LE GOUVERNEMENT
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG
Ministère de l'Agriculture,
de la Viticulture et de la
Protection des consommateurs

Administration des services techniques
de l'agriculture

Convention de recherche relative au développement d'outils de gestion intégrée du ruissellement, de l'érosion et des transferts de polluants associés pour les bassins versants du Grand-Duché de Luxembourg
Application au bassin-versant de la Haute-Sûre

Rapport

Décembre 2018

Dr. Ir. Alexandre Maugnard, Pr. Charles Bielders, Pr. Marnik Vanclooster

Laboratoire de Génie Rural

Earth and Life Institute - Environmental Sciences

UCLouvain, Croix du Sud 2, B-Louvain-la-Neuve

UCLouvain

EARTH & LIