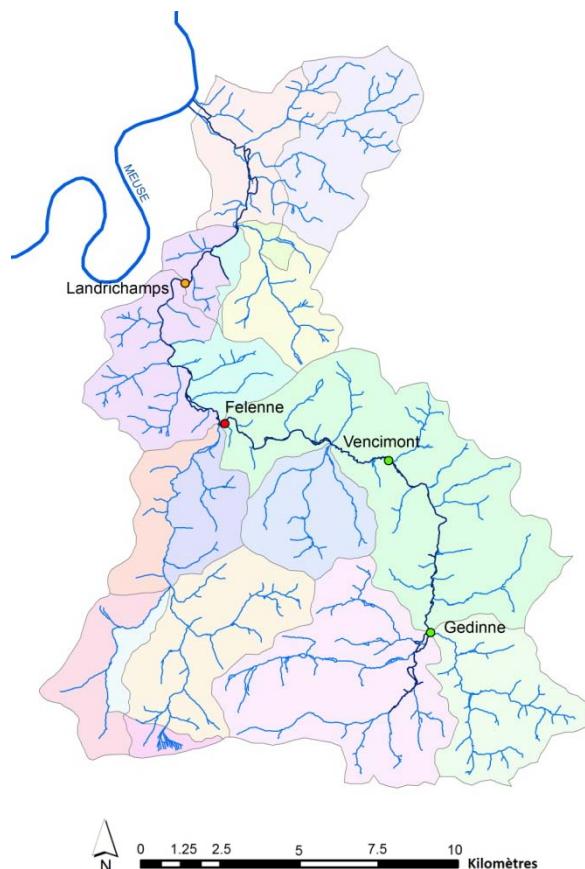


FIGURE 11 : LOCALISATION DES STATIONS LIMNIMÉTRIQUES (DONNÉES SPW – DGO3 - DCENN)

SUR LE BASSIN VERSANT DE LA HOUILLE

Sur le bassin versant de la Houille, les relevés limnimétriques sont réalisés ou ont été réalisés en quatre endroits. Trois des stations se trouvent du côté belge du bassin versant tandis qu'une seule se trouve du côté français.

Deux stations belges situées sur la Houille appartiennent à la DGO3 du SpW :

- à Gedinne, elle reprend 52km² du bassin versant et est active depuis le 26/6/1991 ;
- à Vencimont (82km²), elle a été active du 25/9/1974 au 10/1/1996.

Une station belge appartient à la DGO2 du SpW :

- à Felenne (115km²), elle est active depuis le 1/1/1968.

La station française appartient au SPC Meuse Moselle :

- à Landrichamps (190km²), elle est active depuis le 1/1/1965.

Toutes les données de débit disponibles pour ces quatre stations ont été mises à disposition pour ce travail¹⁷. Elles serviront de données de calibration et de validation pour les modèles comparés.

La cohérence de ces données a été vérifiée comme présenté en annexe 8.1.

¹⁷ Données mises à disposition gratuitement par le Service public de Wallonie, Direction générale opérationnelle de l'Agriculture, des Ressources naturelles et de l'Environnement, Département de la Ruralité et des Cours d'eau, Direction des Cours d'eau non navigables

2.3.2. LA MÉTÉOROLOGIE

Les données météorologiques disponibles pour ce travail sont essentiellement des données pluviométriques, excepté pour une station (Willerzie) pour laquelle nous disposons des données suivantes : la pluviométrie, la température de l'air, la température humide de l'air, la température à la surface du sol, la température dans le sol, la vitesse du vent, la direction du vent, l'humidité relative et le rayonnement.

LA PLUVIOMÉTRIE

La pluviométrie s'exprime en millimètre et est toujours donnée pour une période déterminée. Cette hauteur d'eau vient du volume de précipitations rapporté à la surface sur laquelle il est tombé. La mesure de la pluviométrie peut se faire soit par un pluviomètre soit par un pluviographe.

Le pluviomètre consiste en un récipient gradué qui récolte les eaux de pluies. Le récipient peut être accompagné d'un entonnoir qui évite l'évaporation, d'un cône de nipher qui protège du vent et empêche le rejaillissement ou encore une croix de neige en cas d'averses hivernales.

Il existe deux types de pluviographes.

Le **pluviographe à siphon** récolte l'eau dans un récipient où un flotteur permet l'enregistrement du niveau d'eau. Lorsque le récipient est plein, le siphon permet une vidange rapide.

Le **pluviographe à augets basculants**, lorsque le premier auget est plein, il bascule sous son propre poids ce qui amène le deuxième à se remplir. Chaque mouvement est enregistré (Leroy, 2005 ; Musy, 2004).

LA TEMPÉRATURE DE L'AIR

Le thermomètre est un appareil de mesure indirect de la température. En effet, il se base soit sur la loi de dilatation thermique, soit sur la variation de tension dans les matériaux en fonction de la température. La température se mesure conventionnellement à deux mètres du sol sous un abri ventilé. Il est possible d'appliquer une correction aux mesures si celles-ci se font à une autre hauteur.

Les températures publiées sont généralement les maxima et minima de la journée et sont exprimées en degré Celsius.

LA VITESSE ET LA DIRECTION DU VENT

La vitesse du vent peut être mesurée par un anémomètre et la direction du vent peut être déterminée par une girouette. La hauteur normalisée de mesure du vent est soit de deux mètres, soit de dix mètres. L'unité utilisée pour la vitesse du vent est le mètre par seconde. La direction du vent est la valeur de l'angle entre le Nord et la position de la girouette.

L'HUMIDITÉ DE L'AIR

Deux paramètres sont couramment utilisés pour exprimer l'humidité de l'air ; la tension de vapeur ou pression de vapeur et l'humidité relative. Les unités utilisées pour la tension de vapeur sont le millimètre de mercure et le millibar. Ce dernier est l'unité standard en météorologie. L'humidité relative s'exprime quant à elle en %.¹⁸

L'humidité de l'air peut être déterminée à l'aide d'un **psychromètre**. Il est composé de deux thermomètres ; un thermomètre sec et un thermomètre humide. Le premier est identique à celui décrit plus haut tandis que le second est entouré d'une gaze humide qui permet l'évaporation (Leroy, 2005 ; Musy, 2004).

L'humidité ambiante peut également être mesurée par un **hygromètre**. Il en existe deux types ; l'hygromètre résistif et l'hygromètre capacitif. Tous deux sont composés d'un matériau hygroscopique dont on va mesurer soit la résistance, soit la capacité (Leroy, 2005).

LE RAYONNEMENT

Le **pyranomètre** mesure le rayonnement solaire total. Son mode de fonctionnement se base sur le principe de la thermopile. Une soudure de la pile thermique est sur une surface noire, l'autre sur une surface blanche. Toutes deux sont exposées au soleil. La différence de température entre les soudures produit un courant qui va permettre de calculer le rayonnement (de Parcevaux, 2007 ; Leroy, 2005).

Inventé par J.F. Campbell et amélioré par G.G. Stokes, l'**héliographe** permet de mesurer la durée d'insolation. L'héliographe de Campbell-Stockes est constitué d'une sphère en verre derrière laquelle se trouve une feuille cartonnée. Le mouvement relatif du soleil permet une translation de la concentration du rayonnement sur la feuille qui brunit lorsqu'elle est exposée (Leroy, 2005).

L'ÉVAPOTRANSPIRATION¹⁷

L'évapotranspiration regroupe l'évaporation, c'est-à-dire tous les phénomènes de vaporisation ne passant pas par le système vasculaire des végétaux, et la transpiration, qui concerne l'eau passant par les végétaux (Musy, 2004).

Lorsque l'on parle d'évapotranspiration, il faut savoir qu'elle peut être de quatre types :¹⁹

L'évapotranspiration potentielle (ETP) ou demande évaporatoire climatique. C'est la quantité d'eau maximale qui pourrait être vaporisée dans les conditions climatiques du moment.

¹⁸ Degré A., *Cours d'hydrologie générale*, 2008.

¹⁹ Xanthoulis D., *Cours d'irrigation*, 2010.

BIBLIOGRAPHIE

L'évapotranspiration de référence (ETo) représente la quantité d'eau perdue par une parcelle de ray grass (végétation de référence) normalisée, c'est-à-dire en phase active de croissance, de taille constante, qui couvre complètement le sol et dont l'approvisionnement en eau est optimal. Lorsque ces conditions sont effectivement remplies, l'évapotranspiration de référence est égale à l'évapotranspiration potentielle ;

L'évapotranspiration maximum (ETM) peut être définie comme les pertes en eau d'un sol et de sa végétation. Les plantes sont alimentées en eau de manière optimale. L'ETM augmente avec la couverture du sol par la végétation ;

L'évapotranspiration réelle (ETR) est la perte d'eau d'une végétation non normalisée. Les végétaux peuvent donc être à n'importe quel stade de développement et leur alimentation en eau variable.

Les relations entre ces évapotranspirations sont les suivantes :

Avec, K_s , le coefficient de stress hydrique,

K_c , le coefficient cultural.

Le coefficient de stress hydrique est fonction de la réserve en eau du sol, le coefficient cultural dépend, quant à lui, du type de végétation et de son stade de développement.

Pour calculer la quantité d'eau évapotranspirée par une surface pendant une période donnée, plusieurs équations existent. La formule de Penman-Monteith est une des plus connues et utilisées :

(Summer, 2005)

Avec, ETP, l'évapotranspiration potentielle [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, mm/s],

Δ , la pente de la courbe de pression de vapeur [$\text{kPa}/^{\circ}\text{C}^2$],

R_n , le rayonnement net [$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$],

G , le flux de chaleur à la surface du sol [$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$],

γ , la constante psychrométrique [$\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$],

T , la température moyenne journalière de l'air [$^{\circ}\text{C}$],

u_2 , la vitesse du vent moyenne journalière [m/s],

e_s , la pression de vapeur d'eau saturante à la température de l'air [kPa],

e , la pression de vapeur d'eau effective dans l'air [kPa].

La pente de la courbe de pression de vapeur peut se calculer par la formule suivante (Musy, 2004):

La pression de vapeur saturante est exprimée en fonction de la température (Musy, 2004).

BIBLIOGRAPHIE

Le flux de chaleur à la surface du sol peut être estimé par l'équation suivante (French, 1999) :

La vitesse moyenne du vent est fonction de la résistance aérodynamique, r_a , et le flux de de la résistance de canopée, r_c .

SUR LE BASSIN VERSANT DE LA HOUILLE

Les données de cinq stations du bassin versant sont mises à disposition, ainsi que trois stations à proximité.

Quatre stations sont situées sur la partie belge du bassin versant de la Houille :

- à Willerzie sur une période qui va du 18 mars 1998 au 11 mai 2011. Cette station appartient au réseau PAMESEB ;
- à Gedinne Station du 1^{er} janvier 1959 au 30 avril 2011. Cette station appartient au SETHY²⁰ ;
- à Vencimont à partir du 1^{er} octobre 1972 jusqu'au 31 décembre 1995. Cette station appartient à l'IRM ;
- à Feschaux du 3 juin 1982 au 31 mars 2006. Cette station appartient au SETHY²⁰.

Deux stations météorologiques belges se trouvent en dehors du bassin versant :

- à Bièvre, les données disponibles vont du 1^{er} janvier 1951 au 30 juin 2007. Cette station appartient à l'IRM ;
- à Beauraing du 1^{er} janvier 1959 au 30 avril 2011. Cette station appartient au SETHY²⁰.

En France deux stations sont intéressantes pour ce travail :

- à Landrichamps dont les données fournies parcourent les périodes du 21 juin 2004 au 11 novembre 2007 et du 1^{er} juin 2009 au 1^{er} mai 2011. Cette station appartient au SPC-Meuse Moselle ;
- à Chooz (en dehors du bassin versant) du 29 mai 1998 au 11 octobre 2010. Cette station appartient au SETHY²⁰.

²⁰ Données mises à disposition gratuitement par le Service public de Wallonie, Direction générale opérationnelle Mobilité et Voies hydrauliques, Direction de la Gestion hydrologique intégrée, Service d'Etudes Hydrologiques (SETHY)

2.3.3. LES MESURES D'HUMIDITÉ

L'humidité d'un sol peut s'exprimer de deux façons :²¹

La **teneur en eau pondérale** se définit comme étant le rapport de la masse d'eau contenue dans un volume de sol sur la masse de ce même volume de sol²². Elle sert de calibration pour les appareils utilisés.

La **teneur en eau volumétrique** est le rapport du volume d'eau contenu dans un échantillon de sol sur le volume apparent de cet échantillon de sol.

La mesure de l'humidité du sol peut se faire par différentes méthodes exposées ci-dessous.

MÉTHODE GRAVIMÉTRIQUE

Pour déterminer la teneur en eau du sol, un échantillon de sol est prélevé en prenant soin de conserver sa structure. L'échantillon doit être de volume précis et connu. Il est ensuite pesé et mis à sécher en étuve. Le poids est régulièrement mesuré. Lorsque celui-ci reste constant, l'échantillon peut être considéré comme sec. Les poids humide et sec étant connus, il est possible de calculer la teneur en eau du sol.²¹

CAPTEURS CAPACITIFS

Le sol est constitué de terre, d'eau et d'air, trois éléments dont la permittivité est fortement différente. La permittivité de l'air est très faible, ce qui permet de la négliger. Reste la terre et l'eau dont la permittivité varie avec un rapport supérieur à dix. La permittivité de l'eau étant beaucoup plus importante que celle de la terre, la teneur en eau influence fortement la permittivité du sol (Decagon device inc., 2008).

La permittivité est définie de la manière suivante :

—
(Maglione, 2010)

Avec, C, la capacité du condensateur formé par la sonde,

S, la surface du condensateur,

d, la distance entre les deux électrodes.

Chaque sonde ayant une surface et une distance entre les électrodes constantes, la mesure de la capacité du sol permet de déterminer sa permittivité. Cette capacité va être déterminée par l'intermédiaire du temps de charge du champ électrique créé par de rapides mises en charge et en décharge du capteur (Decagon device inc., 2008).

—
(Decagon, 2008)

²¹ Degré A., *Cours d'hydrologie générale*, 2008.

²² Il faut noter que certains spécialistes rapportent le poids de l'eau de l'échantillon au poids de l'échantillon frais.

BIBLIOGRAPHIE

Avec, t , le temps de charge,
 R , la série de résistances,
 V , la tension mesurée au temps t ,
 V_f , la tension aux bornes de l'alimentation,
 V_i , la tension initiale lors de la mise en charge.

TDR

Le principe de la sonde TDR (Time Domain Reflectometry) est également basé sur le contraste entre la permittivité de l'eau et celle de la terre. La différence est que la sonde TDR ne mesure pas une capacité mais une tension. Ceci afin de déterminer la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le sol. En effet, la constante diélectrique, dépendante de la teneur en eau, influence cette vitesse.

La constante diélectrique est également appelée permittivité relative (ϵ_r) en raison de son origine. En effet, elle se définit comme étant le rapport de la permittivité du matériau en question (ϵ) et de celle du vide (ϵ_0) (Musy, 2004).

—

Voici les constantes diélectriques de quelques matériaux :

TABLEAU 1 : CONSTANTES DIÉLECTRIQUES DE DIFFÉRENTS MATERIAUX

Matériaux	Constantes diélectriques
Vide	1
Air	1,00054
Eau (25°C)	78,54
Sol sec	Entre 3 et 5

Pratiquement, la sonde TDR est composée d'un émetteur d'ondes électromagnétiques, d'un câble coaxial d'impédance connue, de deux ou trois tiges parallèles en acier inoxydable et d'un système de réception et de mesure des ondes. L'émetteur/récepteur n'est autre qu'un oscilloscope (Pereira dos Santos, 1997).

Pour déterminer la vitesse de l'onde, il est nécessaire de connaître la distance parcourue par cette onde, de fixer le temps t_o auquel l'onde est envoyée et de déterminer le temps t_i auquel l'onde fini son trajet. La distance parcourue est connue pour un capteur donné, il s'agit de deux fois la longueur de la sonde car l'onde fait un aller-retour le long de sa tige. Le temps t_o est déterminé grâce à la mise en place d'un pont de diodes qui provoque une brusque chute du signal mesuré. Ce signal va ensuite remonter à cause de la variation d'impédance due à la sortie du câble coaxial. La fin de la tige réfléchit ce qu'il reste du signal. Lorsque celui-ci est de retour au câble coaxial, la tension redevient identique à celle du début. Ceci fixe le temps t_i de fin de parcours (De Ridder, 1985).

BIBLIOGRAPHIE

La constante diélectrique du sol peut maintenant être calculée :

(De Ridder, 1985)

Avec, ϵ_r , la constante diélectrique du sol,
c, la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le vide,
t, le temps de parcours aller-retour du signal le long de la sonde,
L, la distance parcourue (elle vaut deux fois la longueur de la sonde).

Lorsque la permittivité relative du sol est connue, la teneur en eau peut être déterminée par une équation polynomiale. Par exemple, celle donnée par Topp (1980) :

MATÉRIEL ET MÉTHODE

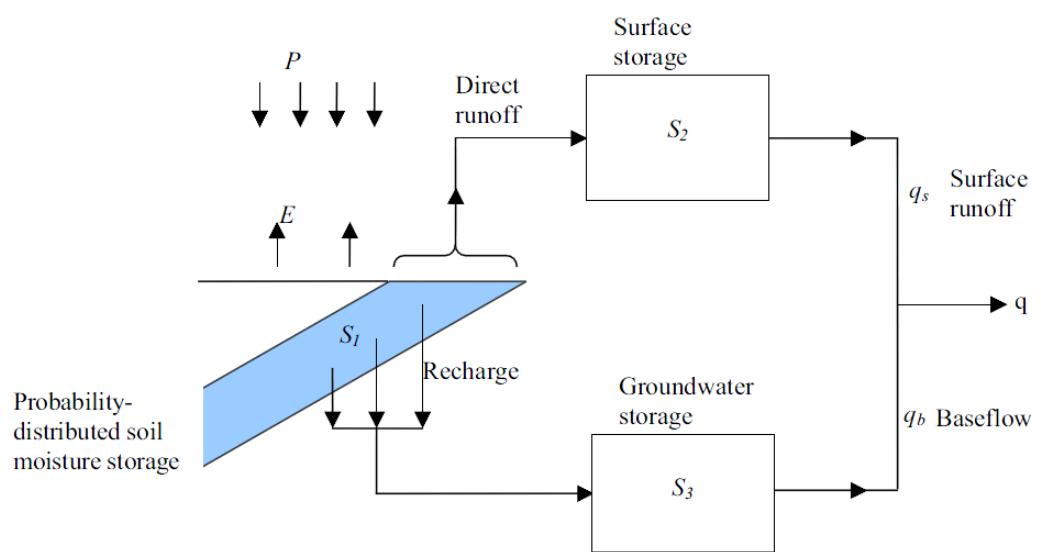


FIGURE 12 : REPRÉSENTATION DU MODÈLE PDM (MOORE, 2007)

3. MATÉRIEL ET MÉTHODE

3.1. LES MODÈLES UTILISÉS

Trois modèles ont été choisis pour la réalisation de ce mémoire ; le modèle « boite noire » PDM, le modèle « boite grise » GR4J et le modèle conceptuel à base physique EPIC. Ce choix a été motivé par le fait qu'ils sont tous trois des modèles de référence dans les régions concernées par les projets INTERREG. A savoir, la Flandre, la France et la Wallonie. Ils offrent également l'avantage de représenter des types de modèles différents. De plus, GR4J et EPIC sont disponibles sous licence libre et le SpW dispose d'une licence pour Infoworks-PDM.

3.1.1. PDM

Bien que certains le décrivent comme un modèle conceptuel (Cabus, 2008 ; Moore, 2007), selon le système de classification expliqué précédemment, PDM est un modèle de type « boite noire ». En effet, certains des paramètres utilisés dans le modèle peuvent être influencés par les caractéristiques physiques du bassin versant, ce qui peut induire en erreur. Mais la valeur finale de ces paramètres étant déterminée par ajustement statistique, le doute disparaît, nous avons bien affaire à un modèle « boite noire ». De plus, le bassin versant est représenté par des « réservoirs » (Moore, 2007). Cependant, ceux-ci permettent seulement d'appliquer des cheminements différents aux deux flux (de surface et souterrain) de manière parallèle. Nous n'avons dès lors pas de succession de réservoirs interconnectés.

Ce modèle est relativement simple et demande très peu de données. Il peut tourner avec seulement, une série pluviométrique et une série de débit. Si des données de température sont disponibles, elles peuvent être introduites dans le modèle comme complément. Il est important d'avoir des séries de données de qualité, les plus longues possible et sans interruption (Degré, 2008).

FONCTIONNEMENT DU MODÈLE

Comme expliqué plus haut, le modèle décrit le bassin versant par deux réservoirs en parallèle, un pour le « stockage » de surface et le second pour le souterrain, chacun ayant sa propre dynamique. Ces réservoirs sont remplis par les précipitations et vidés par le phénomène d'évaporation et par vidange. Le débit de base et le débit de ruissellement sont ensuite sommés pour constituer le débit à l'exutoire.

PDM laisse à l'utilisateur le choix des paramètres qui seront utilisés pour la simulation, leur valeur initiale ainsi que leur domaine de validité.

Voici les paramètres disponibles et leur action sur la simulation²³ :

- *Rainfac* : c'est un facteur multiplicatif des précipitations. Ce paramètre est nécessaire lorsque la répartition des pluies selon Thyssen n'est pas utilisée. Sinon il restera de préférence fixé à 1.

²³ Document « Hydrologie en hydraulica van het stroomgebied », SpW – DCENN.

- Be : une augmentation de la valeur de ce paramètre diminue les débits de pointes en été.
- $Cmin$: ce paramètre permet une surestimation des faibles débits.
- $Cmax$: détermine la capacité de stockage maximale du sol.
- b : une valeur élevée de ce paramètre augmente la rapidité du ruissellement.
- St : il permet d'augmenter l'humidité du sol lors de précipitations.
- Bg : ce paramètre caractérise l'infiltration de l'eau dans le sol. Il a une grande influence sur les autres paramètres c'est pourquoi il est généralement préférable de le fixer à 1.
- kg : c'est une constante de temps qui exprime la vitesse d'infiltration. Les valeurs sont plus faibles lorsque la vitesse d'infiltration est élevée.
- kb : c'est une constante de temps qui détermine la vitesse de réaction du débit de base. Les valeurs plus faibles induisent une réponse plus rapide.
- $k1$ et $k2$: ce sont deux constantes de temps qui expliquent la vitesse de réaction des écoulements rapides.
- $Tdely$: ce paramètre permet d'avancer la série de débit dans le temps.
- $Qconst$: il ajoute ou soustrait un débit constant au débit simulé. Cela permet d'éviter l'assèchement d'un cours d'eau en été.

La calibration peut se faire sur une année complète ou bien sur certains évènements particuliers.

Il est également possible de choisir le critère de régression à appliquer. L'optimisation automatique des paramètres peut se faire de six manières distinctes :

- La moyenne des carrés des différences
- La moyenne des carrés des différences en logarithme népérien
- La moyenne des carrés des différences en logarithme base 10
- La somme des carrés des différences
- La somme des carrés des différences en logarithme népérien
- La somme des carrés des différences en logarithme base 10

Ces diverses méthodes ne donnent pas de résultats fondamentalement différents. Les logarithmes permettent de donner un peu plus de poids aux faibles débits. La somme n'apporte quant à elle aucune information supplémentaire par rapport à la moyenne, juste une représentation différente de l'erreur persistante.

DONNÉES NÉCESSAIRES AU MODÈLE

Du fait du type de modèle (boite noire), très peu de données sont nécessaires pour simuler le comportement du bassin versant.

LES DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES

PDM demande des données pluviométriques horaires ou à un pas de temps inférieur. Il est également possible de travailler avec des données journalières.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Les données horaires disponibles couvrant la plus grande période sont celles des stations de Beauraing, Gedinne et Willerzie et vont du 1^{er} janvier 2006 au 30 avril 2011. Suite à cette contrainte, il a été décidé de réaliser la calibration du modèle sur la période s'écoulant du 1^{er} janvier 2006 au 30 septembre 2009, ce qui permet d'avoir 3 années hydrologiques complètes. Les neuf premiers mois serviront pour la mise à l'équilibre des conditions initiales. La validation se fera sur les 20 mois restants (avec une année hydrologique complète).

La simulation sera réalisée avec les données journalières afin de permettre une comparaison avec le modèle GR4J. De plus, pour estimer la différence de qualité entre la modélisation horaire et la modélisation journalière, une simulation au pas de temps horaire sera également effectuée.

Lors de l'utilisation du modèle ces données seront spatialisées selon la méthode des polygones de Thiessen.

LES DONNÉES LIMNIMÉTRIQUES

Le modèle PDM permet de choisir le format des données limnimétriques qui seront utilisées, à savoir ; des débits (m^3/s) ou des hauteurs d'eau (m). S'il est décidé de travailler avec les hauteurs d'eau, il sera nécessaire de donner les paramètres de la courbe de tarage.

Le principe est le même que pour la pluviométrie ; les données horaires (ou inférieures) sont indispensables et les données journalières peuvent venir en supplément.

Seule la station de Felenne dispose de données limnimétriques horaires complètes pour la période du 1^{er} janvier 2006 au 30 avril 2011.

LA SUPERFICIE DU BASSIN VERSANT

La superficie du bassin versant doit être introduite en km^2 . Cette information est indispensable pour la conversion des données pluviométriques qui sont surfaciques en données limnimétriques qui elles reprennent l'ensemble du bassin versant.

LA TEMPÉRATURE

Les données de température ne sont pas obligatoires mais elles peuvent apporter une meilleure adéquation entre modèle et réalité, bien que leur utilité pour le modèle ne soit pas claire.

L'ÉVAPOTRANSPIRATION

Les données d'évapotranspiration ne sont pas indispensables au modèle mais il arrive qu'elles apportent une information supplémentaire intéressante.

Ces deux derniers types de données n'ont pas été utilisés car ils rendaient l'étape de validation impossible (ceci est probablement dû à une erreur de codage de PDM).

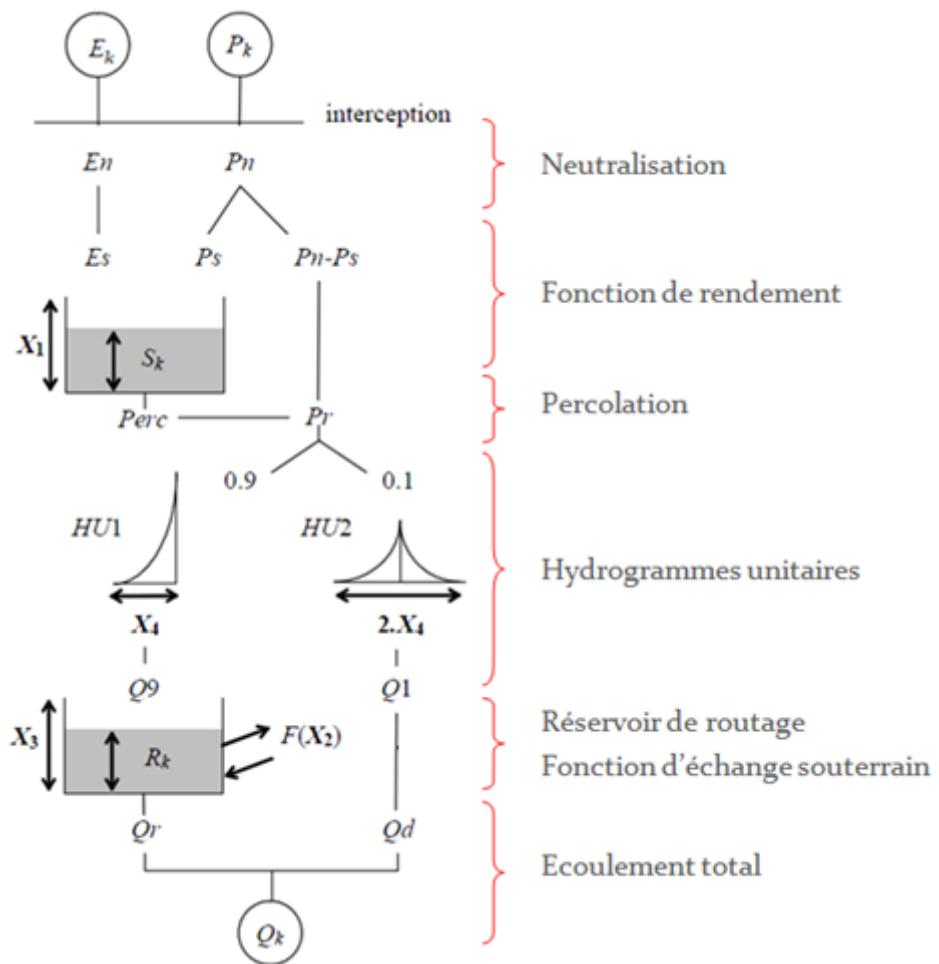


FIGURE 13 : STRUCTURE DE GR4J

3.1.2. GR4J

Développé par le CEMAGREF au début des années 1980, le modèle GR4J est le premier modèle du Génie Rural français. Son nom provient d'une contraction de : modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier. Il a été suivi des modèles GR2M, GR1A et GR3H (Perrin, 2007).

Le but lors de la création de ce modèle était de parvenir à un modèle robuste et fiable qui pourrait être utilisé dans le cadre de travaux d'ingénierie et de gestion des ressources en eau. Le GR4J tourne sous le programme libre SCILAB²⁴ ou encore sous Excel. Les deux versions peuvent être téléchargées sur le site : http://www.cemagref.fr/webgr/Codes/code_gr4j.htm.

Les deux étant identiques, le programme Excel a été choisi. Ce modèle a connu plusieurs évolutions (et donc plusieurs versions). Nous ne présenterons que la version 1.0, décrite par Perrin *et al.* (2003), qui sera celle utilisée dans le travail.

Bien que ce modèle présente des réservoirs, il reste un modèle empirique puisqu'il a été développé à partir de longues séries de données. Il peut être considéré comme boite grise car il est possible de l'utiliser de manière spatialisée en divisant le bassin versant en sous-unités (Perrin, 2007).

Le fonctionnement global du modèle est décrit ci-dessous. Sous Excel, l'optimisation des 4 paramètres peut se faire grâce à la fonction solveur, avec le coefficient de Nash comme cellule cible. C'est-à-dire que le solveur va tenter d'approcher au plus la valeur de Nash de 100% en modifiant les valeurs des paramètres.

Ce modèle peut être appliqué de manière globale ou bien sur différentes HRU et donc de manière semi-spatialisée.

FONCTIONNEMENT DU MODÈLE

Les deux données d'entrée du modèle sont : E_k , l'évapotranspiration potentielle moyenne du jour k et P_k , la pluie journalière du jour k . La Figure 13 résume le fonctionnement du modèle, chaque étape sera détaillée par la suite.

NEUTRALISATION

La phase de neutralisation consiste à calculer la pluie nette P_n et l'évapotranspiration nette E_n par les formules suivantes :

FONCTION DE RENDEMENT

Cette étape permet de suivre l'évolution au cours du temps du stock d'eau dans le réservoir de production, c'est-à-dire l'eau présente dans le sol.

²⁴ Le programme Scilab est l'équivalent de Matlab. Il peut être téléchargé gratuitement sur le site officiel : <http://www.scilab.org/>

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Lorsque P_n est supérieur à zéro, une quantité P_s (pluie stockée) va gonfler le volume d'eau présent dans le réservoir de production. Ce qu'il reste de la précipitation est directement dirigé vers l'étape suivante.



Le terme S_k représente la quantité d'humidité présente dans le sol au début du jour k . Le paramètre X_1 indique la capacité maximale du réservoir exprimée en millimètre.

Lorsque P_n vaut zéro, la quantité d'eau du réservoir de production va diminuer par évapotranspiration d'une quantité E_s calculée par la formule suivante :



A la fin du jour k , le réservoir contient une quantité d'eau S' qui vaut :

PERCOLATION

La quantité d'eau, $Perc$, qui sort du réservoir pour entrer dans l'étape des hydrogrammes unitaires est appelée eau de percolation. Elle peut être calculée comme suit :



Le réservoir contient donc maintenant, une quantité d'eau S_{k+1} qui vaut :

L'eau de percolation et la partie de la précipitation qui n'est pas passée par le réservoir de production forment la précipitation de « routage » P_r .

HYDROGRAMMES UNITAIRES

Le modèle GR4J divise P_r en deux parties. La première reprend 90 % de l'écoulement et sera transformée par l'hydrogramme unitaire HU_1 , tandis que les 10 % restants passeront par l'hydrogramme unitaire systématique HU_2 . Ces deux hydrogrammes sont caractérisés par un temps de base X_4 , exprimé en jours.

La courbe des fonctions cumulées de l'hydrogramme unitaire, SH_1 , est fonction du temps et peut être représentée par les équations suivantes :

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Tout comme pour SH_1 , SH_2 est fonction du temps et représente la courbe des fonctions cumulées de l'hydrogramme unitaire HU_2 .

Les sorties Q_0 et Q_1 représentent la convolution des hydrogrammes des précipitations antécédentes et actuelles.

Avec :

j , un entier

Avec UH_1 et UH_2 qui valent respectivement :

FONCTION D'ÉCHANGE SOUTERRAIN

L'équation qui suit caractérise les échanges F avec l'extérieur, hors atmosphère. Les paramètres X_2 et X_3 représentent respectivement le coefficient d'échange (mm) et la capacité à un jour du réservoir (mm). X_2 est le seul paramètre du modèle qui peut aussi bien prendre une valeur positive (dans le cas d'un apport d'eau) que négative (dans le cas d'une perte d'eau).

R_k représente le niveau dans le réservoir au début du pas de temps considéré.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

RÉSERVOIR DE ROUTAGE

La première formule utilisée dans cette étape permet de prendre en compte les apports d'eau au réservoir de routage. Son résultat ne peut donc pas être négatif. Si la somme des trois termes, R_k , Q_9 et F , est inférieure à zéro, cette valeur n'est pas prise en compte et est remplacée par zéro.

Une seule des deux sorties des hydrogrammes (Q_9) entre dans le réservoir de routage, Q_1 n'intervient que dans l'étape finale.

La vidange Q_r de ce réservoir est caractérisée par la formule qui suit :

$$-$$

$$-$$

A la fin du pas de temps, le niveau d'eau R_{k+1} dans le réservoir vaut donc :

ÉCOULEMENT TOTAL

C'est ici qu'intervient la sortie de l'hydrogramme HU2. Elle permet de déterminer la composante d'écoulement Q_d .

Quant au débit total Q_k , il peut être calculé par une simple somme du débit de vidange du réservoir de routage et de la composante d'écoulement précédente.

DONNÉES NÉCESSAIRES AU MODÈLE

Les données indispensables au modèle GR4J sont la superficie du bassin versant, l'évapotranspiration potentielle, les précipitations (dans notre cas, spatialisées selon la méthode des polygones de Thiessen) et les données limnimétriques. Ces trois dernières sont utilisées au format journalier.

L'évapotranspiration journalière est calculée à partir de la formule présentée précédemment.

Il est également utile de fixer la valeur initiale des taux de remplissage des deux réservoirs. Une mauvaise initialisation de ceux-ci a pour effet de prolonger la période de mise en équilibre du modèle, dans ce cas une année de mise en route peut être nécessaire.

La durée de cette période de mise en route doit être indiquée par l'utilisateur, tout comme la durée de la période de test.

Les quatre paramètres peuvent être fixés aux valeurs suivantes pour débuter l'optimisation²⁵ :

$$X_1=5,9 \quad X_2=0 \quad X_3=4,5 \quad X_4=0,2$$

²⁵ Read me du fichier GR4J. Perrin, 2006. (Cemagref, 2011)

3.1.3. EPIC

Dans un premier temps, EPIC a été développé dans le but de simuler les impacts que peut avoir l'érosion sur la productivité agricole. Il a ensuite été étendu à la simulation de toutes sortes de processus en rapport avec l'agriculture. Les modules d'EPIC permettent les simulations de l'hydrologie, de l'érosion, du cycle des nutriments, de la croissance des plantes, de la température du sol,... (Singh, 1995).

Le nombre de modules augmentent la complexité et la quantité de données nécessaires par rapport aux deux modèles précédents.

Bien qu'EPIC soit utilisé à l'échelle de la parcelle et non du bassin versant, il peut être considéré comme un modèle conceptuel à base physique. En effet, les équations utilisées n'ont aucune signification physique mais permettent une explication conceptuelle des phénomènes en jeu. Les paramètres quant à eux, sont déduits ou mesurés à partir des propriétés des sites étudiés.

EPIC a été initialement programmé en FORTRAN, ce qui demandait quelques connaissances du langage pour l'utiliser. Ensuite, une version d'EPIC a été développée avec Visual C++ (i_epic), utilisant un interface graphique. Il permet à l'utilisateur de ne plus devoir utiliser le langage FORTRAN. Il existe également une version DOS d'EPIC. Pour les simulations, nous avons finalement décidé d'utiliser cette dernière.

FONCTIONNEMENT DU MODÈLE (SINGH, 1995 ; SOHIER, 1999 ; WILLIAMS ET AL., 2006)

Pour ce travail, nous ne considérerons aucune autre limitation à la croissance que l'eau et nous analyserons uniquement la teneur en eau du sol. De ce fait, seuls les modules liés à l'hydrologie et à la croissance végétale seront expliqués.

LE RUISELLEMENT DE SURFACE

EPIC utilise la méthode SCS afin de déterminer le volume ruisselé.

Avec, Q , le volume de ruissellement journalier [mm],

R , les précipitations journalières [mm],

S , un paramètre de rétention [mm].

Ce paramètre S varie avec les caractéristiques du sol, l'occupation du sol, la technique culturelle, la pente et les variations de teneur en eau dans le sol. Le *curve number* (CN) décrit par l'USDA reprend tous ces facteurs, ce qui permet d'écrire :

Selon la méthode SCS, trois types de CN existent : le CN_1 , utilisé lorsque l'humidité antérieure est faible, le CN_2 , lorsque l'humidité antérieure est moyenne et le CN_3 , lorsque l'humidité antérieure est forte.

Une table permet de déterminer la valeur du CN_2 pour une parcelle cultivée ayant une pente de 5 %. Cette valeur peut être ajustée à d'autres pentes par la formule suivante :

Avec, S , la pente moyenne de la parcelle [m/m].

A partir de la valeur du CN_2 , il est possible de calculer les CN_1 et CN_3 .

Lorsque la teneur en eau varie, le paramètre de rétention S change également. Le modèle recalcule ce paramètre pour chaque jour simulé, grâce à la formule suivante :

Avec, S_i , le paramètre de rétention calculé avec le CN_i [mm],

FFC, la fraction de capacité au champ,

w_1 et w_2 , deux paramètres d'état.

La fraction de capacité au champ peut être calculée comme suit :

Avec, SW, la teneur en eau du sol [mm],

WP, la teneur en eau au point de flétrissement [mm],

FC, la teneur en eau à la capacité au champ [mm].

Pour le calcul du pic de ruissellement, il existe deux méthodes de calcul possibles : la méthode de l'équation rationnelle et la méthode SCS TR-55.

La formule rationnelle considère que le débit maximum de ruissellement est dépendant des caractéristiques d'infiltration du sol, de l'intensité de la pluie pour le temps de concentration et de la superficie drainante.

La méthode SCS TR-55 décrit le pic de ruissellement comme étant fonction de la distribution et de l'intensité des pluies, du *curve number* et du temps de concentration.

LA PERCOLATION

Le module permettant la simulation de la percolation et de la teneur en eau du sol, considère chaque couche de sol (l) comme un réservoir. Ainsi lorsque le premier réservoir atteint sa capacité au champ, le surplus passe dans le second,... La quantité d'eau contenue par un réservoir diminue de la manière suivante :

Avec, SW_l , la teneur en eau finale [mm],
 SW_{ol} , la teneur en eau initiale [mm],
 FC_l , la teneur en eau à la capacité au champ [mm],
 Δt , l'intervalle de temps [24 h],
 TT_l , le temps de parcours au travers d'une couche de sol l [h].

La percolation journalière peut être obtenue par différence entre la teneur en eau finale et initiale.

Le temps de parcours au travers de la couche de sol l est donné par l'équation :

Avec, PO_l , la porosité du sol [mm],
 SC_l , la conductivité du sol à la saturation [mm/h].

LES TRANSFERTS HYPODERMIQUES LATÉRAUX

L'équation exprimant l'écoulement hypodermique latéral est similaire à celle régissant la percolation.

Avec, QH_l , le transfert hypodermique latéral [mm/jour],
 TT_{HL} , le temps de parcours du flux latéral au travers de la couche de sol [jour].

Ce temps de parcours peut être calculé de la manière suivante :

L'équation d'écoulement hypodermique latéral est résolue simultanément au calcul de la percolation afin qu'aucun des deux processus ne prenne le dessus simplement parce qu'il est traité en premier. Les deux équations sont sommées pour permettre de les résoudre en même temps.

L'ÉVAPOTRANSPIRATION

EPIC propose quatre méthodes pour estimer l'évapotranspiration potentielle : Penman, Penman-Monteith, Priesley-Taylor et Hargreaves and Samani. Les deux premières méthodes requièrent des données de radiation solaire, de température d'air, de vitesse de vent et d'humidité relative. La méthode de Priesley-Taylor n'a besoin que de la radiation solaire et de la température de l'air tandis que la dernière méthode ne nécessite que les données de température.

L'évaporation de chaque couche et la transpiration des plantes sont calculées séparément à partir de la valeur d'ETP trouvée précédemment.

LA CROISSANCE VÉGÉTALE

Ce module permet la simulation de parcelles avec tout type de couverture végétale. Les valeurs des différents paramètres de la culture sont à définir et à introduire dans le modèle.

Le développement de la végétation a lieu tous les jours où la température moyenne excède la température spécifique de base de la plante cultivée. La croissance potentielle de la culture est fonction de la part de rayonnement solaire intercepté (et donc du LAI) et d'un coefficient de conversion de l'énergie en biomasse caractéristique de la végétation en place.

Le *Leaf Area Index* (LAI), la hauteur des cultures et la croissance des racines varient selon le stade de développement. Ils sont estimés pour chaque espèce en fonction de la température journalière. Les arbres à feuilles persistantes gardent un LAI peu variable au cours de l'année.

EPIC décrit la quantité d'eau potentiellement prélevée par les plantes comme étant une fonction de la demande évaporatoire, de la profondeur et de la densité des racines ainsi que de la répartition de l'eau dans le sol.

La croissance végétale n'atteint que rarement son maximum, c'est-à-dire la croissance potentielle. En effet, toute une série de facteur limitatif existe. Ils peuvent être dus aux stress causés par l'eau, la température, les nutriments, l'aération du sol,...

DONNÉES NÉCESSAIRES AU MODÈLE

De nombreux paramètres sont nécessaires au modèle : les caractéristiques de la parcelle, les données météorologiques, les particularités du sol, les caractéristiques de la culture, etc.

LA MÉTÉOROLOGIE

Les données météorologiques pouvant être introduites dans le modèle sont : le rayonnement solaire, l'humidité relative, les précipitations, les températures minimales et maximales et la vitesse du vent. Le tout en données journalières. Les moyennes mensuelles sont également nécessaires.

LE SOL

Le sol doit être correctement décrit. Il est nécessaire de déterminer le nombre de couches, leur épaisseur, leur composition en limon et en sable, leur densité apparente, les teneurs en eau au point de flétrissement et à la capacité au champ, la conductivité hydraulique à saturation et le taux de carbone organique.

Les épaisseurs et profondeurs de couches ont été déterminées par ajustement des données de la carte des sols de Belgique aux observations des profils sur le terrain.

La composition en limon et en sable, ainsi que le taux de carbone organique proviennent directement du livret explicatif de la carte des sols de Belgique. Ces données ont ensuite permis de calculer les autres paramètres par l'intermédiaire de fonctions de pédotransfert (nomogramme de Rawls pour la densité apparente, relation de Cosby²⁶ pour la conductivité hydraulique et van Genuchten-Mualem pour les teneurs en eau)

LA CULTURE

Les paramètres caractérisant la culture sont : le LAI maximum, la température nécessaire à la croissance, la hauteur maximale, la densité de plantation, la profondeur maximale des racines,...

Le manuel théorique de SWAT a permis d'obtenir les valeurs des paramètres pour le chêne et l'épicéa. Pour ce dernier, les valeurs à utiliser sont les mêmes que celles des autres conifères (Neitsch *et al.*, 2005). Le fait d'utiliser les paramètres de SWAT est possible car le module de croissance végétale de ce modèle est basé sur celui d'EPIC.

²⁶ Parmi la grande diversité des fonctions de pédotransfert permettant le calcul de la conductivité hydraulique d'un sol, notre choix s'est porté sur celle de Cosby suite aux conseils de Tietje *et al.* (1996) en fonction du type de sol.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

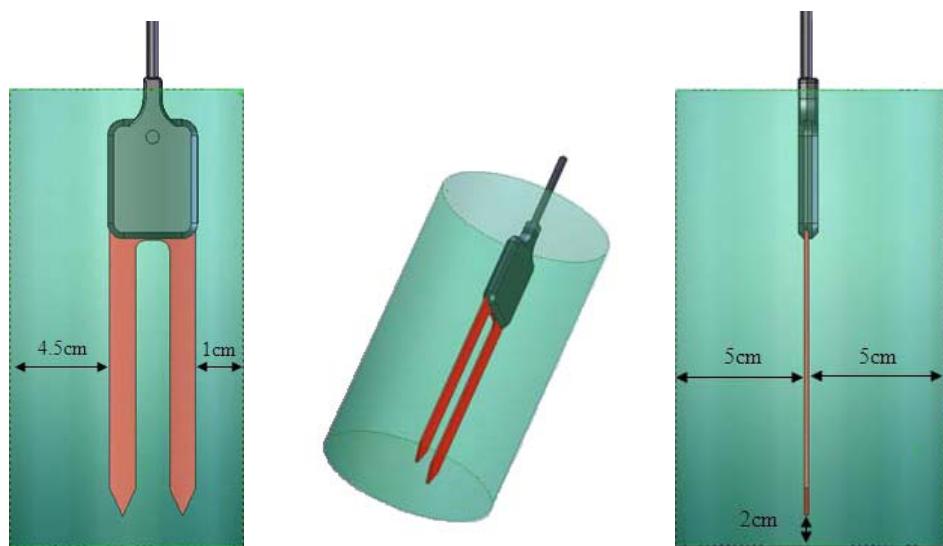


FIGURE 14 : ZONE D'INFLUENCE DU CAPTEUR (COBOS, 2008)

3.2. LE MATÉRIEL DE MESURE DU TAUX D'HUMIDITÉ

Lors de ce travail, des mesures d'humidité du sol ont été réalisées afin de les comparer à celles simulées.

Les sondes capacitatives 10HS Décagon mesurent la teneur en eau volumétrique du sol. Par rapport à d'autres capteurs du même type, elles ont l'avantage d'être peu sensibles à la salinité et à la texture du sol (Decagon device inc., 2008). Les résultats obtenus avec ces sondes sont comparables à ceux obtenus par sonde TDR pour des gammes de teneur en eau inférieures à 30 % (Mittelbach, 2011).

Le volume d'influence est relativement important pour ce type de capteur. Il est d'environ 1160 cm³ répartis de la manière présentée sur la Figure 14 (Cobos, 2008).

Les capteurs ont été installés à trois profondeurs différentes (16, 43.5, 67 cm) et décalés les uns des autres, cela sur deux sites forestiers distincts. Ces profondeurs ont été choisies en fonction du profil, afin de représenter au mieux les différentes couches tout en limitant la proximité de gros cailloux. Ils ont été placés de manière à orienter la face plane à la verticale. Ceci permet de limiter l'effet des flux d'eau descendant (Decagon device inc., 2008).

Le datalogger a été programmé de manière à enregistrer les mesures toutes les 15 minutes.

LA CALIBRATION DES CAPTEURS

Les équations de calibration pré-encodées sont des équations moyennes pour des sols minéraux ou des composts. L'unité de mesure (raw) est également disponible et enregistrée par le datalogger. Les couches de sol étant très différentes dans un même profil, il paraît intéressant de déterminer l'équation de calibration de chacune de ces couches. Les sondes ont été calibrées en laboratoire selon le protocole décrit par Decagon (Cobos D.R. et al., 2010).

LA DENSITÉ APPARENTE

Afin de déterminer la densité apparente du sol, deux anneaux volumétriques ont été prélevés par profondeur étudiée et par site, soit un total de douze anneaux. Une fois préparés, ils ont été placés en étuve à 120 °C pendant un jour. Lorsque les échantillons ont été secs, nous les avons pesés. La densité apparente a ensuite été calculée en divisant cette masse par le volume de 100 cm³ de l'anneau.

Il faut noter que cette étape a certainement induit un léger biais dans la calibration car quelques petits cailloux étaient présents dans les échantillons. Or pour le point suivant, nous avons besoin de la densité apparente de la terre fine. Cependant, un échantillonnage de terre pure aurait été impossible dans les couches inférieures à cause de leur teneur en cailloux élevée. De plus, le constructeur affirme qu'il faut une variation de densité d'environ 20 % pour commettre une erreur dans la calibration (Cobos D.R. et al., 2010).

Les densités apparentes calculées se trouvent en annexe 9.3 .

MATÉRIEL ET MÉTHODE

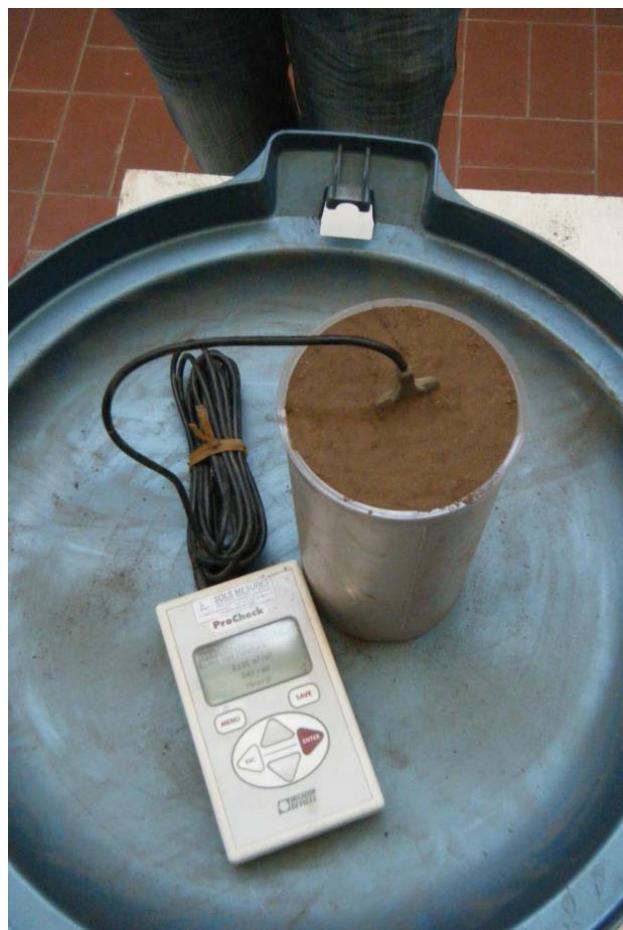


FIGURE 15 : CALIBRATION DES CAPTEURS

LA CALIBRATION

L'établissement d'une équation de calibration demande un échantillon de terre fine d'un volume égal à la zone d'influence du capteur, c'est-à-dire 1160 cm^3 . Nous avons deux sites avec trois profondeurs de mesure, six échantillons étaient donc nécessaires. Cette terre devant être tamisée à 5 millimètres, environ 5 litres de terre par capteur ont été rapportés au laboratoire pour être séchés à l'air libre.

Lorsque les échantillons de terre ont été bien secs, nous les avons tamisés. La terre devait ensuite être compactée dans un récipient d'un volume au moins équivalent à celui de la zone d'influence du capteur, et ce jusqu'à la densité apparente (ρ) mesurée précédemment. Le récipient choisi, dans notre cas, a un volume de 1,75 litre ($\emptyset : 10,5 \text{ cm}$) et une masse de 227,3 grammes. Il est en plastique non conducteur et n'influence pas les mesures. De fait, les mesures réalisées en décentrant légèrement le capteur sont identiques à celles faites au centre. La masse de terre (M) à y introduire est la suivante :

Cette quantité de terre va être humidifiée une première fois et compactée de manière à l'introduire entièrement dans le volume exact du récipient. Lorsque cela est fait, l'ensemble est pesé afin de déterminer avec précision la quantité d'eau ajoutée. La sonde est ensuite introduite et la mesure enregistrée. Ce procédé est répété plusieurs fois. Il est conseillé d'humidifier la terre à environ 10 % pour la première mesure et 40 ou 50 % (selon le comportement du sol) pour la dernière.

Lorsque les différentes teneurs en eau sont calculées et le signal correspondant enregistré, ces points sont mis en graphique. Une droite de régression peut ensuite être tracée. Son équation correspond à l'équation de calibration à utiliser pour obtenir la teneur en eau du sol.

LES ÉQUATIONS DE CALIBRATION

Les équations de calibration trouvées pour les différentes couches sont les suivantes :

- Pessière :
 - Couche supérieure : $\theta = 0,0007 \cdot \text{RAW} - 0,5005$ $(r^2 = 0,998)$
 - Couche intermédiaire : $\theta = 0,0007 \cdot \text{RAW} - 0,4569$ $(r^2 = 0,987)$
 - Couche inférieure : $\theta = 0,0006 \cdot \text{RAW} - 0,421$ $(r^2 = 0,983)$
- Chênaie :
 - Couche supérieure : $\theta = 0,0007 \cdot \text{RAW} - 0,528$ $(r^2 = 0,983)$
 - Couche intermédiaire : $\theta = 0,0006 \cdot \text{RAW} - 0,4872$ $(r^2 = 0,989)$
 - Couche inférieure : $\theta = 0,0006 \cdot \text{RAW} - 0,4942$ $(r^2 = 0,969)$

Il est intéressant de constater que les dernières couches de la chênaie possèdent des équations fort semblables. De fait, visuellement, elles se ressemblaient fortement mis à part les cailloux plus présents en profondeur. Or le sol a été tamisé ce qui ne laisse plus vraiment de différence entre les deux.

Les résultats intermédiaires et les courbes de calibration sont donnés en annexe 9.3.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

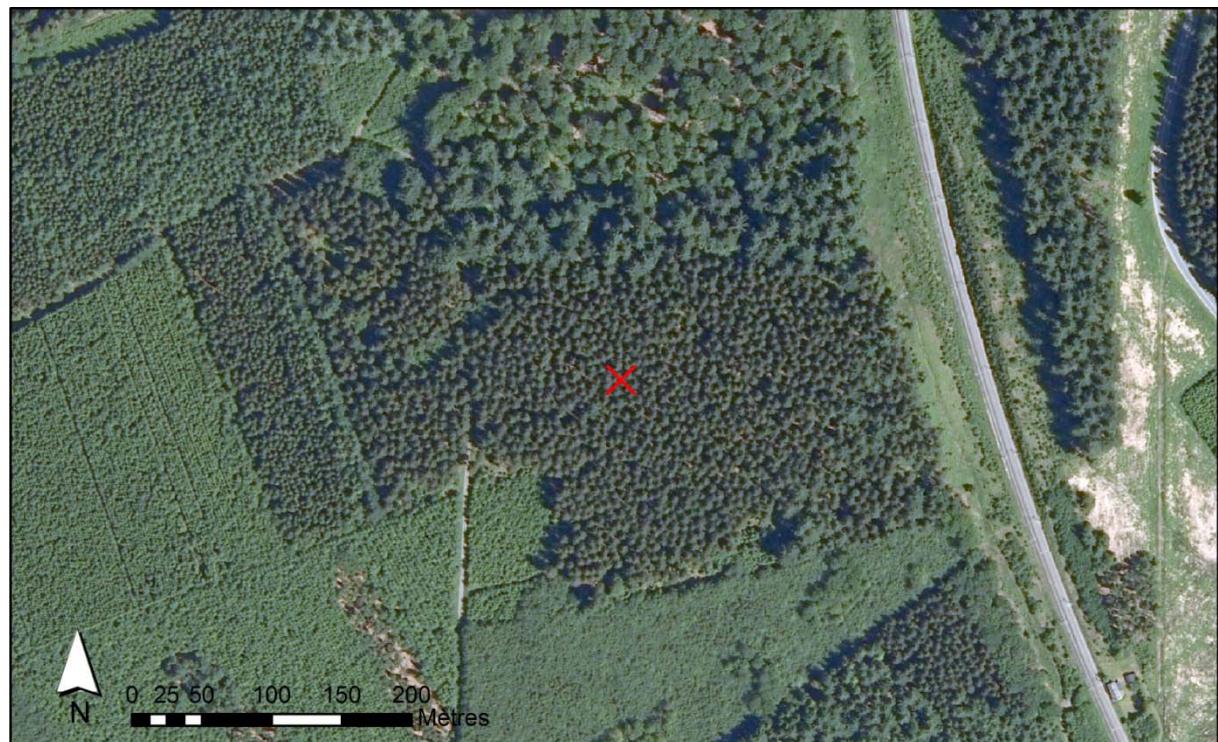


FIGURE 16 : PHOTOGRAPHIE AÉRIENNE DE LA PESSIÈRE (SITE 1)

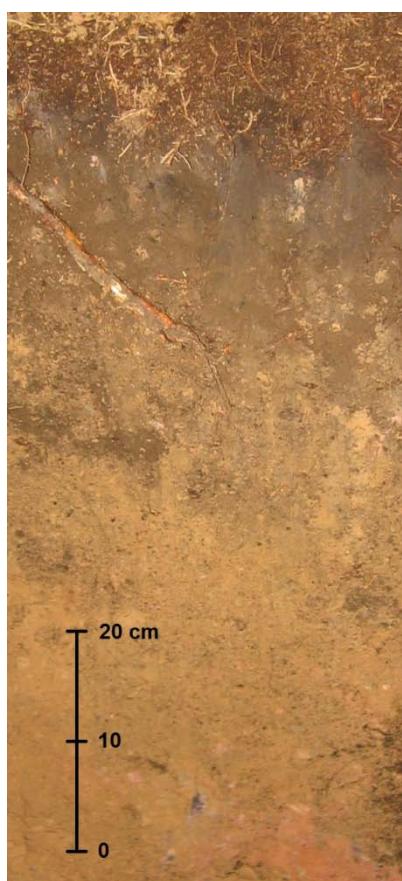


FIGURE 18 : PROFIL DU SOL DU SITE 1



FIGURE 17 : ZOOM SUR LE BAS DU PROFIL (SITE 1)

3.3. LES SITES DE MESURE

PESSIÈRE

Le premier site de mesure est situé à proximité du village de Gedinne sous une pessière équienne²⁷ ($49^{\circ}58'25.18''$ N, $4^{\circ}58'28.02''$ E). Le terrain choisi présente une pente presque nulle afin de limiter les flux horizontaux qui pourraient biaiser les mesures.

L'épicéa commun (*Picea abies (L.) KARST*) peut atteindre plus de 40 mètres de haut. Cette espèce nécessite un climat humide et frais. Bien que l'enracinement dépende fortement des propriétés physiques et chimiques du sol (Hartmann, 2011 ; Levy, 1968), les racines de l'épicéa peuvent être qualifiées de traçantes avec quelques pivots secondaires (Baix *et al.*, 1991). Cette disposition des racines induit un prélèvement de l'eau du sol essentiellement dans les couches supérieures. Par ailleurs, l'enracinement superficiel ne permet pas une infiltration en profondeur aussi bonne qu'un enracinement profond.

L'épicéa ne prélève pas beaucoup d'eau dans son environnement. Kostner (1998) a mesuré, à partir du flux de sève, un prélèvement de 108 mm entre le mois de mai et le mois d'octobre 1995, soit environ 30 litres par jour et par arbre ou 0.54 mm/jour. Oltchev (1997) arrive à des valeurs journalières du même ordre de grandeur. Ceci malgré le fait que la période d'étude n'est que d'une semaine (durant le mois de juillet), ce qui n'est pas spécialement représentatif de la moyenne annuelle. Les valeurs de prélèvement restent fort dépendantes de l'âge de la pessière et des conditions dans lesquelles elle se développe.

Comme la plupart des conifères, cette essence est sempervirente et a un LAI très élevé ($10 \text{ m}^2/\text{m}^2$) (Bolstad, 1990 ; Oren, 1988), ce qui induit une interception importante tout au long de l'année. Il faut cependant noter la présence d'une légère variation saisonnière du LAI.

La litière étant difficile à décomposer, elle forme une couche relativement épaisse et acide. Cette acidité entraîne généralement un sous-bois peu développé (Baix *et al.*, 1991), bien que la diversité du sous-bois dépende également de la sylviculture pratiquée et de la densité de plantation. En effet, une forêt plus aérée aura tendance à présenter un sous-bois plus riche en espèces.

²⁷ Peuplement dont la classe d'âge est homogène.

MATÉRIEL ET MÉTHODE



FIGURE 19 : PHOTOGRAPHIE AÉRIENNE DE LA CHÊNAIE (SITE 2)



FIGURE 21 : PROFIL DU SOL DU SITE 2

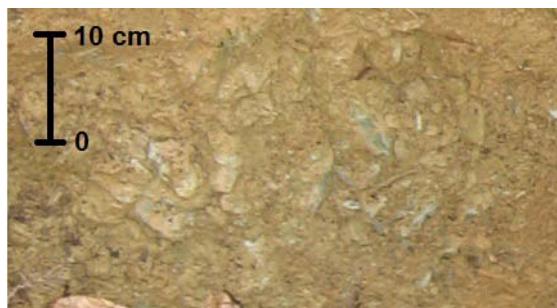


FIGURE 20 : ZOOM SUR LE BAS DU PROFIL (SITE 2)

LA CHÉNAIE

Le deuxième site de mesure se situe sous une chênaie d'âges multiples, sur la partie Est du plateau de la Croix Scaille ($49^{\circ}57'23,40''$ N, $4^{\circ}53'52,62''$ E). Tout comme pour le site précédent, la pente du terrain peut être considérée comme nulle.

Le chêne sessile (*Quercus patrea (Mattus.) Liebl.*) se différencie du chêne pédonculé (*Quercus robur L.*) de par la présence d'un pédoncule sur ses feuilles mais pas sur ses fruits. Il peut atteindre 30 à 40 mètres de hauteur. Ses racines sont de type pivotant lorsque l'arbre est jeune, pour être ensuite complétées par des racines obliques. Cependant, comme dit pour l'épicéa, le développement racinaire reste dépendant des propriétés du sol. La croissance du chêne est relativement lente, spécialement dans sa jeunesse. Leur culture est généralement un mélange avec du hêtre (Bary-Lenger, 1993 ; Poskin, 1939). La feuillaison a lieu vers la fin avril (Massart J., 1910).

Le chêne sessile est héliophile à héliophile tolérant et son couvert est plus serré que celui du pédonculé (Baix *et al.*, 1991 ; Bary-Lenger, 1993).

Breda (1995) a calculé la quantité d'eau prélevée par une chênaie à partir de la variation de la réserve d'eau dans le sol. Cette quantité est estimée à environ 125 mm entre le 10 juin et le 11 septembre 1992, ce qui représente 1.34 mm/jour. Nous pouvons donc supposer que, durant la période de végétation, une chênaie prélève en moyenne plus d'eau qu'une pessière. La quantité d'eau prélevée par le chêne dépend également des conditions environnementales, de son âge et de la saison.

3.4. LES DÉMARCHES DE MODÉLISATION

3.4.1. LA CALIBRATION

La calibration a pour but de fixer la valeur des paramètres qu'on ne peut mesurer ou estimer de manière précise. Le choix des valeurs doit se porter sur celles qui permettent la meilleure correspondance entre simulation et réalité. Il est important d'utiliser la série de données qui présente le plus grand contraste dans ses valeurs afin de couvrir la plage de débits la plus large possible (Ambroise, 1999 ; Grayson, 2000). Cela permet de limiter au maximum l'extrapolation lors de l'utilisation du modèle. La calibration doit normalement respecter le critère d'unicité, c'est-à-dire qu'elle doit être reproductible et arriver aux mêmes résultats (Kauark-Leite, 1990).

La capacité d'un modèle (avec un set de paramètres définis) à simuler correctement peut être déterminée par une fonction objectifs. Elle a pour rôle de renseigner sur les écarts subsistants entre simulation et réalité. Le set de paramètres le plus approprié est celui qui correspond au maximum (ou minimum)²⁸ de cette fonction (Ambroise, 1999). Bien souvent, la calibration se fait uniquement sur les débits à l'exutoire. Ce qui est normal lorsque seuls ceux-ci sont simulés. Mais lorsque le modèle propose en donnée de sortie d'autres flux hydriques, il est intéressant de les intégrer à la calibration. La fonction objectifs peut être multiple et reprendre toutes les variables que l'on veut tester (Ambroise, 1999 ; Grayson, 2000). Cela permet d'augmenter la puissance de la calibration (Withaker, 2003).

Certaines de ces fonctions permettent une vérification approfondie, tandis que d'autres ont une vision plus globale. La calibration idéale serait de commencer par tester le modèle de manière globale, puisque cela est plus facile à réaliser, et de finir avec les vérifications approfondies qui sont plus complexes. Il s'agit du principe du rasoir d'Ockham. Du plus simple au plus compliqué nous avons : le bilan à long terme, le bilan annuel, les flux constitutifs du débit et les événements extrêmes.²⁹

Quelques exemples de fonctions objectifs :

- La méthode graphique (les données simulées sont présentées en fonction des données mesurées en essayant d'avoir un coefficient angulaire unitaire) :
 - Le coefficient d'écoulement (rapport du débit et des précipitations)
 - L'équilibre infiltration/ruissellement simulé avec le débit mesuré
- La moyenne des carrés des écarts entre variables simulées et mesurées
- La somme des carrés des écarts entre variables simulées et mesurées
- La somme des différences absolues entre variables simulées et mesurées
- Le coefficient de NASH ou comme proposé par Legates (1999), le NASH modifié
- le coefficient de corrélation r ou de détermination r^2
- Le pourcentage d'écart entre variables simulées et mesurées

La fonction choisie aura un impact non négligeable sur le résultat de la calibration (Ambroise, 1999 ; Grayson, 2000).

²⁸ Attention aux extrema locaux, car c'est l'extremum absolu qui est recherché.

²⁹ Degré A., *Cours de modélisation des transferts dans les sols*, 2009.

La recherche de l'extremum peut être manuelle (par essais et erreurs) ou automatisée (Ambroise, 1999 ; Grayson, 2000). Pour la méthode manuelle, il peut être intéressant d'avoir fait une étude de sensibilité afin d'avoir une idée des paramètres qu'il est nécessaire de modifier (Haan, 1982). Quant à la méthode automatisée, l'ordinateur s'occupe de minimiser ou maximiser la fonction objectifs, en un nombre d'itérations minimum, à l'aide d'un algorithme d'auto-calibration (Kauark-Leite, 1990).

Bien que les fonctions objectifs soient très utiles du point de vue de la reproductibilité des résultats, elles ne permettent pas toujours une identification claire du meilleur set de paramètres (Legates, 1999). Il est donc intéressant de recourir à un diagnostic visuel des séries chronologiques. Les points à contrôler sont : le débit de base, les crues (date et amplitude) et la dynamique de récession. Bien que dans ce cas, le critère d'unicité ne soit plus respecté, puisque deux personnes réalisant la même calibration peuvent arriver à des résultats différents (Kauark-Leite, 1990).

En plus de définir la valeur des paramètres, la calibration compense les erreurs du modèle et des données en les propageant dans ces paramètres (Zehe, 2007).

3.4.2. LA VALIDATION

La calibration étant faite, il reste à réaliser la validation pour s'assurer de la qualité du modèle. En effet, la calibration permet une bonne simulation avec le set de données et les valeurs de paramètres choisis. Cela ne veut pas dire que la simulation sera toujours correcte avec une autre série de données. Cependant, il ne faut pas perdre de vue qu'un modèle calibré et validé ne l'est que pour un domaine d'application bien déterminé (Grayson, 2000).

Pour cette étape, il est nécessaire d'avoir à disposition une série de données qui n'a pas été utilisée lors de la calibration et dont les données de sortie correspondantes sont connues (de Marsily, 1994). Elle sera utilisée pour faire une simulation sur le même bassin versant avec les valeurs des paramètres trouvées par la calibration. Le résultat est ensuite comparé à la réalité avec la même fonction objectifs que précédemment. Pour les modèles spatialisés, la même démarche peut être réalisée sur un autre bassin versant (Ambroise, 1999).

Si les résultats de la simulation ne sont pas convaincants, les valeurs des paramètres et/ou la structure du modèle sont à remettre en question. Des résidus faibles et similaires pour la calibration et la validation sont un signe que le modèle est correct (Grayson, 2000). Il est possible de comparer l'efficacité de plusieurs modèles à partir des valeurs des fonctions objectifs mais uniquement pour un même bassin versant et une même période (Ambroise, 1999).

Lors de l'utilisation du modèle calibré et validé, il est fort déconseillé de travailler en dehors des conditions de validation (Ambroise, 1999).

3.4.3. LES FONCTIONS OBJECTIFS CHOISIES

PDM & GR4J

Le programme propose une calibration et une validation sur les débits avec une méthode d'ajustement soit manuelle soit automatique. La fonction objectifs à minimiser peut être choisie parmi les six suivantes :

- La moyenne des carrés des différences
- La moyenne des carrés des différences en logarithme népérien
- La moyenne des carrés des différences en logarithme base 10
- La somme des carrés des différences
- La somme des carrés des différences en logarithme népérien
- La somme des carrés des différences en logarithme base 10

Comme expliqué précédemment, l'utilisation des logarithmes évite de donner trop de poids aux débits importants.

Cependant, ces fonctions objectifs n'ont pas donné entière satisfaction lors d'essais de simulations préalables. Il a donc été décidé de travailler avec une fonction objectifs multiple de notre choix. Le principe du rasoir d'Ockham est appliqué.

Les mêmes fonctions objectifs sont utilisées pour PDM et GR4J, ceci afin de pouvoir comparer les deux modèles.

La première étape consiste en une vérification du bilan hydrologique interannuel et annuel (année hydrologique). Une manière de procéder est de comparer les entrées d'eau aux sorties sommées de la variation de stock :

Avec, P , les précipitations,
 Q , les sorties d'eau à l'exutoire,
 E , l'évapotranspiration,
 ΔS , la variation du stock d'eau dans le sol.

Toutefois, la variation de stock n'étant pas facilement déterminable à partir des données de sortie du modèle, il est préférable de comparer les coefficients d'écoulement réels et simulés. C'est-à-dire le rapport entre le volume d'eau écoulé à l'exutoire et le volume d'eau précipité.

Avec, ΔB , la différence relative entre les coefficients d'écoulement réel et simulé [%],
 Ce_o , le coefficient d'écoulement observé [-],
 Ce_s , le coefficient d'écoulement simulé [-].

La seconde étape consiste à tester la période étudiée par le coefficient de Nash-Sutcliffe :

Avec, NASH, le coefficient de NASH,
 Q_o , les débits observés,
 Q_c , les débits simulés,
 Q_m , la moyenne des débits observés.

Ce coefficient est adimensionnel et peut prendre des valeurs allant de $-\infty$ à 1 (simulation parfaite). Une valeur de 0 correspond à une qualité de simulation ne valant pas mieux que la moyenne (Degré, 2008).

La troisième et dernière étape utilise à nouveau le coefficient de Nash-Sutcliffe, mais cette fois il est appliqué sur les pics de crue.

Il est possible de pousser la calibration plus loin (débits de base et statistique des extrêmes) mais nous n'irons pas jusque là dans le cadre de ce travail.

EPIC

EPIC ne prend en compte que des paramètres ayant une valeur fixe (paramètres physiques). Si tous les paramètres nécessaires sont mesurés ou connus de façon précise, la calibration n'est pas utile.

Dans notre cas, il est apparu que les teneurs en eau à la capacité au champ observées et celles calculées à partir de la carte des sols ne correspondaient pas. Ceci est certainement dû au fait que le profil observé n'était pas exactement celui décrit par la carte. Un ajustement de la teneur en eau à la capacité au champ a donc été réalisé afin de faire correspondre ces valeurs à celles mesurées sur les deux sites.

La qualité de la simulation est vérifiée après ajustement du modèle par une comparaison entre les mesures de teneur en eau et leur prédiction par EPIC.

4. RÉSULTATS

Ce point ne fait que présenter les résultats, leur interprétation et leur discussion seront réalisées au point suivant.

4.1. PDM

4.1.1. PAS DE TEMPS JOURNALIER

La calibration du modèle PDM au pas de temps journalier donne un bilan interannuel acceptable. En effet, la différence entre le coefficient d'écoulement observé et celui simulé n'est que de 1.73 %. Les bilans annuels sont assez variables comme le montre le Tableau 2. L'année hydrologique 2007-2008 semble bien simulée (-1.59 %) tandis que les années 2006-2007 (-5.66 %) et 2008-2009 (17.9 %) sont plus décevantes. La validation donne quant à elle un bilan catastrophique (-33.5 %).

TABLEAU 2 : DIFFÉRENCE RELATIVE DES COEFFICIENTS D'ÉCOULEMENT OBSERVÉS ET SIMULÉS

CALIBRATION ET VALIDATION DU MODÈLE PDM AU PAS DE TEMPS JOURNALIER

Période	Calibration 2006-2009	Calibration 2006-2007	Calibration 2007-2008	Calibration 2008-2009	Validation 2009-2010
Différence de coefficient d'écoulement	1.73 %	-5.66 %	-1.59 %	17.9 %	-33.5 %

Le Tableau 3 présente les coefficients de Nash-Sutcliffe des périodes de calibration et de validation. Nous pouvons dire que les résultats du modèle sont moyens en calibration (0.65) et faibles en validation (0.52).

En ce qui concerne les pics de crue, PDM a tendance à les sous-estimer dès que les débits sont supérieurs à 7 m³/s en calibration, et 10 m³/s en validation. Ceci est confirmé par la Figure 22. Le coefficient de Nash de la validation (0.46) reflète également cette difficulté de simulation des pics.

TABLEAU 3 : CRITÈRE DE NASH-SUTCLIFFE DE LA CALIBRATION ET DE LA VALIDATION DU MODÈLE PDM AU PAS DE TEMPS JOURNALIER

	Calibration	Validation
Nash	0.65	0.52
Nash pics	0.66	0.46

RÉSULTATS

En calibration comme en validation, les faibles débits sont simulés avec une dispersion non négligeable comme le montrent la Figure 23 et la Figure 25. Ces graphiques laissent également apparaître une tendance à la surestimation des faibles débits.

Sur la Figure 22, nous pouvons constater que :

- la date d'occurrence des pics de crue est, en règle générale, bien estimée (même s'il arrive qu'elle soit prédite avec un léger retard),
- le débit de base est correct,
- la récession n'est pas toujours satisfaisante.

La série chronologique de la Figure 24 présente une correspondance acceptable entre débits observés et simulés pour la première partie de la validation.

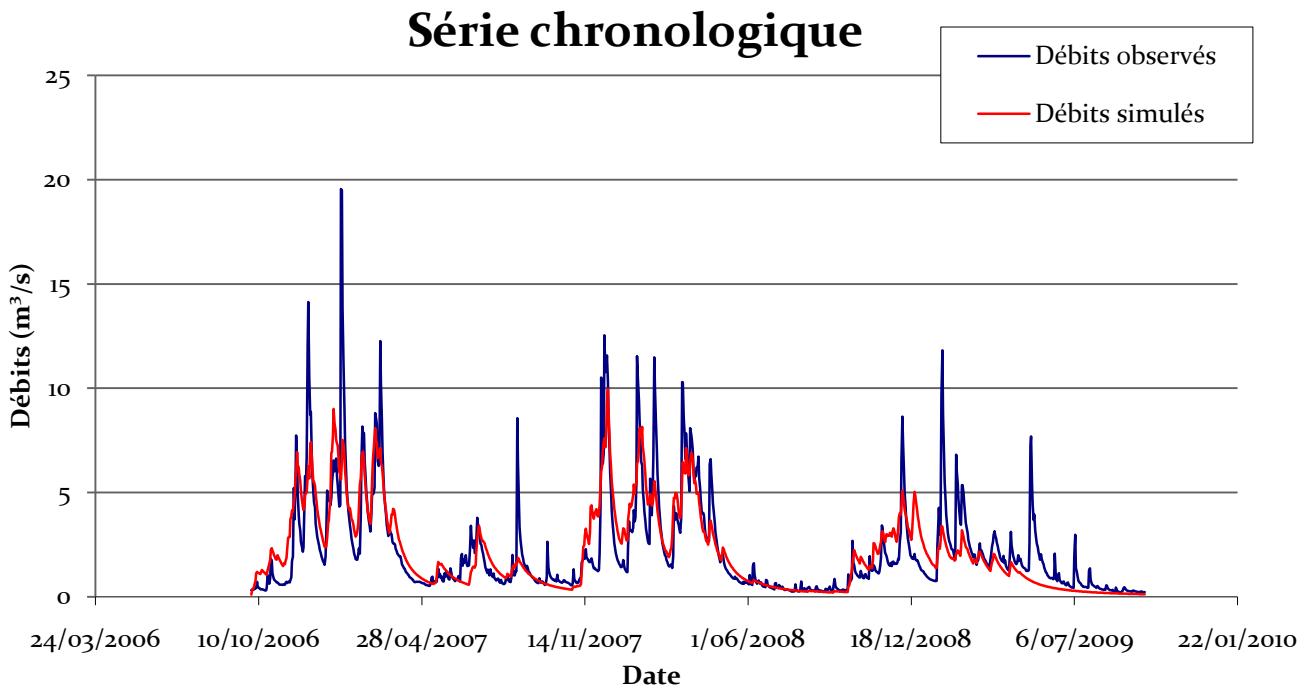


FIGURE 22 : SÉRIE CHRONOLOGIQUE DES DÉBITS JOURNALIERS OBSERVÉS ET SIMULÉS PAR PDM.

CALIBRATION 2006-2009 SUR LA HOUILLE À FELLENNE.

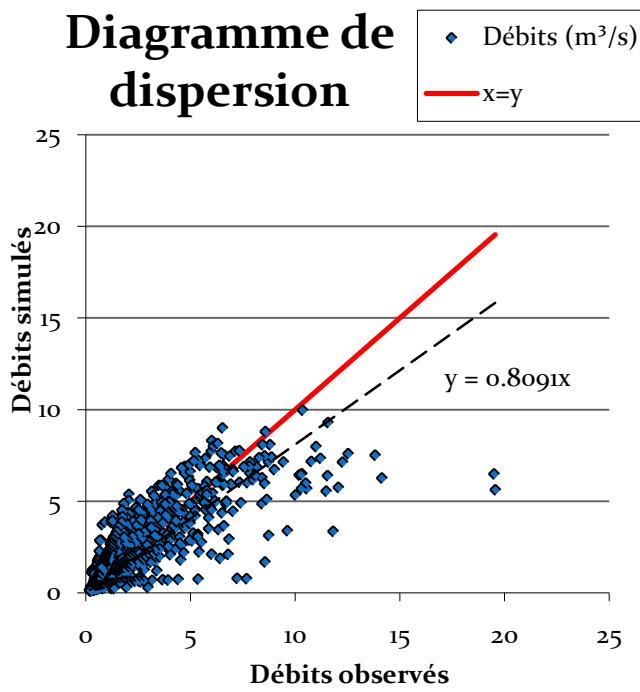


FIGURE 23 : COMPARAISON DES DÉBITS JOURNALIERS OBSERVÉS ET SIMULÉS PAR PDM.

CALIBRATION 2006-2009 SUR LA HOUILLE À FELLENNE.

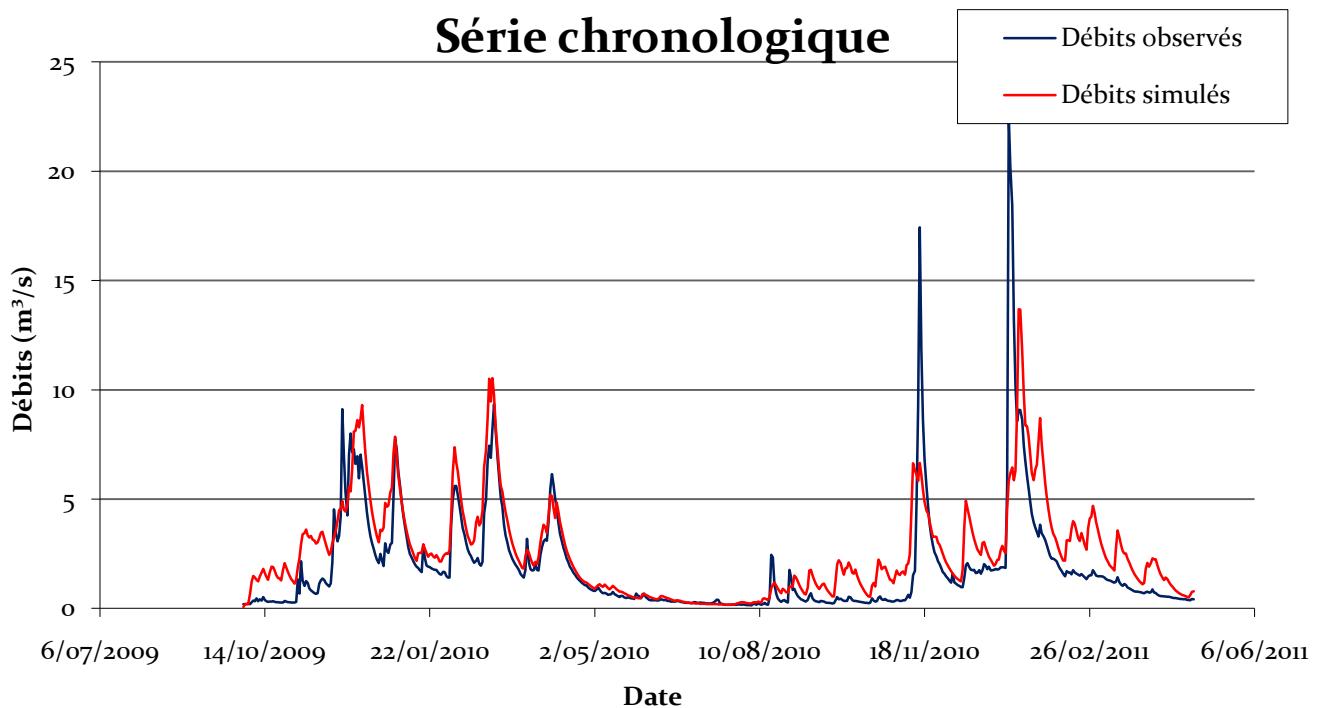


FIGURE 24 : SÉRIE CHRONOLOGIQUE DES DÉBITS JOURNALIERS OBSERVÉS ET SIMULÉS PAR PDM.

VALIDATION 2009-2011 SUR LA HOUILLE À FELENNE.

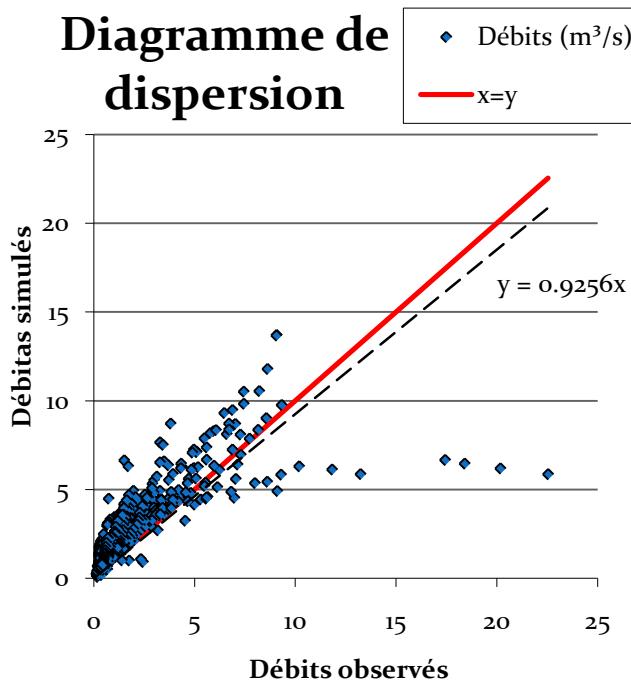


FIGURE 25 : COMPARAISON DES DÉBITS JOURNALIERS OBSERVÉS ET SIMULÉS PAR PDM.

VALIDATION 2009-2011 SUR LA HOUILLE À FELENNE.

RÉSULTATS

4.1.2. PAS DE TEMPS HORAIRE

Tout comme pour le modèle journalier, la calibration du modèle au pas de temps horaire donne une différence entre les coefficients d'écoulement observé et simulé correct (1.72 %). Les bilans annuels sont variables (Tableau 4). La première année est bien simulée (-2.33 %), tandis que les deux suivantes n'obtiennent pas des résultats aussi bons (-5.10 % et 21.0 %). Le bilan hydrologique de la validation du modèle horaire est mauvais (-34.0 %).

TABLEAU 4 : DIFFÉRENCE RELATIVE DES COEFFICIENTS D'ÉCOULEMENT OBSERVÉS ET SIMULÉS

CALIBRATION ET VALIDATION DU MODÈLE PDM AU PAS DE TEMPS HORAIRE

Période	Calibration 2006-2009	Calibration 2006-2007	Calibration 2007-2008	Calibration 2008-2009	Validation 2009-2010
Différence de coefficient d'écoulement	1.72 %	-2.33 %	-5.10 %	21.0 %	-34.0 %

Les coefficients de Nash-Sutcliffe, présentés au Tableau 5, sont moyens à faibles respectivement pour la calibration (0.62) et pour la validation (0.53). Lorsque ce critère de Nash est ciblé sur les pics de crue, les résultats de la simulation sont moyens aussi bien en calibration (0.60) qu'en validation (0.64).

TABLEAU 5 : CRITÈRE DE NASH-SUTCLIFFE DE LA CALIBRATION ET DE LA VALIDATION DU MODÈLE PDM AU PAS DE TEMPS HORAIRE

	Calibration	Validation
Nash	0.62	0.53
Nash pics	0.60	0.64

Sur la Figure 27, nous pouvons constater qu'au-delà de 6 m³/s, le modèle sous-estime systématiquement le débit. En calibration, la dispersion des débits simulés est relativement importante comme le montre la Figure 27. La Figure 28 et la Figure 29 illustrent la tendance du modèle à surestimer les faibles débits en validation.

L'observation de la Figure 26 permet de dire que :

- La date d'occurrence des pics de crue est bien estimée,
- La dynamique de récession simulée semble être similaire à celle observée.

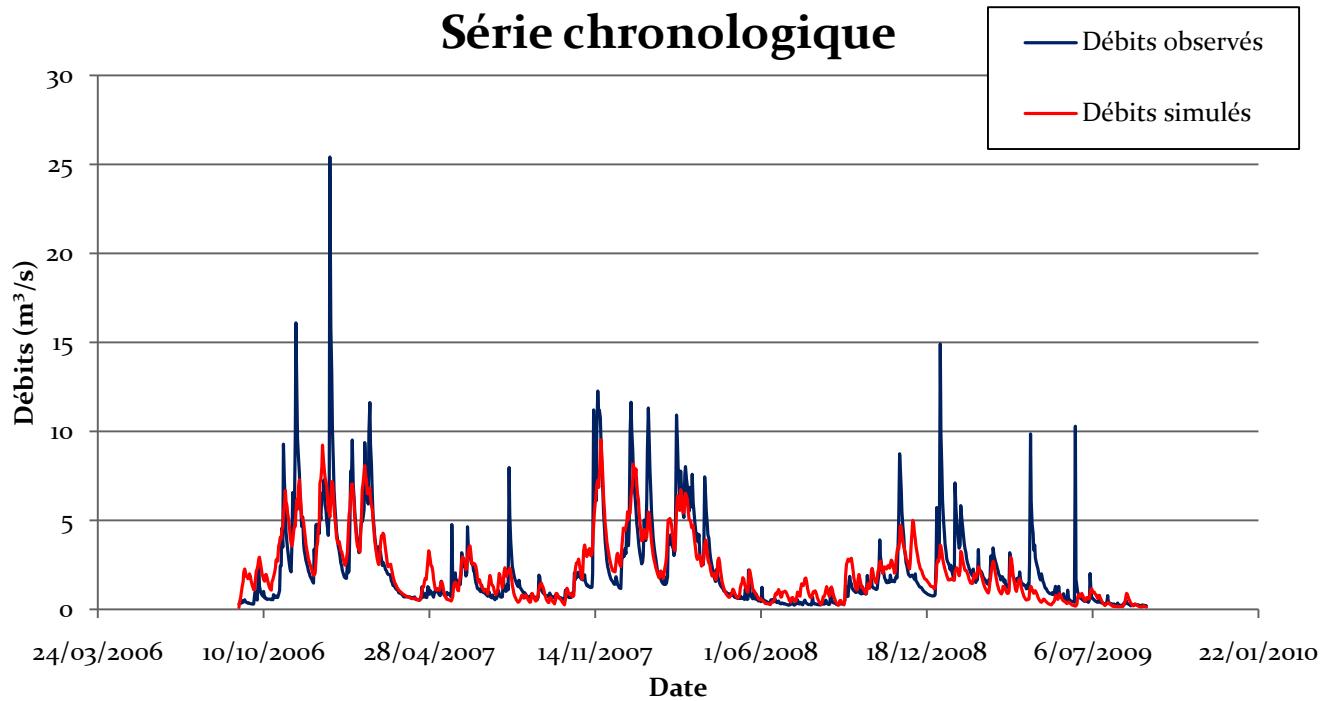


FIGURE 26: SÉRIE CHRONOLOGIQUE DES DÉBITS HORAIRES OBSERVÉS ET SIMULÉS PAR PDM.

CALIBRATION 2006-2009 SUR LA HOUILLE À FELENNE.

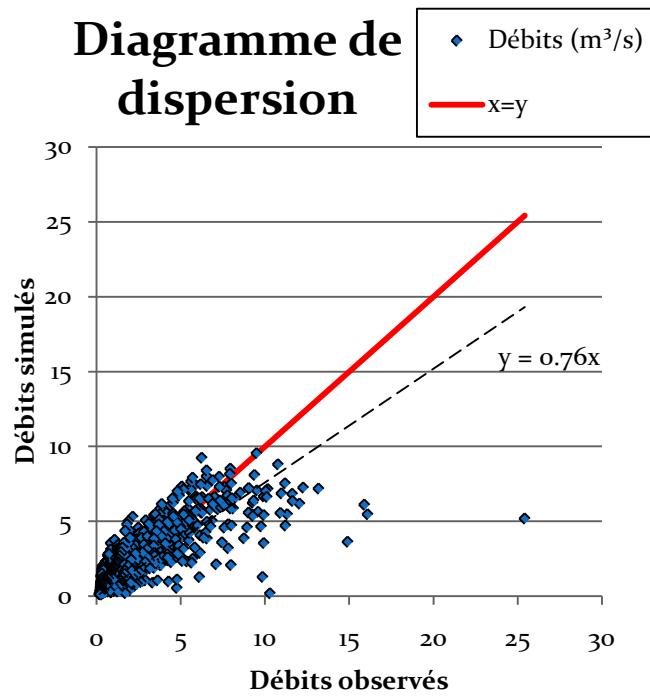


FIGURE 27 : COMPARAISON DES DÉBITS HORAIRES OBSERVÉS ET SIMULÉS PAR PDM.

CALIBRATION 2006-2009 SUR LA HOUILLE À FELENNE.

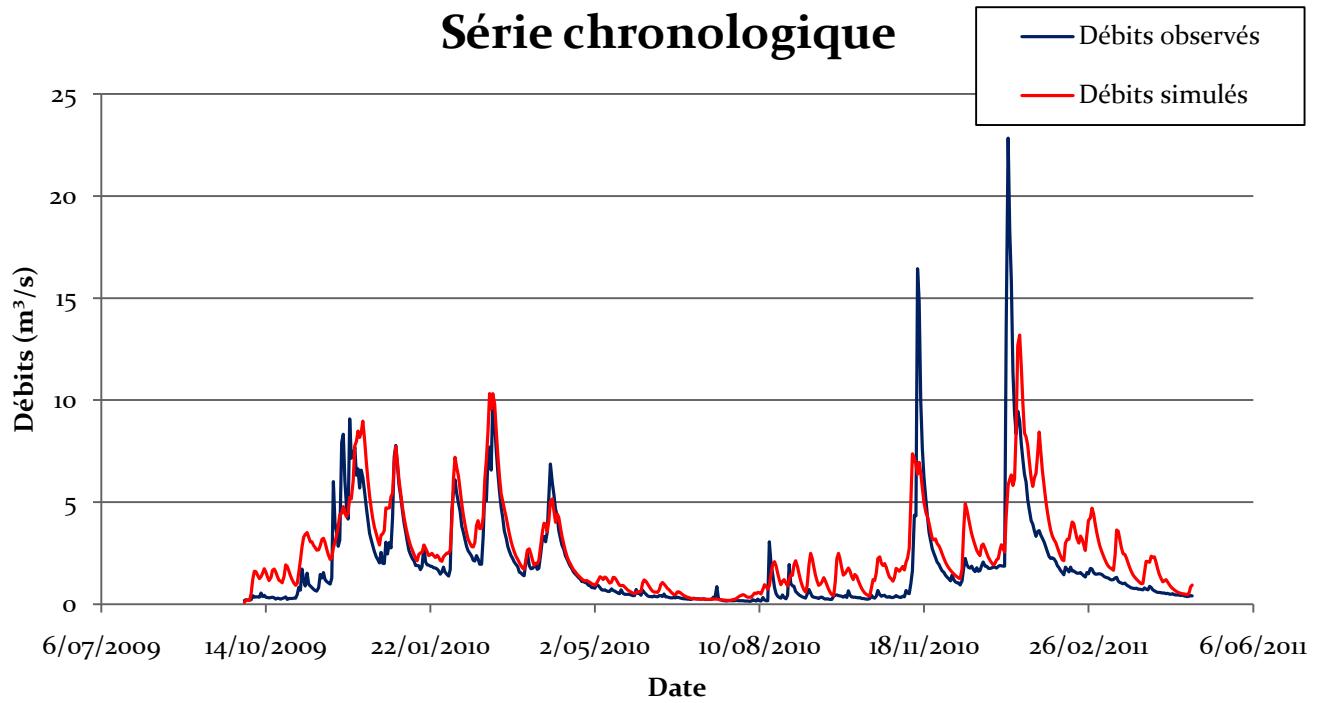


FIGURE 28 : SÉRIE CHRONOLOGIQUE DES DÉBITS HORAIRES OBSERVÉS ET SIMULÉS PAR PDM.

VALIDATION 2009-2011 SUR LA HOUILLE À FELENNE.

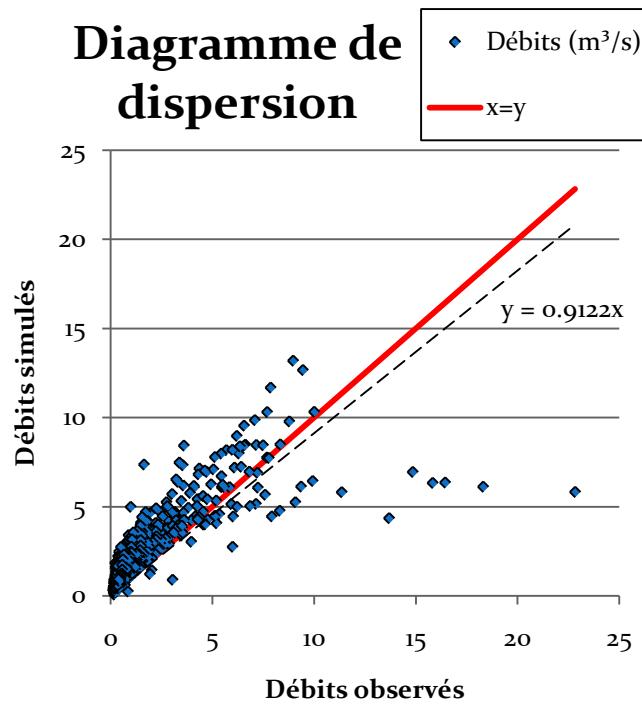


FIGURE 29: COMPARAISON DES DÉBITS HORAIRES OBSERVÉS ET SIMULÉS PAR PDM.

VALIDATION 2009-2011 SUR LA HOUILLE À FELENNE.

4.2. GR4J

Le modèle GR4J fournit une simulation de calibration dont le bilan interannuel est très bon, avec 0.87 % de différence entre les coefficients d'écoulement observé et simulé. Le Tableau 6 indique que, tout comme pour le modèle PDM, le bilan annuel de 2007-2008 est bien meilleur (-0.67 %) que ceux des années hydrologiques 2006-2007 et 2008-2009 qui affichent respectivement -8.27 % et 8.55 %. La validation offre un bilan annuel bien meilleur que ceux de la calibration (-0.18 %).

TABLEAU 6 : DIFFÉRENCE RELATIVE DES COEFFICIENTS D'ÉCOULEMENT OBSERVÉS ET SIMULÉS

CALIBRATION ET VALIDATION DU MODÈLE PDM

Période	Calibration 2006-2009	Calibration 2006-2007	Calibration 2007-2008	Calibration 2008-2009	Validation 2009-2010
Différence de coefficient d'écoulement	0.87 %	-8.27 %	-0.67 %	8.55 %	-0.18 %

Le Tableau 7 présente les coefficients de Nash-Sutcliffe de la calibration et de la validation du modèle GR4J. La simulation donne de bons résultats en calibration qui tendent à devenir moyens en validation.

La simulation des pics de crue en calibration est tout aussi correcte que le reste des débits (0.81). En ce qui concerne la validation, le critère de Nash ciblé sur les pics de crue est beaucoup plus faible (0.49).

TABLEAU 7 : CRITÈRE DE NASH-SUTCLIFFE DE LA CALIBRATION ET DE LA VALIDATION DU MODÈLE PDM

	Calibration	Validation
Nash	0.81	0.65
Nash pics	0.81	0.49

La Figure 30, montre que la première moitié de la période de calibration est mieux simulée que la seconde surtout au niveau des hauts débits. Nous pouvons voir sur la Figure 31, hormis une faible dispersion des points, une seconde tendance des points qui se distingue clairement.

Contrairement au reste de la période de validation, le pic de crue de janvier 2011 est très mal simulé comme le montre la Figure 32.

A partir des séries chronologiques des Figure 30 et 32, nous pouvons dire que :

- la date d'occurrence des pics de crue est correcte,
- le débit de base est relativement bon,
- les phases de récession sont tantôt moyennes, tantôt bonnes.

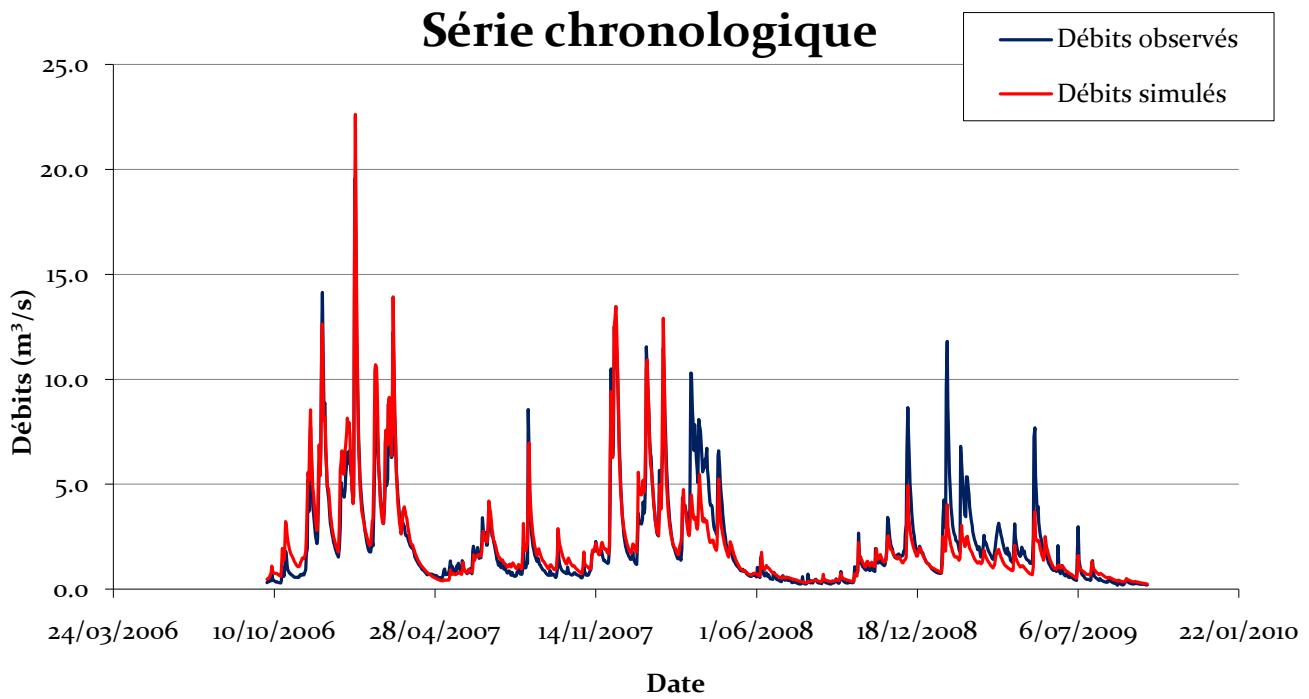


FIGURE 30 : SÉRIE CHRONOLOGIQUE DES DÉBITS OBSERVÉS ET SIMULÉS PAR GR4J.

CALIBRATION 2006-2009 SUR LA HOUILLE À FELENNE.

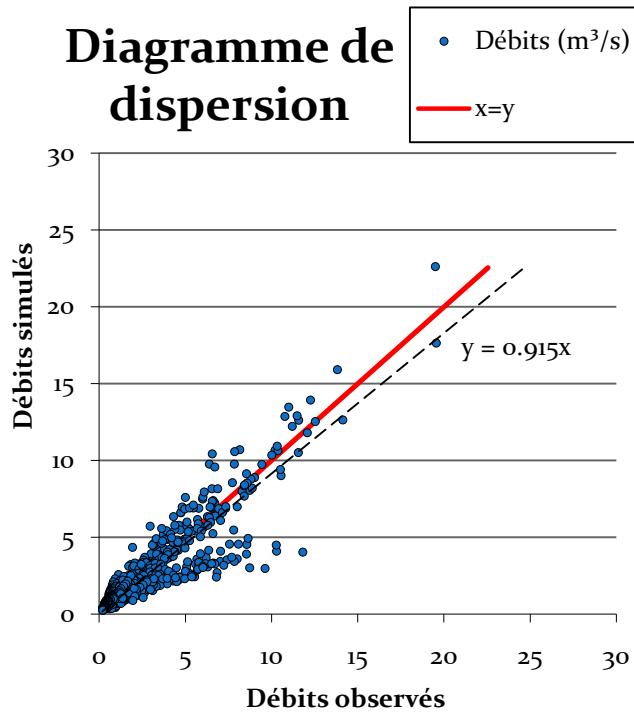


FIGURE 31 : COMPARAISON DES DÉBITS OBSERVÉS ET SIMULÉS PAR GR4J.

CALIBRATION 2006-2009 SUR LA HOUILLE À FELENNE.

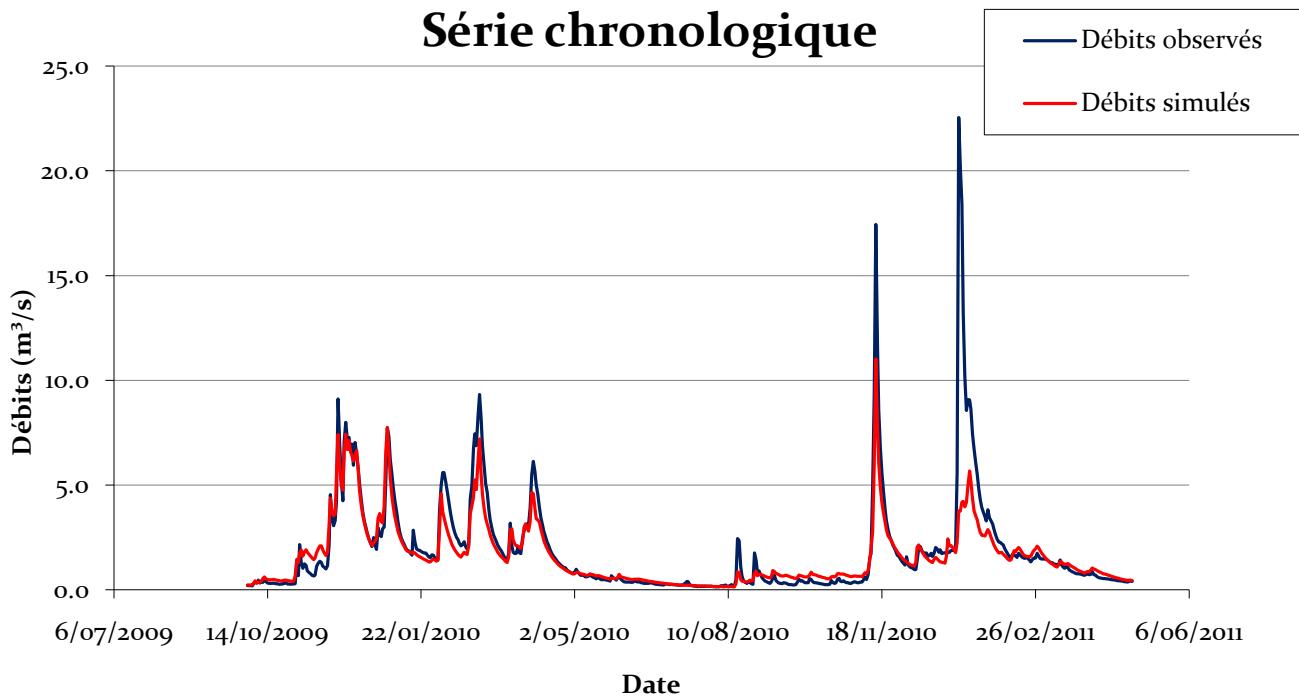


FIGURE 32 : SÉRIE CHRONOLOGIQUE DES DÉBITS OBSERVÉS ET SIMULÉS PAR GR4J.

VALIDATION 2009-2011 SUR LA HOUILLE À FELENNE.

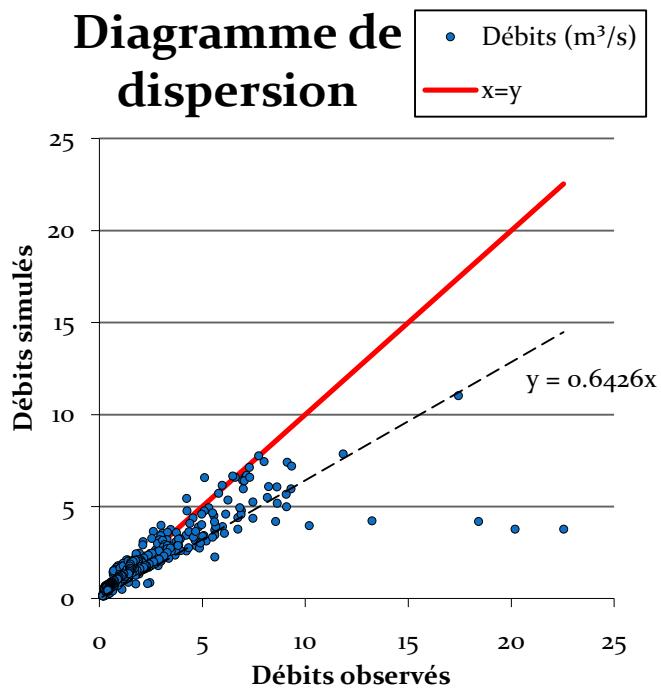


FIGURE 33 : COMPARAISON DES DÉBITS OBSERVÉS ET SIMULÉS PAR GR4J.

VALIDATION 2009-2011 SUR LA HOUILLE À FELENNE.

4.3. MESURES DE TENEUR EN EAU

Avant toute autre chose, il faut signaler que la période de mesure n'a duré que deux mois et que cette période a été relativement sèche. Il aurait idéalement fallut travailler sur plusieurs années afin d'avoir des données représentatives d'une année moyenne. Cependant, ce travail n'a pas été réalisé dans ce but mais plutôt dans celui d'initier une réflexion sur les comportements hydrologiques du chêne et de l'épicéa.

Le sol sous la pessière se comporte de manière très différente en surface et en profondeur (Figure 34). La couche supérieure présentant un taux d'humidité plus important que les couches inférieures.

Les quelques petites précipitations n'ont qu'un faible effet adducteur d'eau et uniquement sur la couche supérieure. Les couches inférieures présentent, lors de certaines précipitations, une diminution de la teneur en eau. Avec la profondeur croissante, la teneur en eau semble être plus stable au cours du temps. Il est intéressant de remarquer que la précipitation du 28 avril 2011, qui est la plus importante de la période de mesure (3.7 mm/jour), n'est pas celle qui provoque la plus grande augmentation de teneur en eau du sol.

La diminution de l'humidité du sol en l'absence de précipitations est de l'ordre de 0.81 mm/jour (avec un écart type de 0.20).

Le 5 mai la teneur en eau à 43.5 cm passe au dessus de celle de la couche inférieure (67 cm). Une nouvelle inversion entre les teneurs en eau de ces deux couches a lieu le 16 avril.

L'humidité du sol sous la chênaie présente un tout autre comportement (Figure 35). La teneur en eau du sol reste plus constante que sous la pessière à toutes les profondeurs de mesures. Elle est également plus importante en surface qu'en profondeur. Cependant contrairement à la pessière, l'humidité à 67 cm reste toujours légèrement supérieure à celle régnant à 43.5 cm.

Les précipitations ont un effet plus marqué que sur le site précédent. Avec une diminution de la teneur en eau pour les profondeurs les plus importantes et une augmentation pour la plus faible profondeur de mesure. Ceci n'est pas valable pour la précipitation du 28 avril qui semble n'avoir qu'un très faible effet sur l'humidité du sol.

La feuillaison a débuté le 23 avril 2011 et le 28 avril 2011, le couvert était total. Jusqu'à cette date, la teneur en eau du bas du profil a eut tendance à augmenter légèrement. Après feuillaison, cette tendance s'inverse et l'humidité diminue doucement. Les courbes des deux sites sont alors fort semblables.

En l'absence de précipitations, le sol voit sa teneur en eau diminuer d'environ 0.18 mm/jour (avec un écart type de 0.17) avant la feuillaison. Le prélèvement après feuillaison n'a pas été calculé car il n'y a eu que deux jours secs entre la fin de la feuillaison et la fin des mesures.

De légères oscillations sont visibles sur les courbes d'humidité du sol de la chênaie, surtout entre le 17 et le 30 mars 2011. Le 3 avril 2011, une petite chute du taux d'humidité est observable à 43.5 cm de profondeur.

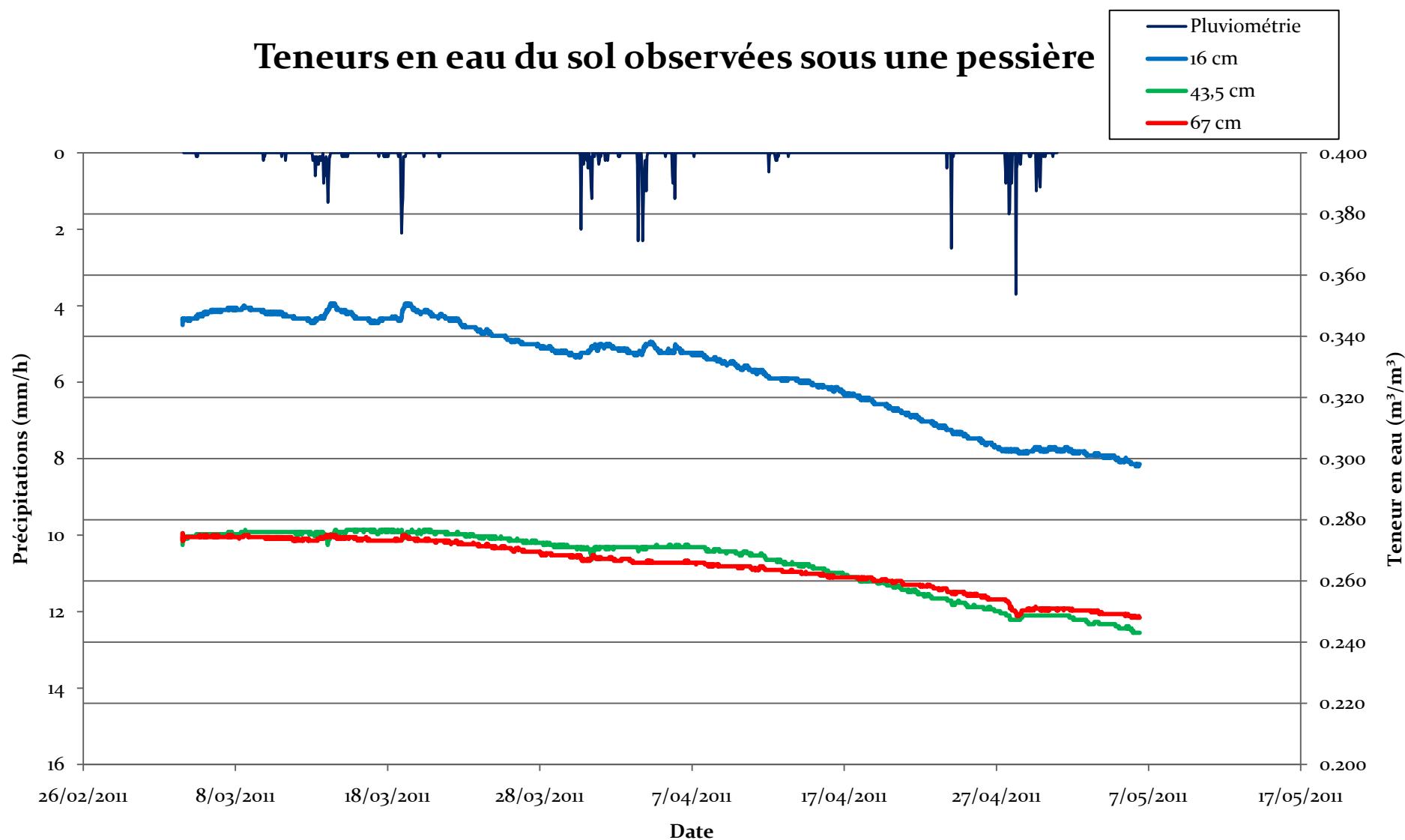


FIGURE 34 : EVOLUTION DES TENEURS EN EAU DU SOL OBSERVÉES À TROIS PROFONDEURS SOUS LA PESSIÈRE.

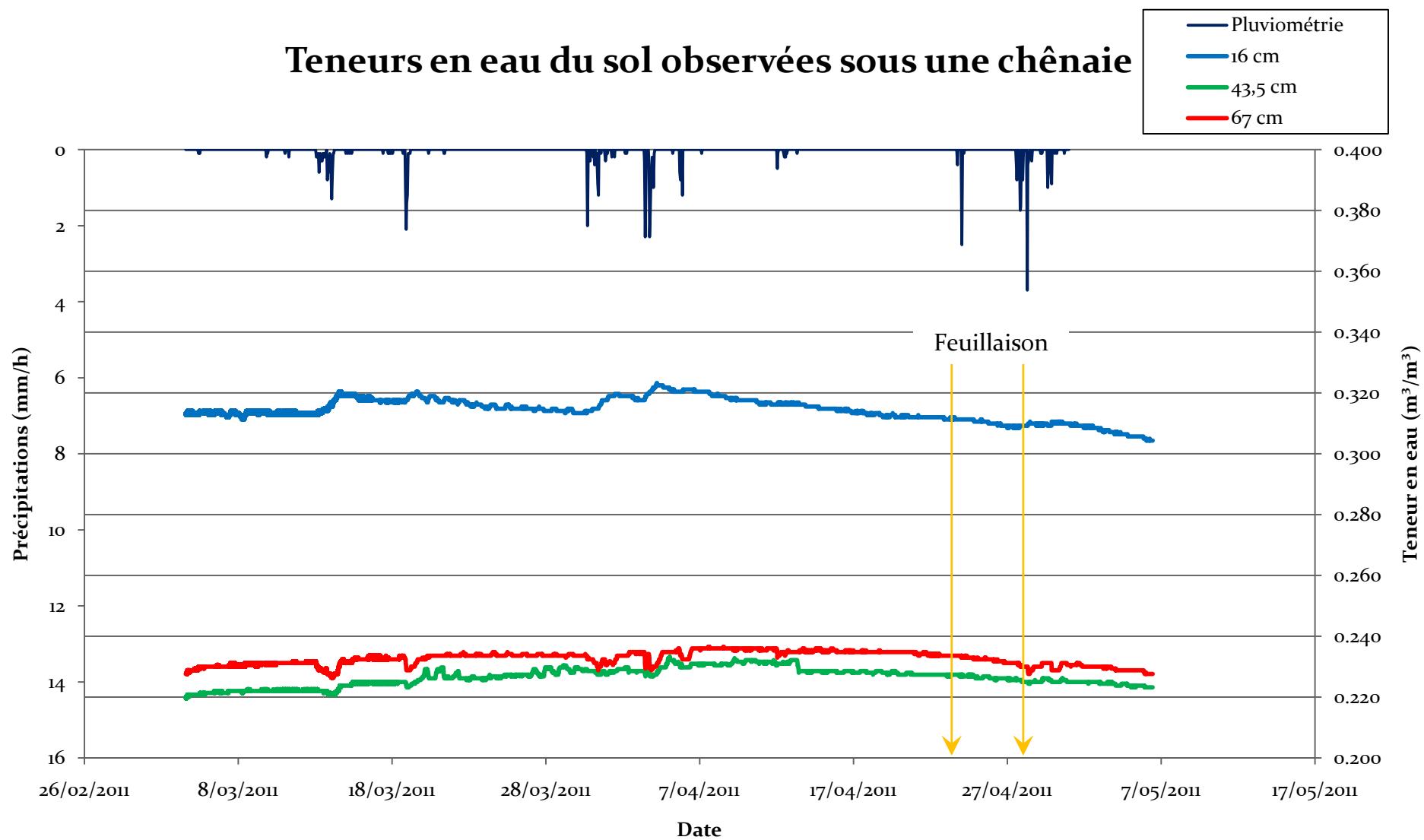


FIGURE 35 : EVOLUTION DES TENEURS EN EAU DU SOL OBSERVÉES À TROIS PROFONDEURS LA UNE CHÊNAIE.

4.4. EPIC

L'évolution de la teneur en eau simulée dans les différentes couches du profil sous la pessière est présentée à la Figure 36. Les résultats présentés ci-dessous sont ceux obtenus pour les mois de mars et d'avril 2011. Ils ne sont donc pas représentatifs d'une année complète. De plus les paramètres liés aux arbres n'ont pas été ajustés.

Nous pouvons constater de fortes diminutions de la teneur en eau dans la première couche dues au prélèvement par les épicéas. Ce phénomène est un peu moins marqué dans la seconde couche. Le prélèvement simulé peut être estimé pour les jours secs à 1.95 mm/jour (avec un écart type de 0.83)

Lors des événements pluvieux, la teneur en eau du sol remonte d'autant plus que la couche est proche de la surface. En effet, la dernière couche ne présente aucune augmentation de sa teneur en eau. L'effet de la précipitation diminue avec la profondeur, ceci est particulièrement visible avec la pluie du 3 mai 2011.

Sous la chênaie (Figure 37), la première couche est beaucoup plus touchée par le prélèvement d'eau que le sol de la pessière. Avant feuillaison, la diminution de la teneur en eau les jours secs est de l'ordre de 0.54 mm/jour (avec un écart type de 0.22) cette valeur passe à 2.35 mm/jour (avec un écart type de 0.34) après feuillaison. L'augmentation de la teneur en eau suite aux précipitations est également plus marquée. Il est d'ailleurs possible de remarquer que les trois couches les plus profondes restent à la capacité au champ jusqu'à la feuillaison (22 avril 2011).

L'effet des précipitations sur la teneur en eau du sol est très marqué pour la première couche de sol. Lors des événements les plus importants de la période (les 13, 19 et 31 mars 2011), l'humidité des deuxième et troisième couches augmente.

RÉSULTATS

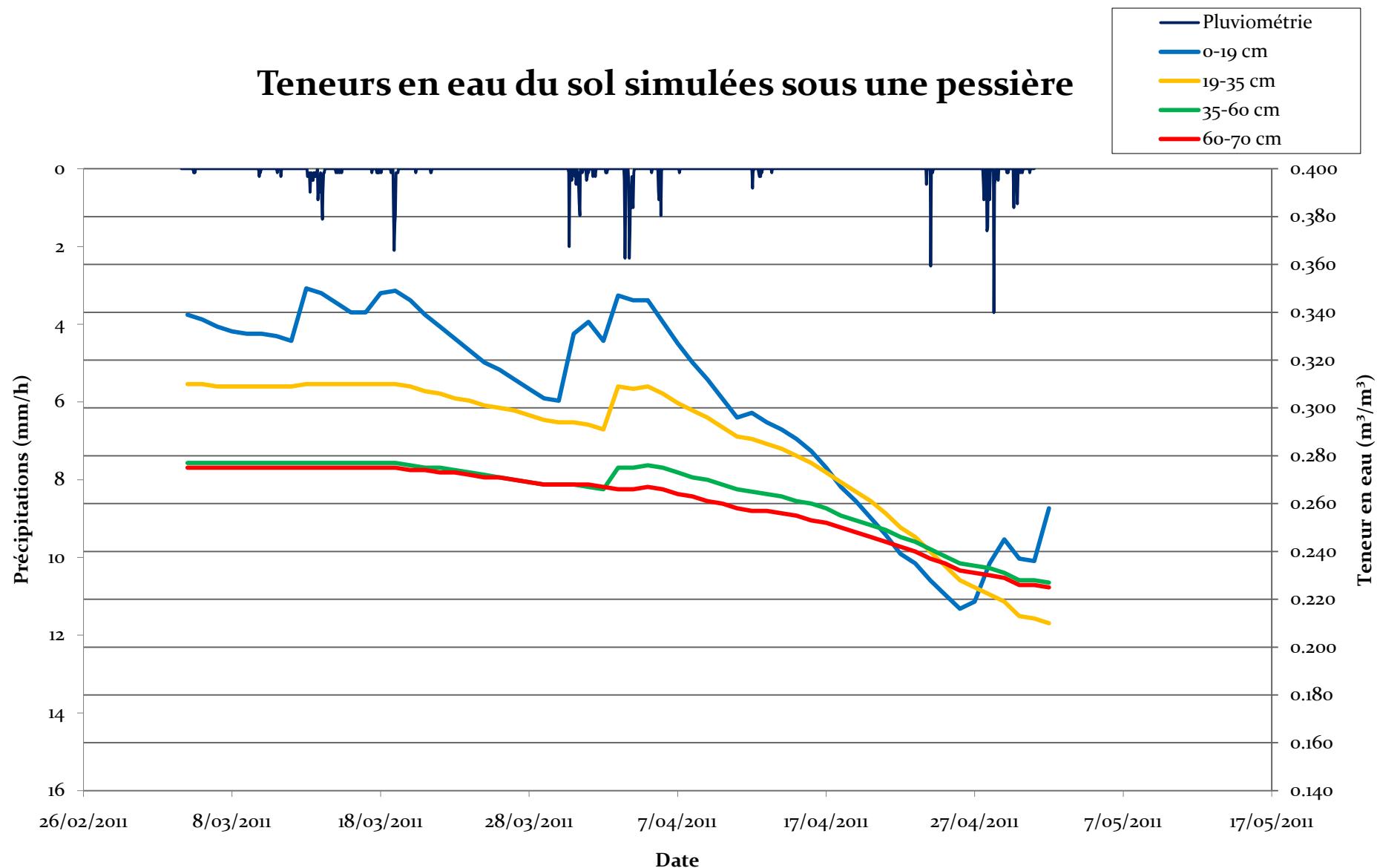


FIGURE 36 : EVOLUTION DES TENEURS EN EAU SIMULÉES DANS LES DIFFÉRENTES COUCHES DU PROFIL SOUS LA PESSIÈRE

RÉSULTATS

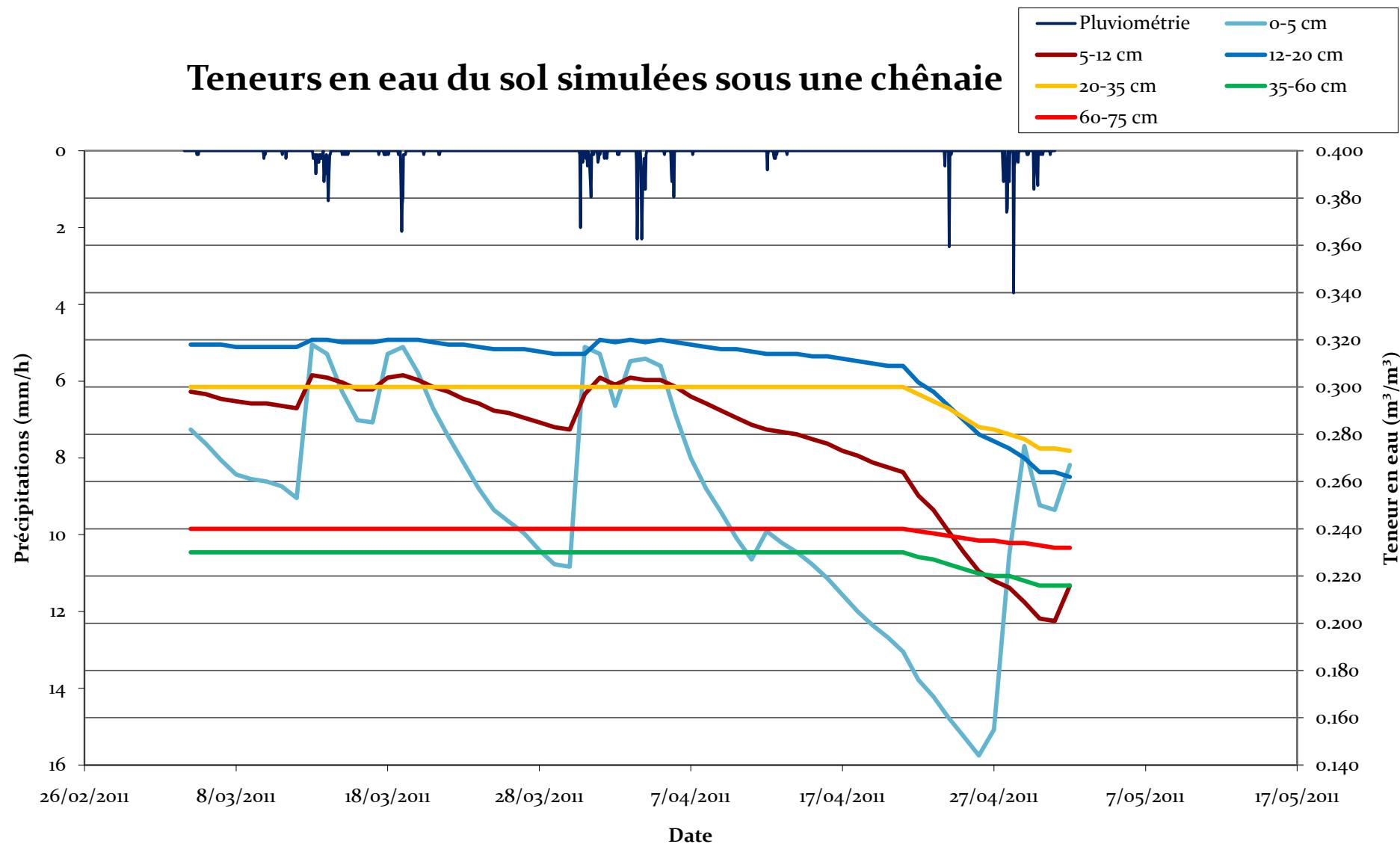


FIGURE 37 : EVOLUTION DES TENEURS EN EAU SIMULÉES DANS LES DIFFÉRENTES COUCHES DU PROFIL SOUS LA CHÊNAIE

5. DISCUSSION

5.1. PDM

PDM est une application très simple, qui permet la création d'un modèle hydrologique à partir de très peu de types de données. La seule contrainte étant qu'il faut disposer de longues séries de données de qualité et sans interruption (Degré, 2008).

Le modèle PDM ne fournit cependant pas des résultats d'une grande fiabilité. En période hivernale, certains pics de crue ne sont pas bien simulés du tout. Il s'agit essentiellement des crues dues au dégel, il n'y a donc pas de précipitations à cette date. Les tombées de neige étant directement converties en précipitations liquides par le pluviomètre ou le pluviographe, le modèle ne sait pas simuler les écoulements dus à la fonte de cette neige. Il ne peut donc pas prédire les crues qui en découlent. Cela explique également la divergence des points qui est observée sur les Figures 25 et 29. En effet, pour obtenir l'extremum de la fonction objectifs, le modèle va augmenter l'ensemble des débits de l'année. L'erreur ainsi commise est répartie sur toute la période de simulation. Cela permet de s'approcher du pic de la crue d'hiver mais en surestimant les débits des épisodes neigeux qui précèdent la crue ainsi que toutes les autres valeurs de débit de la période.

La période de validation comporte un pic de crue dont l'amplitude est plus importante que tous les pics de crue présents en calibration. Le modèle est donc utilisé en extrapolation, ce qui n'est pas recommandé (Ambroise, 1999). Cela est confirmé par les résultats de la simulation. Il serait donc intéressant, pour une prochaine simulation, de pouvoir inclure cette période de données au set de calibration afin de travailler le moins possible en extrapolation.

Lorsque nous comparons les fonctions objectifs des modèles PDM au pas de temps journalier et au pas de temps horaire (Tableau 8 et Tableau 9), nous pouvons constater que la qualité de la simulation est similaire. Il en va autrement pour la validation qui présente une meilleure représentation des pics de crue au pas de temps horaire, comme nous le montre le critère de NASH.

Les données horaires étant d'office nécessaires au bon fonctionnement de PDM et les résultats identiques, voire légèrement plus faibles pour le pas de temps journalier, il semble plus intéressant de faire la simulation au pas de temps horaire.

TABLEAU 8 : DIFFÉRENCE RELATIVE DES COEFFICIENTS D'ÉCOULEMENT OBSERVÉS ET SIMULÉS

CALIBRATION ET VALIDATION DU MODÈLE PDM JOURNALIER ET HORAIRE

Pas de temps	Calibration 2006-2009	Calibration 2006-2007	Calibration 2007-2008	Calibration 2008-2009	Validation 2009-2010
Journalier	1.73 %	-5.66 %	-1.59 %	17.9 %	-33.5 %
Horaire	1.72 %	-2.33 %	-5.10 %	21.0 %	-34.0 %

TABLEAU 9 : CRITÈRE DE NASH-SUTCLIFFE DE LA CALIBRATION ET DE LA VALIDATION DU MODÈLE PDM
JOURNALIER ET HORAIRE

	Calibration	Validation	Calibration	Validation
Pas de temps	Nash		Nash pics	
Journalier	0.65	0.52	0.66	0.46
Horaire	0.62	0.53	0.60	0.64

5.2. GR4J

GR4J est rapide et simple à utiliser, si ce n'est qu'il faut calculer l'évapotranspiration journalière si elle ne fait pas partie du set de données disponibles. De plus, il n'est pas nécessaire d'avoir à disposition de très longues séries chronologiques, quelques années suffisent (Harlan, 2010).

Pour les pics de crues, la deuxième moitié de la période de calibration paraît donner des résultats systématiquement inférieurs aux observations. De fait, sur la Figure 38 nous pouvons distinguer deux directions préférentielles du nuage de points. Nous pouvons nous demander si le problème vient du modèle imparfait ou bien des données qui seraient biaisées. Il est fort peu probable que l'erreur vienne des données car celles-ci sont obtenues par spatialisation selon la méthode des polygones de Thiessen et les données des différentes stations utilisées ont la même allure.

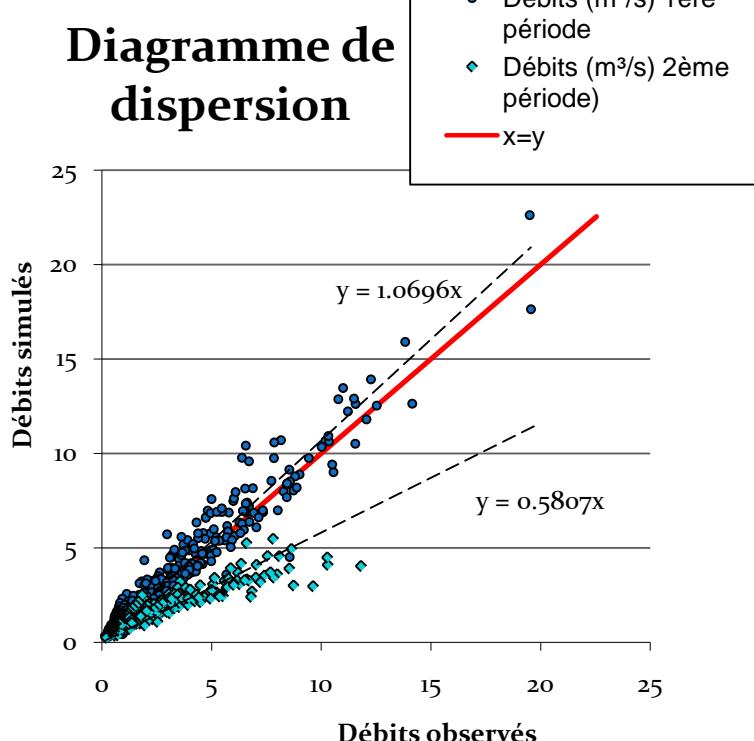


FIGURE 38 : COMPARAISON DES DÉBITS OBSERVÉS ET SIMULÉS PAR GR4J.

CALIBRATION 2006-2009 SUR LA HOUILLE À FELENNE.

DISCUSSION

Les coefficients de Nash de la validation ne donnent pas de très bons résultats. Cependant, visuellement la série chronologique de la validation n'est pas mauvaise, mis à part le pic de crue de janvier 2011 qui est largement sous-estimé. Celui-ci correspond à la période de fonte des neiges accumulées sur plusieurs semaines, que GR4J est incapable de simuler puisqu'il ne prend pas en compte les températures. Dans ce contexte, nous pourrions trouver étonnant que les débits précédant la crue ne soient pas clairement surestimés. Cela peut s'expliquer de la même façon que pour le modèle PDM. Pour atteindre l'optimum de la fonction objectifs, le modèle va tenter de corriger l'erreur commise sur ce pic en la répartissant sur toute la période. Il a donc été décidé d'arrêter la période de validation au 31 décembre 2010 afin de vérifier la qualité du reste de la simulation.

Les coefficients de Nash avec et sans cette crue sont présentés au Tableau 10. La non-prise en compte des débits de l'année 2011 fait grimper les critères de Nash de façon importante. En effet, la qualité de la simulation passe de moyenne et faible (respectivement pour toute la période et pour les pics) à bonne. Ceci confirme le fait que la crue de janvier 2011 détériore la qualité de la validation.

Il est toutefois raisonnable de s'attendre à de nouveaux écarts vers la fin de l'hiver si le modèle est utilisé pour d'autres simulations. En effet, les crues dues à la fonte des neiges ne sont pas exceptionnelles.

TABLEAU 10 : COMPARAISON DES COEFFICIENT DE NASH DE LA VALIDATION 2009-2010

	Nash	Nash pics
Avec la crue de janvier 2011	0.65	0.49
Sans la crue de janvier 2011	0.89	0.87

La Figure 39 confirme l'idée que le modèle est de bonne qualité lorsque l'année 2011 n'est pas prise en compte. Nous pouvons également constater de manière plus claire sa tendance à sous-estimer légèrement les débits au-delà de 4 m³/s. La dispersion des points est relativement faible, ce qui indique une bonne stabilité dans la réponse du modèle.

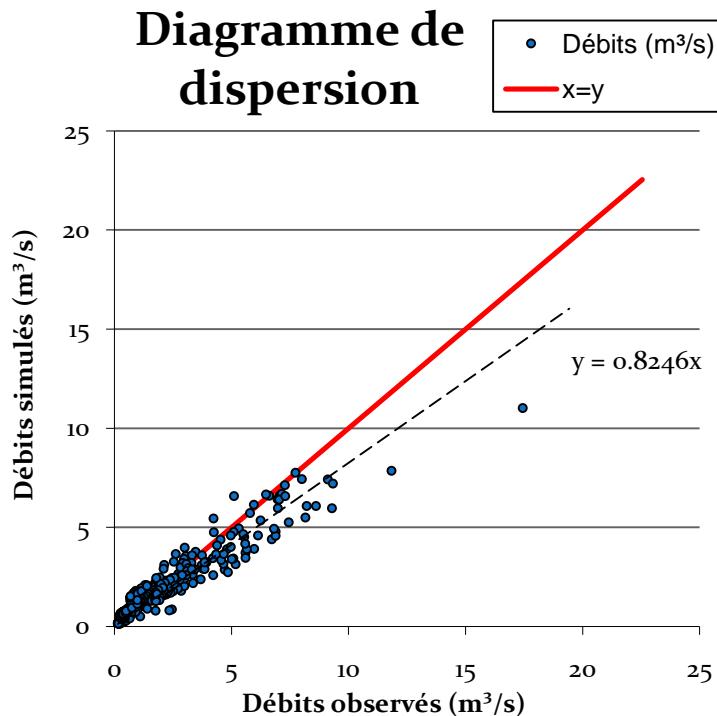


FIGURE 39 : COMPARAISON DES DÉBITS OBSERVÉS ET SIMULÉS PAR GR4J.

VALIDATION 2009 - 2010 SUR LA HOUILLE À FELENNE

5.3. COMPARAISON DE PDM ET GR4J

Les deux modèles présentent des avantages similaires, ils sont simples à utiliser et leur calibration peut être automatique. Cependant, cette automatisation peut conduire au choix d'un set de paramètres qui ne n'est pas optimal. PDM a également l'avantage de ne pas nécessiter beaucoup de types de données mais plutôt de longues séries. Le modèle GR4J, quant à lui, nécessite un peu plus de données mais des séries plus courtes.

Les tableaux 11 et 12 comparent les coefficients de Nash de calibration et de validation de PDM et GR4J. Il en ressort que le second modèle obtient systématiquement de meilleurs résultats bien qu'ils restent un peu faibles. L'analyse des séries chronologiques (Figure 22, 24, 30 et 32) confirme cette supériorité, que ce soit du point de vue de la date d'occurrence des pics de crue, de leur amplitude ou encore de la dynamique de récession. En dehors des périodes de dégel, dont il faut se méfier, GR4J donne une bonne qualité de simulation contre une faible à moyenne qualité pour PDM.

Néanmoins, bien que l'application GR4J soit simple d'utilisation, elle demande la connaissance de l'évapotranspiration, des données nécessaires à son calcul ou une courbe moyenne interannuelle. Ainsi pour les régions très éloignées de toute station météorologique, le modèle PDM sera préférable. La Belgique étant relativement bien desservie, ce souci ne se pose pas dans notre cas.

DISCUSSION

De plus, le modèle PDM étant une boite noire, son fonctionnement est moins facile à comprendre que celui de GR4J qui est un modèle dont les formules sont semi-empiriques. GR4J offre donc une meilleure possibilité à l'utilisateur de vérifier le mécanisme interne du modèle et de connaître ses hypothèses simplificatrices. Ceci permet d'éviter une utilisation « presse-bouton » encouragée par le modèle PDM et dont il faut absolument se garder (Ambroise, 1999).

TABLEAU 11 : CRITÈRE DE NASH-SUTCLIFFE DE LA CALIBRATION ET DE LA VALIDATION DES DEUX MODÈLES

Modèle	Période calibration	Période validation	Calibration	Validation
PDM	1/10/2006 – 30/9/2009	1/10/2009 – 30/4/2011	0.65	0.52
GR4J	1/10/2006 – 30/9/2009	1/10/2009 – 30/4/2011 1/10/2009 – 30/12/2010	0.81	0.65 0.89

TABLEAU 12 : CRITÈRE DE NASH-SUTCLIFFE DES PICS DE CRUES DE LA CALIBRATION ET DE LA VALIDATION DES DEUX MODÈLES

Modèle	Période calibration	Période validation	Calibration	Validation
PDM	1/10/2006 – 30/9/2009	1/10/2009 – 30/4/2011	0.66	0.46
GR4J	1/10/2006 – 30/9/2009	1/10/2009 – 30/4/2011 1/10/2009 – 30/12/2010	0.81	0.49 0.87

5.4. TENEUR EN EAU

Comme dit précédemment, les mesures n'ont été effectuées que sur une période de deux mois. Ceci est trop court pour obtenir une représentation correcte des phénomènes étudiés. De plus, un certain temps est nécessaire après l'installation des capteurs afin qu'ils se mettent à l'équilibre et que le sol se remette en place. Il faut ajouter à cela qu'il n'y a eu aucune averse importante et que seuls quelques jours après la feuillaison font partie de la période de mesure. L'idéal aurait donc été de travailler sur plusieurs années de mesures.

A partir de la feuillaison, l'allure des courbes de teneur en eau du chêne et de l'épicéa deviennent semblables. Ceci peut être dû au fait que le couvert provoque le même effet sur les deux sites. Il aurait été intéressant d'observer l'évolution des courbes plus loin dans la saison pour comparer le comportement des deux essences sur la période de végétation.

La petite chute brutale d'humidité dans la couche du milieu, aux environs du 12 avril 2011, est sans doute due à une remise en place du sol qui aurait été aidée par les précipitations du jour.

Le fait que la teneur en eau sous la chênaie ne diminue pas avant la feuillaison est dû au fait qu'à ce stade le chêne n'a pas besoin de beaucoup d'eau et évapotranspire très peu sans ses feuilles. Dès cette période passée, nous pouvons d'ailleurs constater une diminution de la teneur en eau dans le bas du profil, ce qui est dû à l'assèchement du sol qui se fait sentir de plus en plus bas.

Le fait que la précipitation la plus importante de la période de mesure ne provoque pas une grande augmentation de la teneur en eau de la couche supérieure est plus interpellant dans le cas de la pessière. En effet, dans la chênaie, cela aurait pu passer pour l'effet de la feuillaison. Ce faible impact peut avoir deux origines ; soit le sous-bois qui permet une interception encore plus importante que lorsque les épiceas sont seuls, soit l'assèchement du sol en surface qui provoque une diminution de la perméabilité de la couche humifère.

5.5. COMPARAISON D'EPIC ET DES MESURES DE TENEUR EN EAU

Pour réaliser cette comparaison, seules les teneurs en eau modélisées par EPIC des couches contenant un capteur sont utilisées. Les mesures sur terrain ont été modifiées en moyennes journalières pour permettre une comparaison correcte.

Il est important de signaler que les deux mois de mesure ne sont pas suffisants pour ajuster correctement le modèle EPIC, plusieurs années auraient été nécessaires à ce travail. Ces deux mois de mesure visent simplement à initier une réflexion sur le comportement hydrologique du chêne et de l'épicéa.

Dans un premier temps, la teneur en eau des deux couches inférieures de la pessière est simulée de manière correcte. Ensuite, le modèle tend à sous estimer l'humidité du sol. Ce décrochage a lieu aux environs du 23 mai et du 6 avril 2011 respectivement pour la couche du milieu et la couche du bas du profil. La teneur en eau de la couche supérieure diminue de manière trop importante les jours secs. Ainsi, le modèle prédit un prélèvement d'environ 1.95 mm/jour, alors que nos mesures indiquent une valeur deux fois moins élevée (0.81 mm/jour).

Au vu des résultats, nous avons tenté de déterminer quel paramètre pouvait influencer à ce point l'humidité du sol simulée. Seule la teneur en eau au point de flétrissement modifie légèrement la courbe car cela génère un stress limitant le prélèvement. Les résultats obtenus sont présentés à la Figure 40. Nous pouvons constater que l'humidité de la première couche descend jusqu'à la teneur en eau au point de flétrissement. Nous pouvons en conclure que la chute importante du taux d'humidité est due au prélèvement simulé des épiceas. Celui-ci est visible de manière moins importante dans les couches inférieures. Le modèle, utilisé avec les paramètres par défaut de SWAT, surestime vraisemblablement la consommation d'eau par les arbres.

Pour le site de la chênaie, les mesures à 16 centimètres et la simulation de la première couche par EPIC sont semblables jusqu'au 22 avril 2011, ce qui correspond à la feuillaison. A partir de cette date, la teneur en eau simulée chute de manière importante, alors que les mesures n'indiquent qu'une faible diminution. A nouveau, la cause du problème semble être le prélèvement d'eau par la végétation qui est beaucoup trop important. En effet, les observations donnent un prélèvement moyen avant feuillaison de 0.18 mm/jour alors que le modèle l'estime au triple (0.54 mm/jour). La comparaison après feuillaison aurait été intéressante mais la période de mesure disponible ne la permet pas.

DISCUSSION

Pour la période avant feuillaison, les deux couches inférieures ne présentent pas une aussi bonne correspondance entre mesures et simulations. En effet, ces dernières restent stables dans le temps alors que les mesures indiquent une augmentation légère mais progressive. Le prélèvement, bien visible dans la simulation, n'est indiqué que par une très légère diminution des teneurs en eau mesurées.

De manière générale, les paramètres de la couverture forestière introduits dans le modèle EPIC permettent des simulations bonnes à très bonnes de l'évolution de la teneur en eau lorsqu'aucun prélèvement par des végétaux n'a lieu. Mais dès qu'il tente de prédire la quantité d'eau captée par les plantes, le modèle a tendance à la surestimer, faussant ainsi les résultats. Ces paramètres sont donc certainement améliorables afin d'obtenir des résultats tels que ceux atteints pour les cultures agricoles (Wang X.C. *et al.*, 2011).

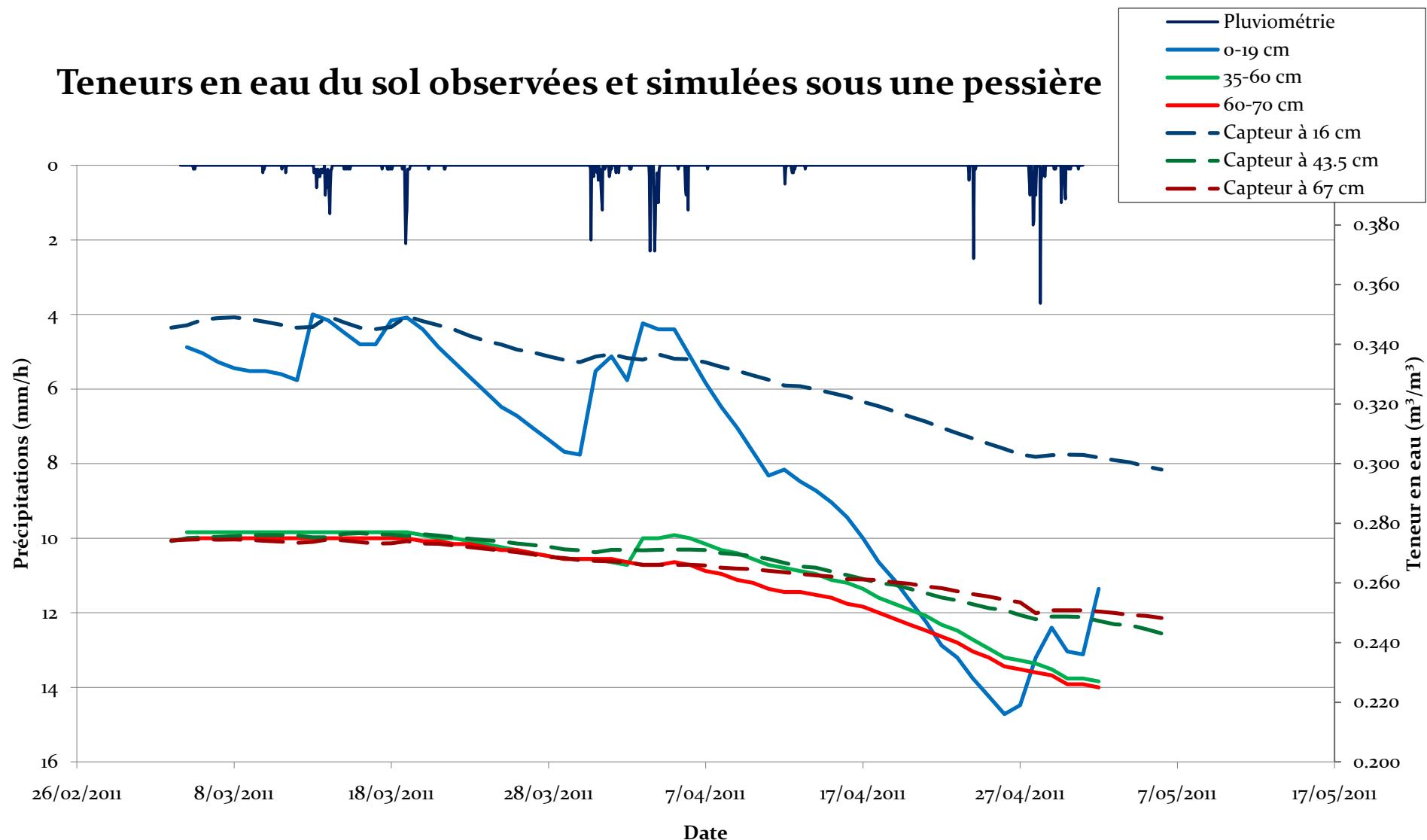


FIGURE 40 : EVOLUTION DES TENEURS EN EAU DU SOL OBSERVÉES ET SIMULÉES PAR EPIC SOUS LA PESSIÈRE

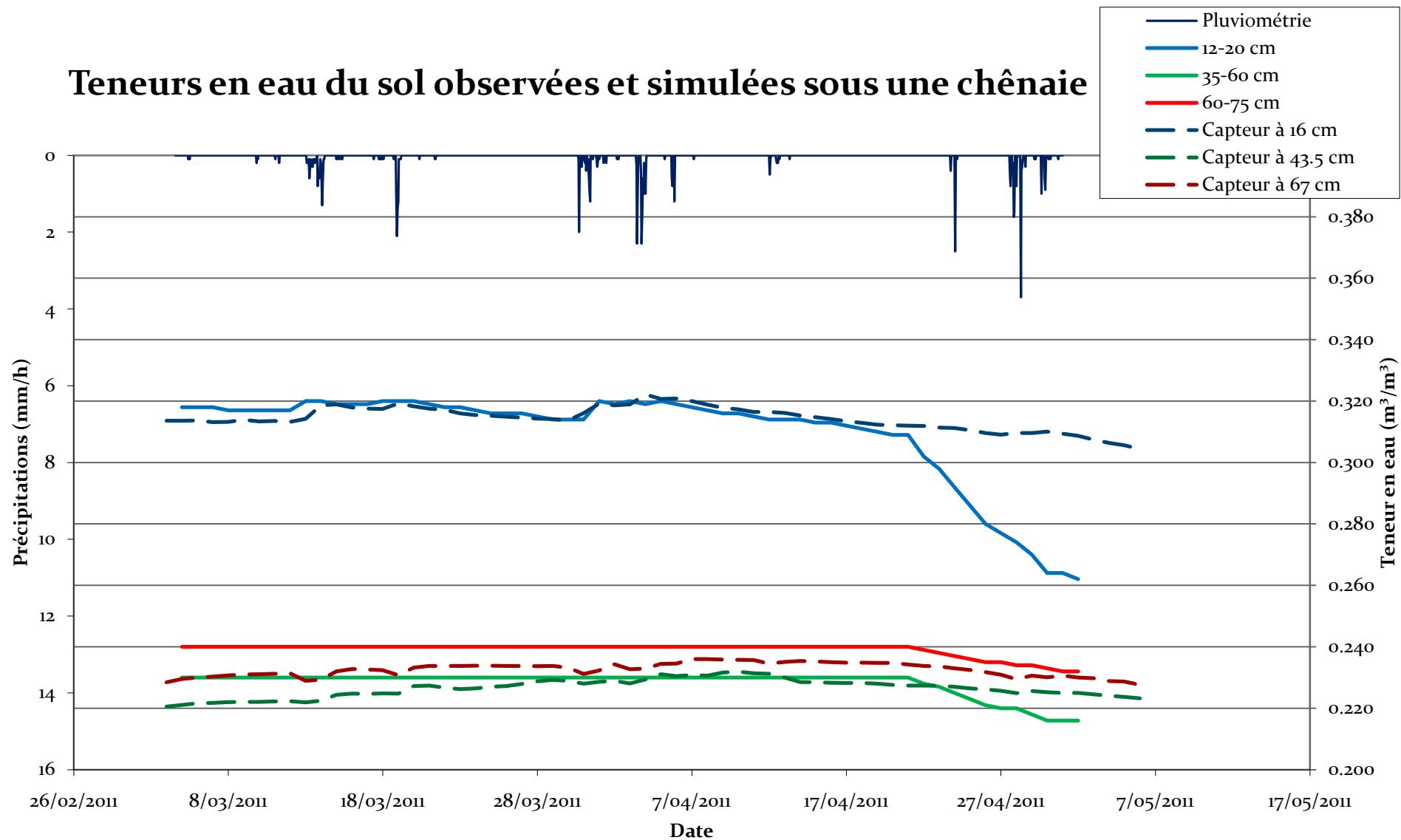


FIGURE 41 : EVOLUTION DES TENEURS EN EAU DU SOL OBSERVÉES ET SIMULÉES PAR EPIC SOUS LA CHÊNAIE

6. CONCLUSION

L'objectif principal de ce travail était de comparer différentes démarches de modélisation hydrologique sur le bassin versant de la Houille et de réaliser une première paramétrisation du modèle conceptuel à base physique (EPIC) sur le bassin qui possède une couverture forestière importante. Ce travail visait également à réaliser une première approche des différents paramètres existants dans la littérature pour le modèle conceptuel à base physique.

Après une explication du fonctionnement des modèles globaux PDM et GR4J, les fonctions objectifs nécessaires à la calibration et la validation ont été établies. Elles ont été créées selon le principe du rasoir d'Ockham de manière à vérifier la qualité globale de la simulation en premier lieu et de continuer vers le plus spécifique ensuite.

Il est ressorti de la calibration et de la validation des modèles PDM et GR4J des résultats peu convaincants. En effet, le modèle PDM nous a donné une simulation médiocre sur toute la période, aussi bien avec des données journalières qu'avec des données horaires. Dans le cas de GR4J, le problème était essentiellement localisé au niveau des crues d'hiver. Les résultats peu convaincants des modèles globaux incitent à utiliser un modèle à base physique dès que possible. En effet, la littérature affirme qu'avec une bonne paramétrisation ceux-ci arrivent à fournir de très bonnes simulations.

Des mesures d'humidité ont été réalisées sur deux sites ; un sous une pessière et l'autre sous une chênaie. Les capteurs ont été placés à trois profondeurs différentes sur des sols semblables. Les couches des deux profils étaient relativement différentes, une calibration a été faite pour chacun des six capteurs installés. Cette calibration a été réalisée en laboratoire avec un capteur supplémentaire. Nous avons ainsi constaté que les courbes de calibration étaient légèrement différentes.

Pour l'utilisation du modèle conceptuel à base physique EPIC, les paramètres du modèle liés à la végétation en place ont été fixés aux valeurs proposées pour le modèle SWAT sans aucun ajustement. Lors de ces simulations, les teneurs en eau caractéristiques ont du être ajustées aux mesures afin de leur correspondre.

La comparaison du modèle conceptuel à base physique et des mesures a mis en évidence que le prélèvement d'eau par les arbres était fortement surestimé. Nous en avons donc conclu que les paramètres de végétation utilisés nécessitaient d'être ajustés.

Ce travail souligne l'importance de ne surtout pas utiliser un modèle comme un simple « presse bouton » et de comprendre son fonctionnement interne afin de pouvoir situer les sources d'éventuelles erreurs de simulation. Dans le cas des modèles PDM et GR4J, cela permet d'expliquer la raison de l'erreur, tandis que pour le modèle EPIC, cela permet une calibration intelligente des paramètres introduits dans le modèle. Comme nous avons pu le constater, ceux-ci conditionnent fortement la qualité de la simulation, il faut donc veiller à ce que leur mesure ou estimation soit correcte.

7. PERSPECTIVES

Ce travail porte sur la représentation d'un bassin versant forestier par différents types de modèles hydrologiques. Mais seuls trois modèles ont été utilisés (PDM, GR4J et EPIC avec les paramètres de végétation de SWAT), il pourrait être intéressant d'étudier d'autres modèles. Cela permettrait peut être de mettre en évidence qu'un type de modèle donne de meilleurs résultats pour le bassin étudié. De plus, les conclusions émises sur le modèle PDM et GR4J sont vraies pour le bassin versant de la Houille. Mais, ce dernier est particulier : il s'agit d'un bassin versant à dominance forestière et à pente moyenne relativement forte. Le même travail pourrait être réalisé sur d'autres bassins versants afin de comparer les résultats et pour confirmer ces conclusions.

Il ressort de ce travail que le modèle GR4J donne de bons résultats à partir de très peu de données excepté pour les crues de dégel. En effet, le fonctionnement interne du modèle ne permet pas la simulation de tels évènements. Les précipitations neigeuses étant courantes chez nous, il pourrait être tenté d'introduire dans le modèle une fonction qui prendrait en compte la température afin de déterminer la forme de précipitation. Ceci afin d'essayer de prendre en compte la dynamique de dégel. Et si cela ne donne pas de résultats probants, la température pourrait tout simplement servir à préciser à l'utilisateur les périodes de la simulation dont il devrait se méfier car il y a un risque de crue du à la fonte de la neige.

Outre ces deux aspects, ce mémoire soulève la question de la représentation du prélèvement d'eau par les ligneux. C'est un point qui demande une attention toute particulière au vu des résultats obtenus. Les paramètres par défaut du modèle SWAT qui ont été utilisés dans cette première application nécessitent visiblement un ajustement qui ne pourra se baser que sur une longue période d'observation des profils d'humidité. D'autant plus que lorsque la simulation doit servir à décrire un bassin versant et sa réponse aux précipitations, si les prélèvements sont mal estimés, c'est tout le bilan hydrologique qui est faussé.

Dans un premier temps, il faudrait réaliser une caractérisation complète et correcte du profil de sol des stations de mesure. C'est-à-dire une détermination des épaisseurs, profondeurs, compositions, teneurs en eau aux différents points caractéristiques, vitesses d'infiltration,... de chaque couche du profil.

Dans un second temps, il pourrait être intéressant de tenter de déterminer les relations qui peuvent exister entre les particularités du sol et la distribution racinaire du chêne et de l'épicéa. Enfin, l'ajustement des paramètres de prélèvement devrait être réalisé dans des stations monitorées.

Bien entendu, les mesures sur le terrain ont tout intérêt à être prolongées au maximum afin d'avoir une période de comparaison la plus longue possible. En effet, les mesures effectuées jusqu'à ce jour ne comptent que deux mois, ce qui est peu représentatif de la dynamique de prélèvement annuelle. De plus, d'une année à l'autre les conditions climatiques sont variables, il serait donc judicieux de prolonger les mesures sur plusieurs années pour couvrir la plage de mesures et de conditions la plus large possible.

PERSPECTIVES

Afin de valider les mesures sur le terrain et d'être certain que le bassin versant est bien représenté, il faudrait installer d'autres sites de mesure qui devraient, eux aussi, passer par une caractérisation de leur profil. Par la suite, l'étude pourrait même être poussée à d'autres types de sols.

Pour finir, une fois le modèle conceptuel à base physique paramétré par rapport aux prélevements, il pourrait être spatialisé et appliqué à l'entièreté du bassin versant. Il serait alors possible de comparer ces résultats avec ceux des autres modèles étudiés.

Ce mémoire a permis d'entrevoir des pistes d'amélioration de la compréhension du système sol-végétation dans le contexte forestier. Il s'est volontairement limité à l'étude de deux sites de plateau mais laisse augurer de l'intérêt d'une approche hydropédologique toposéquentielle.

Ce programme dépasse le cadre du présent mémoire qui avait pour objectif de comparer des démarches de modélisation contrastées sur le bassin de la Houille.

8. BIBLIOGRAPHIE

- Adebnege B. *et al.*, 1989. Modélisation hydrologique orientée objet. *IAHS Red Book Series*, **181**, 387-395.
- Ambroise B., 1999. Genèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré : 2. Modélisation systématique et dynamique. *Rev. Sci. Eau*, **12**(1), 123-153.
- Aristote, traduit par Barthélemy Saint-Hilaire, 1863. *Météorologie d'Aristote*. Librairie philosophique de Ladrange. Paris. 468 pp.
- Avril P., 1975. Carte des sols de la Belgique : Texte explicatif de la planchette de Willerzie 201W. Comité pour l'Etablissement de la Carte des Sols et de la Végétation de la Belgique. Gand. 101 pp.
- Avril P., 1975. Carte des sols de la Belgique : Texte explicatif de la planchette de Gedinne 201E. Comité pour l'Etablissement de la Carte des Sols et de la Végétation de la Belgique. Gand. 117 pp.
- Baix P. *et al.*, 1991. *Le fichier écologique des essences 2. Définition de l'aptitude des stations forestières*. Ministère de la Région Wallonne. Namur. 190 pp.
- Bary-Lenger A., 1993. *Le chêne : Les chênes pédonculé et sessile en France et en Belgique : Ecologie, économie, histoire, sylviculture*. Editions du Perron. 604 pp.
- Beckers E. *et al.*, 2011. Revue bibliographique : la prise en compte des transferts horizontaux dans les modèles hydrologiques. *Biotechnl. Agron. Soc. Environ.*, **15**(1), 143-151.
- Beven K. *et al.*, 2001. L'unicité de lieu, d'action et de temps. *Rev. Sci. Eau*, **14**(4), 525-533.
- Bolstad P. *et al.*, 1990. Estimation of leaf area index in fourteen southern Wisconsin forest stands using a portable radiometer. *Tree Physiol.*, **7**, 115-124.
- Breda N. *et al.*, 1995. Soil water dynamics in an oak stand : I. Soil moisture, water potentials and water uptake by roots. *Plant Soil*, **172**, 17-27.
- Cabus P., 2008. River flow prediction through rainfall-runoff modeling with a probability-distributed model (PDM) in Flanders, Belgium. *Agric. Water Manage.*, **95**(7), 859-868.
- Cobos D.R., 2008. *10HS Volume of sensitivity. Application note*. Decagon devices. Pullman. 2 pp.
- Cobos D.R. *et al.*, 2010. *Calibrating ECH₂O soil moisture sensor, Application note*. Decagon devices. Pullman. 7 pp.
- Contrat de rivière de la Haute Meuse, 2008. *Bulletin Trimestriel d'information n° 53*. Raeymaekers H. Namur. 8 pp.
- Courivaud J.R., 2002. Mesures in situ en hydraulique à surface libre. *Techniques de l'ingénieur, traité Mesures et Contrôles*, R2330. 16 pp.
- Cunge J.A., 1995. Modèles mathématiques en hydraulique et en hydrologie. *Techniques de l'ingénieur, traité Construction*, C180. 18 pp.

BIBLIOGRAPHIE

- Curd, 2007. *Anaxagoras of Clazomenae, Fragments and Testimonia*. University of Toronto Press. Toronto. 289 pp.
- Dassargues A., 1990. Modèles mathématiques en hydrogéologie et paramétrisation. *Ann. Soc. géol. Belg.*, **113**(2), 217-229.
- de Marsily G., 1994. Quelques réflexions sur l'utilisation des modèles en hydrologie. *Rev. Sci. Eau*, **7**, 219-234.
- de Parcevaux S. et al., 2007. *Bioclimatologie : concepts et applications*. Editions Quae. Paris. 324 pp.
- De Ridder P., 1985. *Contribution à la mesure de la teneur en humidité des sols par la méthode de la réflectométrie temporelle*. Mémoire, Faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux Gembloux, 69 pp.
- Decagon device inc., 2008. *10HS Soil Moisture Sensor. Operator's Manual*. Version 3. Decagon Devices. Pullman. 24 pp.
- Degré A., 2008. Statistiques des extrêmes dans les bassins faiblement jaugés : application d'un modèle global pluie-débit à cinq bassins versants en Région wallonne (Belgique). *Biotechnl. Agron. Soc. Environ.*, **12**(4), 379-391.
- Edijatno et al., 1999. GR3J : a daily watershed model with three parameters. *Hydrol. Sci. J.*, **44**(2), 263-277.
- French A.N. et al., 1999. Estimating surface fluxes over the SGP site with remotely sensed data. *Phys. Chem. Earth*, **25**(2), 167-172.
- Ganoulis J., 1996. Modeling hydrologic phenomena. *Rev. Sci. Eau*, **4**, 421-434.
- Garfias et al., 1996. Choix d'un modèle pluie-ruissellement pour les conditions hydrologiques complexes. *J. Hydrol.*, **176**, 227-247.
- Gnouma R., 2006. *Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques : application au bassin versant de l'Yzeron*. Thèse de doctorat. Institut national des sciences appliquées de Lyon, Lyon, 412 pp.
- Graff B. et al., 2005. Analyse directe des crues en vue d'une meilleure compréhension de la réponse hydrologique des petits bassins versants torrentiels. *Etudes de Géographie Physique*, **32**, 27-46.
- Grayson et al., 2000. *Spatial patterns in catchment hydrology : observations and modelling*. Cambridge university press. Cambridge. 404 p.
- Haan C.T. et al., 1982. *Hydrologic modeling of small watersheds*. Collection ASAE Monograph 5. American society of agricultural engineers. St Joseph. 533 pp.
- Harlan D. et al., 2010. Rainfall-runoff modeling of Citarum Hulu river basin by using GR4J. *Proceedings of the World Congress on Engineering 2010*, vol 2. WCE. London.
- Hartmann P. et al., 2011. Identification of soil properties affecting fine root distributions in forest soils. *Geophys. Res. Abstr.*, **13**, EGU2011-11652-1.

BIBLIOGRAPHIE

- Hingray B. *et al.*, 2009. *Hydrologie : 2. Une science pour l'ingénieur*. Collection Science et Ingénierie de l'environnement. Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne. 602 pp.
- Hundecha Y. *et al.*, 2001. Development of a fuzzy logic-based rainfall-runoff model. *Hydrol. Sci. J.* **46**(3), 363-376.
- Kauark-Leite L.A., 1990. *Réflexions sur l'utilité des modèles mathématiques dans la gestion de la pollution diffuse d'origine agricole*. Thèse de doctorat. Ecole nationale des ponts et chaussées, Paris, 342 pp.
- Kostner B. *et al.*, 1998. Estimating tree canopy water use via xylem sapflow in an old Norway spruce forest and a comparison with simulation-based canopy transpiration estimates. *Ann. For. Sci.*, **55**, 125-139.
- L'Hote Y., 1990. Historique du concept de cycle de l'eau et des premières mesures hydrologiques en Europe. *Hydrol. Continent.*, **5**(1), 13-27.
- Le Coz J. *et al.*, 2007. Emplois de l'aDcp en rivière : une revue de synthèse. *La Houille Blanche*, **4**, 119-130.
- Legates D.R. *et al.*, 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water resour. res.*, **35**(1), 233-241.
- Leroy M. *et al.*, 2005. Mesures en météorologie. *Techniques de l'ingénieur*. R 305ov2. 24 p.
- Levy G., 1968. Importance des propriétés du sol pour l'enracinement de *Picea excelsa* et de *Pinus silvestris*. *Ann. For. Sci.*, **25**(3), 157-188.
- Maglione M. *et al.*, 2010. Matériaux diélectriques. *Techniques de l'ingénieur*. K 722. 14 p.
- Massart J., 1910. *Esquisse de la géographie botanique de la Belgique*. Lamertin. Bruxelles. 332 pp.
- Mittelbach H. *et al.*, 2011. Evaluation of the capacitance-based low cost soil moisture sensor Decagon 10HS : Implications for soil moisture monitoring and related hydrological applications. *Geophys. Res. Abstr.*, **12**, EGU2010-8501.
- Mittelbach H., *et al.*, 2011. Soil moisture monitoring for climate research : Evaluation of a low-cost sensor in the framework of the Swiss Soil Moisture Experiment (SwissSMEX) campaign. *J. geophys. res. atmos.*, **116**, D05111.
- Moore R.J., 2007. The PDM rainfall-runoff model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, **11**(1), 483-499.
- Musy A. *et al.*, 1991. *Physique du sol*. Collection Gérer l'environnement. Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausane. 335 pp.
- Musy *et al.*, 2004. *Hydrologie : 1. Une science de la nature*. Collection Science et Ingénierie de l'environnement. Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne. 314 pp.
- Neitsch S. L. *et al.*, 2004. *Soil and water assessment tool input/output file documentation*. Version 2005. Temple. Texas. 530 pp.

BIBLIOGRAPHIE

- Neitsch S. L. *et al.*, 2005. *Soil and water assessment tool theoretical documentation*. Version 2005. Temple. Texas. 476 pp.
- Oltchev A. *et al.*, 1997. Application of a six-layer SVAT model for simulation of evapotranspiration and water uptake in a spruce forest. *Phys. Chem. Earth*, **21**(3), 195-199.
- Oren R. *et al.*, 1988. Performance of two *Picea abies* (L.) Karst. Stands at different stages of decline: I. Carbon relations and stand growth. *Oecologia*, **75**, 25-37.
- Organisation internationale de normalisation, 2007. *ISO 748 : Hydrométrie - Mesurage du débit des liquides dans les canaux découverts au moyen de moulinets ou de flotteurs*, Edition 4. 47 pp.
- Payraudeau S., 2002. *Modélisation distribuée des flux d'azote sur des petits bassins versants méditerranéens*. Thèse de doctorat. Ecole nationale du génie rural, des eaux et forêts, Montpellier, 436 pp.
- Pereira dos Santos L.A., 1997. *Développement d'une nouvelle méthode de détermination des profils de teneur en eau dans les sols par inversion d'un signal TDR*. Thèse de doctorat. Université Joseph Fourier-Grenoble I, Grenoble, 144pp.
- Perrin C. *et al.*, 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *J. Hydrol.*, **279**, 275-289.
- Perrin C. *et al.*, 2007. *Modèles hydrologiques du Génie rural (GR)*. Cemagref. Paris. 16 pp.
- Perrin C., 2000. *Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative*. Thèse de doctorat. Institut national polytechnique de Grenoble, Grenoble, 287 pp.
- Poskin A., 1939. *Traité de sylviculture*. 2^{ème} édition. Paris, La maison rustique. 518 p.
- Refsgaard J.C., 1997. Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *J. Hydrol.*, **198**, 69-97.
- Sigonnez P., 2006. Choix d'un débitmètre. *Techniques de l'ingénieur*, R2200v2. 17 p.
- Singh V.P., 1995. *Computer models of watershed hydrology*. Water resources publications. Colorado. 1130 p.
- Sohier C., 1999. *Développement et application d'un modèle hydrologique maillé : Le modèle EPIC-GRID*. Mémoire. Faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux, Gembloux, 72 pp.
- Summer D.M. *et al.*, 2005. Utility of Penman-Monheit, Priesley-Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration. *J. Hydrol.*, **308**, 81-104.
- Tietje O. *et al.*, 1996. Accuracy of the saturated hydraulic conductivity prediction by pedo-transfer functions compared to the variability within FAO textural classes. *Geoderma*, **69**, 71-84.
- Topp G.C. *et al.*, 1980. Electromagnetic determination of soil water content : measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, **16**(3), 574-582.

BIBLIOGRAPHIE

Wang X.C., *et al.*, 2011. Validation of the EPIC model using a long-term experimental data on the semi-arid Loess Plateau of China. *Math. Comput. Modelling*, **54**, 976-986.

Withaker A. *et al.*, 2003. Application of the Distributed Hydrology Soil Vegetation Model to Redfish Creek, British Columbia : model evaluation using internal catchment data. *Hydrol. Process*, **17**, 199-224.

Zehe E. *et al.*, 2007. Towards a new generation of hydrological process models for the meso-scale : an introduction. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Special Issue.

Sites Internet

Cemagref. *GR : Modèles du génie rural*. <http://www.cemagref.fr/webgr/>. Dernière consultation : 21 mars 2011.

Center for Agricultural and Rural Development, Iowa State University. *CARD Interactive Software Programs*. http://www.card.iastate.edu/environment/interactive_programs.aspx. Dernière consultation : 25 avril 2011.

Digiteo, INRIA. *Scilab*. <http://www.scilab.org/>. Dernière consultation : 12 mars 2011.

Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement, Service public de Wallonie. *Aqualim*. <http://aqualim.environnement.wallonie.be/>. Dernière consultation : 19 mai 2011.

Thébé *et al.*, 1999. *Acquisition et constitution d'une information hydrologique de base*. Montpellier. Téléchargeable sur : Mediterranean Hydrological Cycle Observing System (Medhycos) : <http://medhycos.mpl.ird.fr/en/data/hyd/Drobot/>. Dernière consultation : 14 mars 2011

Williams J. R. *et al.*, 2006. *Epic users guide v.0509*. 64 pp. Téléchargeable sur : Iowa State University : ftp://is442787.card.iastate.edu/pub/i_epic/EPIC0509UserManual%206.pdf. Dernière consultation : 13 avril 2011

9. ANNEXES

9.1. VÉRIFICATION DE LA COHÉRENCE DES DONNÉES LIMNIMÉTRIQUES

Les fautes et les erreurs dans les données de débits horaires peuvent être mises en évidence par simple comparaison d'une série chronologique. Les données sont présentées de façon chronologique. La Figure 42 représente les débits horaires de 2001 pour les stations de Gedinne, Fellenne et Landrichamps. On peut constater que la dynamique des trois stations est similaire.

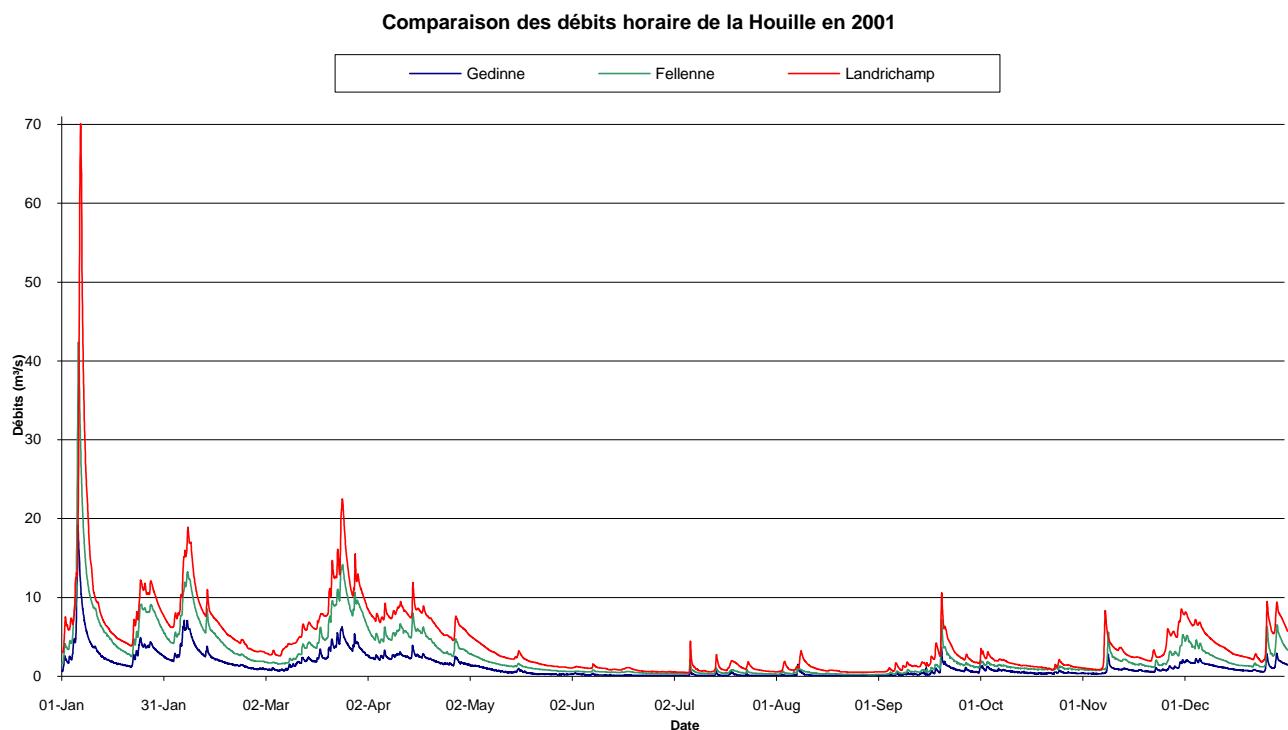


FIGURE 42 : GRAPHIQUE DE COMPARAISON DES DÉBITS DE LA HOUILLE EN 2001

Le calcul des lames d'eau écoulées consiste à faire la somme des écoulements mesurés à une station limnimétrique au cours d'une année. Cette quantité est ensuite rapportée à la superficie du bassin versant et exprimée en termes de hauteur annuelle de lame d'eau écoulée (en mm).

Le graphique suivant représente les lames d'eau annuelles écoulées sur le bassin versant de la Houille. Les années comprenant des lacunes dans les données ont été supprimées afin de ne garder que les années représentatives.

Nous pouvons constater que, mis à part quelques petits écarts entre les stations, les lames d'eau écoulées sont semblables. Ces différences entre stations sont plus marquées pour Gedinne, où les valeurs sont systématiquement supérieures aux autres. Ceci peut être expliqué simplement par le fait que la partie du bassin versant qui se trouve en amont de Gedinne est plus en altitude et reçoit en moyenne plus de précipitations que le reste du bassin.

Lames d'eau annuelles écoulées sur le bassin versant de la Houille

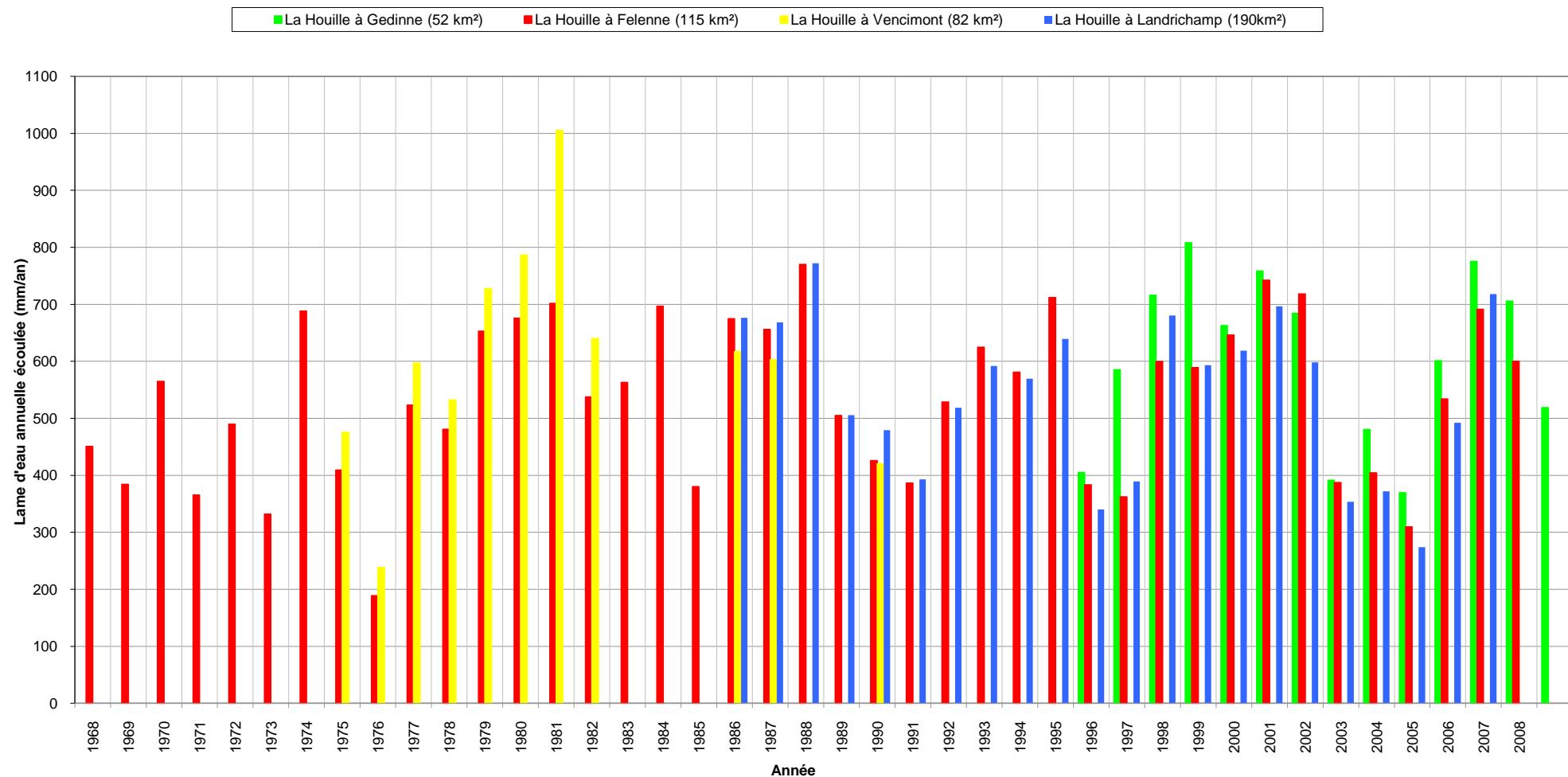


FIGURE 43 : GRAPHIQUE DES LAMES D'EAU ÉCOULÉES

ANNEXES

Lorsque les hauteurs d'eau précipitées et les lames d'eau écoulées sont comparées, il est possible de mettre en évidence qu'environ la moitié du volume d'eau est en fait évacuée du bassin versant par évapotranspiration. Ce rapport reste plus ou moins constant sur toute la période analysée.

Comparaison précipitations-lame d'eau (Gedinne)

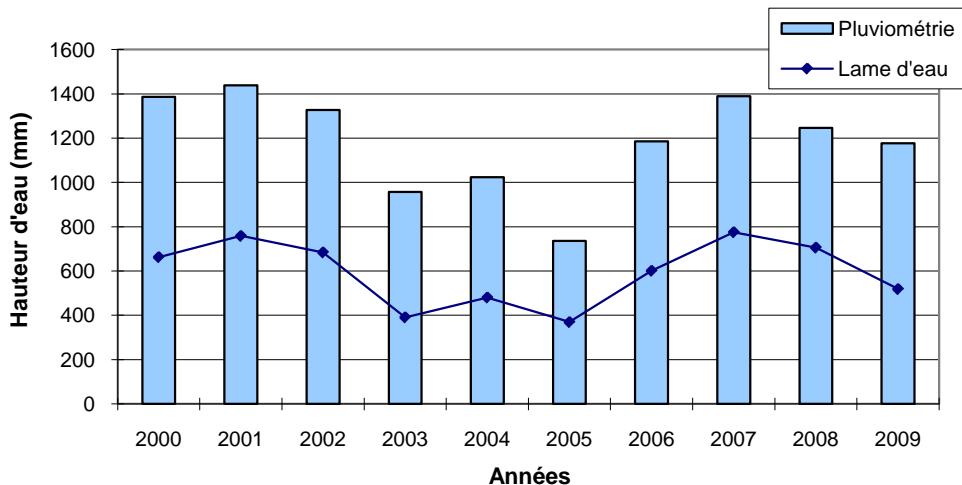


FIGURE 44 : GRAPHIQUE DE COMPARAISON DES PRÉCIPITATIONS ET DES LAMES D'EAU À GEDINNE

**La Houille à Fellenne (115 km²)
Courbe Débit-durée-Fréquence**

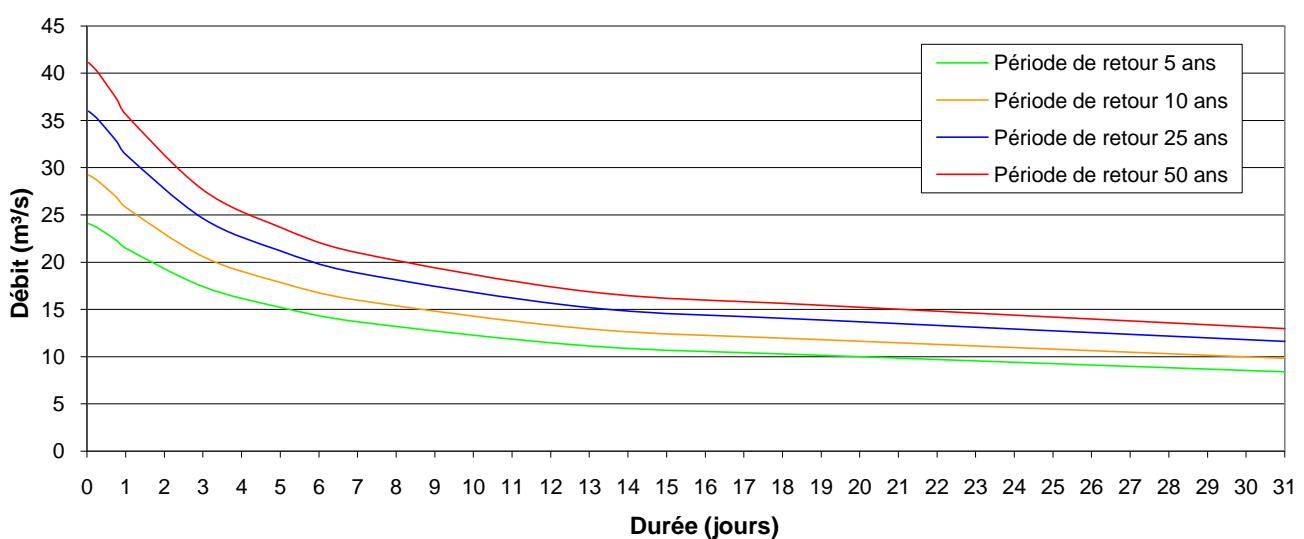


FIGURE 45 : COURBE DDF - DÉBIT-DURÉE-FRÉQUENCE

9.2. VÉRIFICATION DE LA COHÉRENCE DES DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

Les données de la station de Chooz ne seront pas utilisées en raison de ses valeurs invraisemblables. Il semblerait en effet que le pluviomètre se trouve recouvert par la végétation.

De manière générale, les différences entre stations restent plus ou moins stables d'une année à l'autre.

Le graphique des précipitations cumulées permet de comparer différentes stations entre elles et de repérer les caractéristiques pluviométriques de chaque année. On note ainsi que pour l'année hydrologique 2000-2001, la pluviométrie annuelle était très élevée ; plus de 1800mm. On remarque également les événements pluvieux importants de décembre 1999, février 2002 et de décembre 2002.

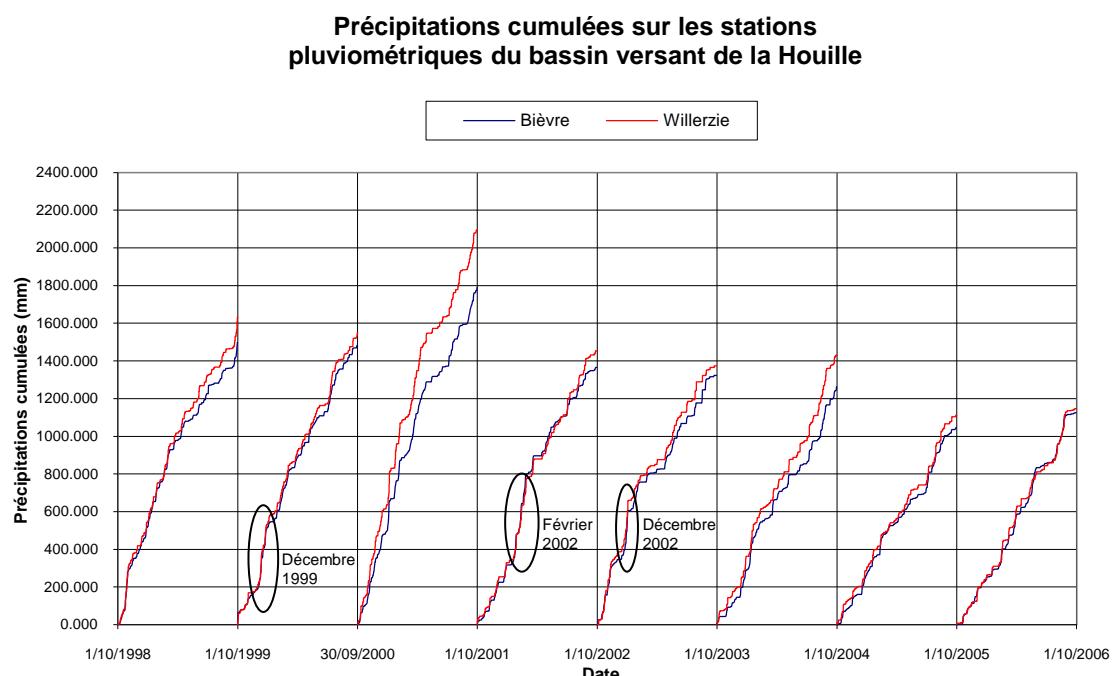


FIGURE 46 : GRAPHIQUE DES PRÉCIPITATIONS CUMULÉES

9.3. CALIBRATION DES CAPTEURS

TABLEAU 13 : DENSITÉ APPARENTE DES COUCHES DE SOL UTILISÉES POUR LA CALIBRATION

	Echantillon	Densité apparente (g/cm ³)	Densité apparente moyenne (g/cm ³)	% d'écart à la moyenne
Gedinne	A 16 cm	0,937	0,958	2,1
	B 16 cm	0,978		
	A 43,5 cm	1,326	1,265	4,8
	B 43,5 cm	1,204		
	A 67 cm	1,401	1,328	5,5
	B 67 cm	1,255		
Louette St Pierre	A 16 cm	0,912	0,952	4,2
	B 16 cm	0,991		
	A 43,5 cm	1,248	1,270	1,7
	B 43,5 cm	1,291		
	A 67 cm	1,748 ³⁰	1,304	-
	B 67 cm	1,304		

TABLEAU 14 : MESURES DE CALIBRATION

	Gedinne			Louette St Pierre		
	16 cm	43,5 cm	67 cm	16 cm	43,5 cm	67 cm
densité apparente	0,9575	1,265	1,328	0,9515	1,2695	1,304
masse de terre (g)	1675,625	2213,75	2324	1665,125	2221,625	2282
pesée 1 (g)	2027,3	2578,2	2629,3	2043,8	2524,2	2611,7
signal 1 (m³/m³)	0,105	0,086	0,097	0,137	0,091	0,103
signal 1 (raw)	844	818	833	890	825	841
pesée 2 (g)	2190,6	2676,8	2656,1	2185,8	2611,7	2672,1
signal 2 (m³/m³)	0,202	0,147	0,109	0,175	0,148	0,168
signal 2 (raw)	1002	906	849	953	907	941
pesée 3 (g)	2365,4	2734,9	2694,7	2350,8	2659,5	2749,6
signal 3 (m³/m³)	0,272	0,187	0,138	0,268	0,183	0,203
signal 3 (raw)	1155	975	892	1144	967	1006
pesée 4 (g)	2555,7	2809,4	2761,9	2500,2	2753,2	2847,8
signal 4 (m³/m³)	0,35	0,226	0,187	0,308	0,204	0,233
signal 4 (raw)	1308	1053	976	1230	1008	1067
pesée 5 (g)	2635,3		2815,8	2568,9	2871,2	2932,9
signal 5 (m³/m³)	0,417		0,199	0,341	0,26	0,265
signal 5 (raw)	1413		998	1293	1126	1137
pesée 6 (g)			2828,7		2927,3	
signal 6 (m³/m³)			0,22		0,297	
signal 6 (raw)			1040		1206	

³⁰ Cet anneau était traversé par un caillou, la densité apparente calculée pour celui-ci a donc été écartée.

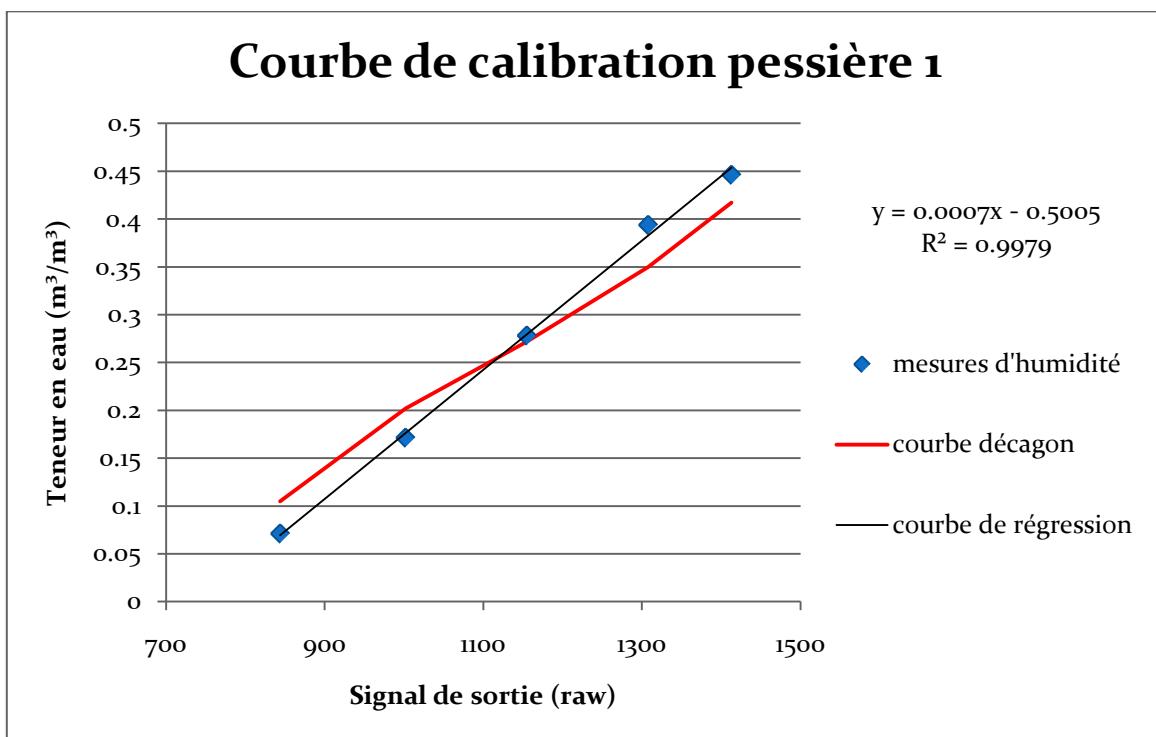


FIGURE 47 : COURBE DE CALIBRATION DU SOL DE LA PESSIÈRE À 16 CM DE PROFONDEUR

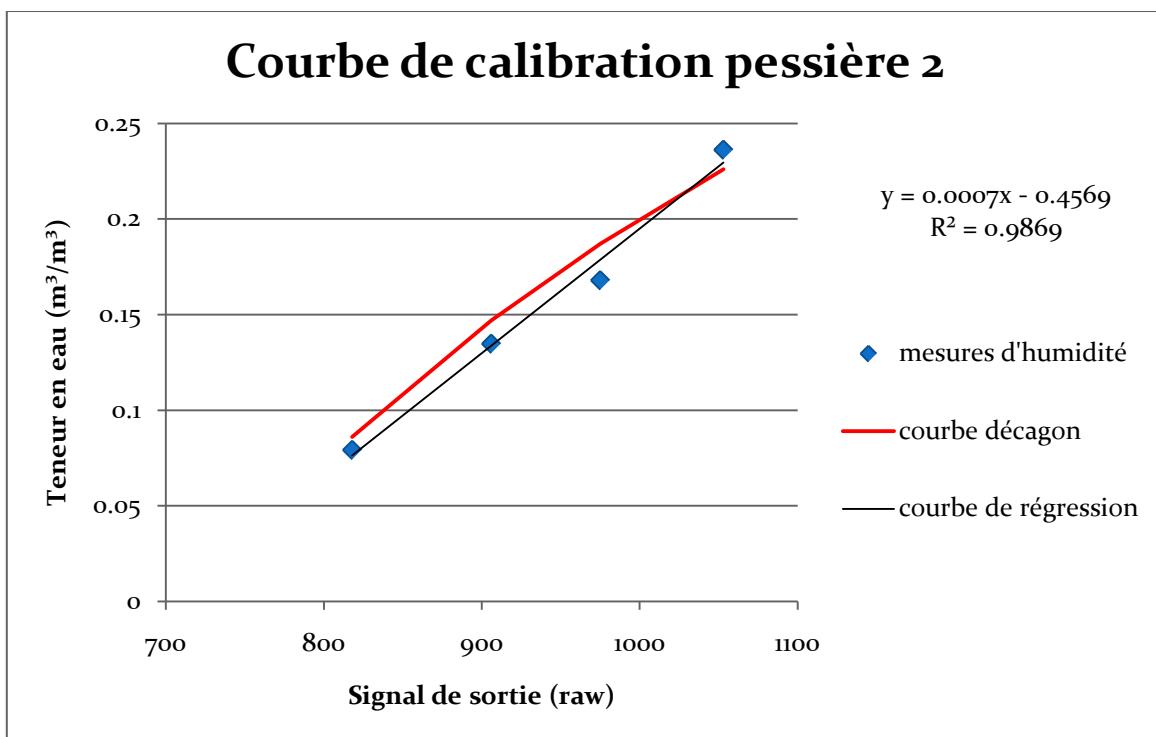


FIGURE 48 : COURBE DE CALIBRATION DU SOL DE LA PESSIÈRE À 43.5 CM DE PROFONDEUR

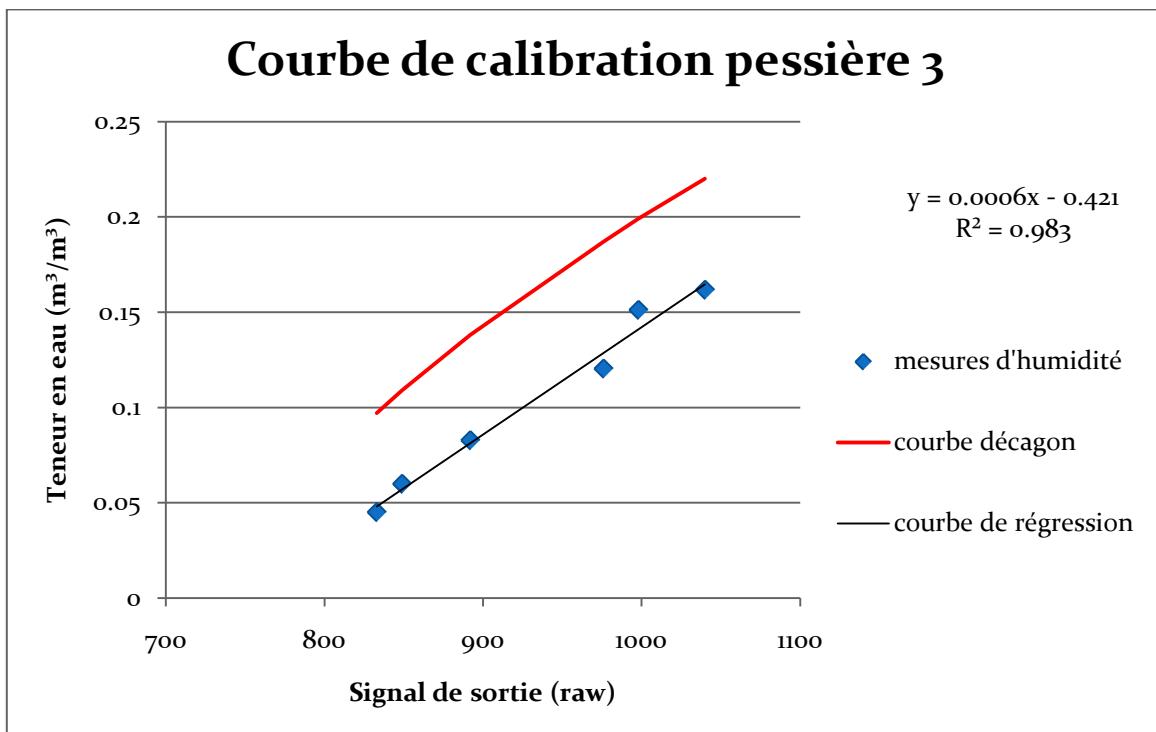


FIGURE 49 : COURBE DE CALIBRATION DU SOL DE LA PESSIÈRE À 67 CM DE PROFONDEUR

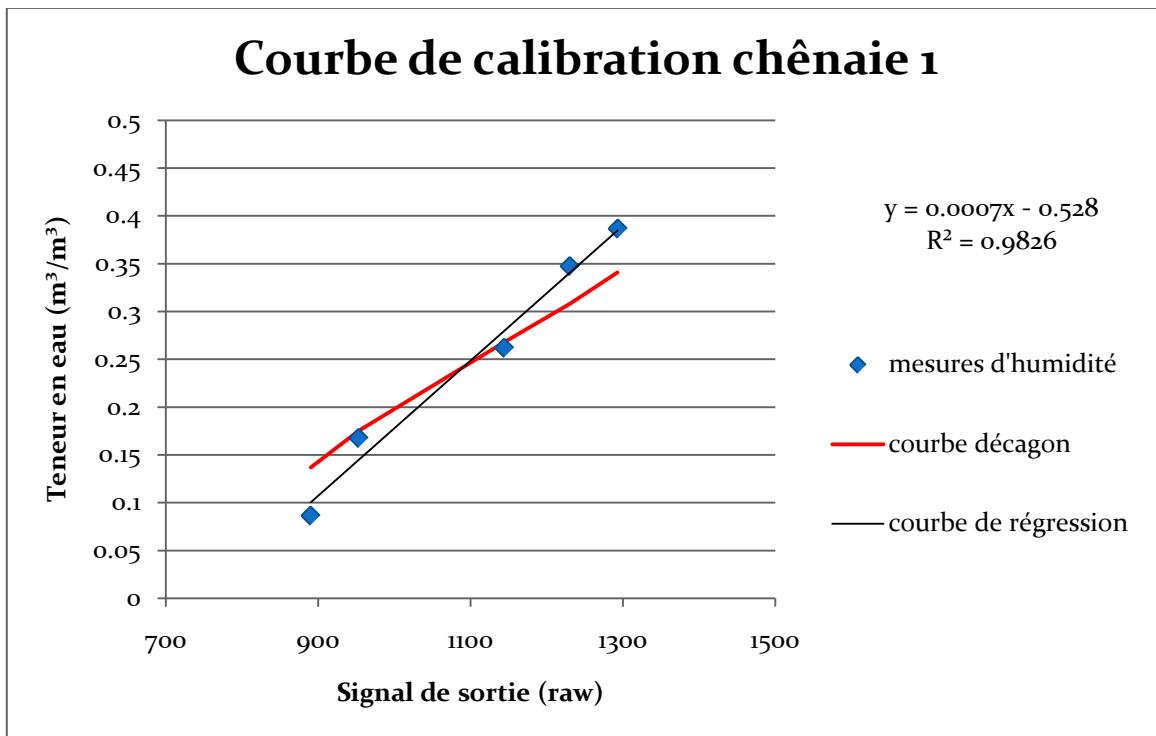


FIGURE 50 : COURBE DE CALIBRATION DU SOL DE LA CHÊNAIE À 16 CM DE PROFONDEUR

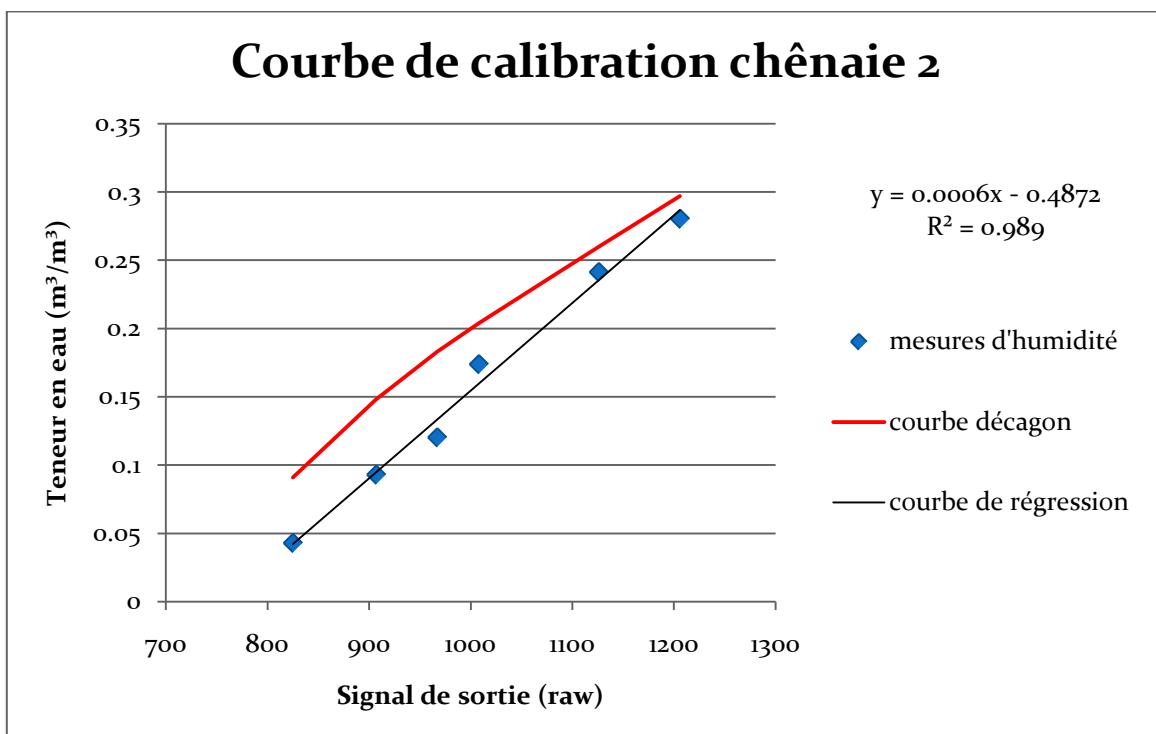


FIGURE 51 : COURBE DE CALIBRATION DU SOL DE LA CHÊNAIE À 43.5 CM DE PROFONDEUR

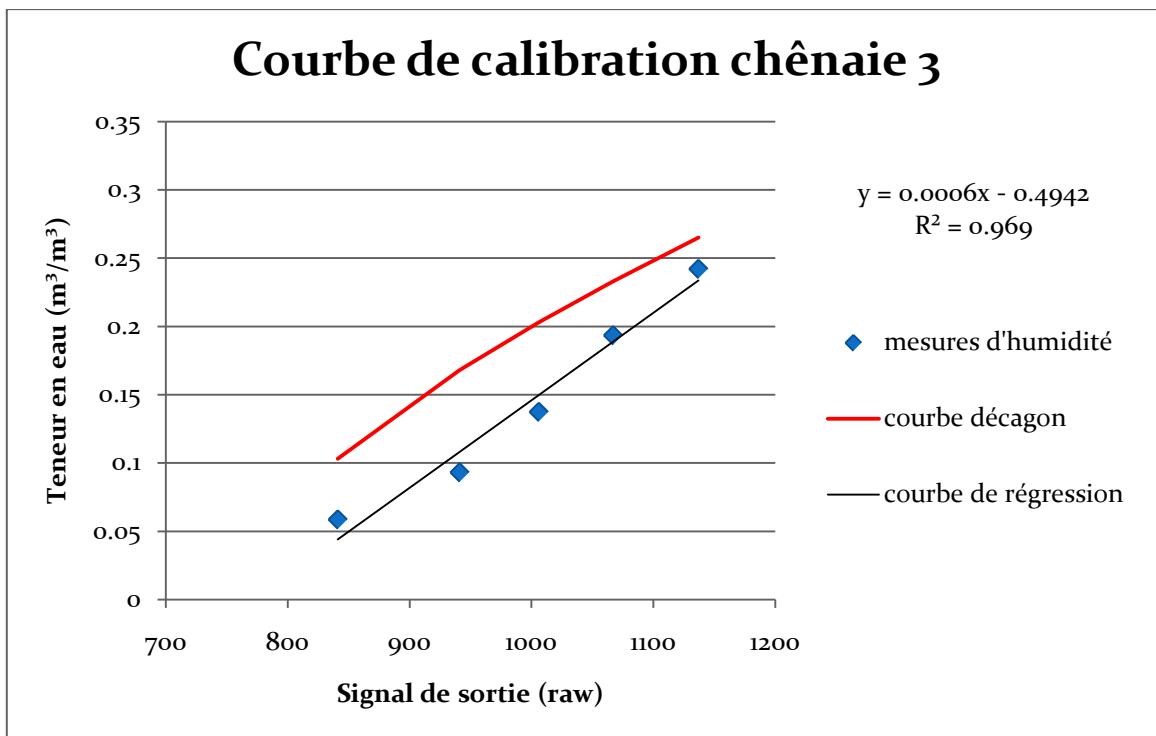


FIGURE 52 : COURBE DE CALIBRATION DU SOL DE LA CHÊNAIE À 67 CM DE PROFONDEUR

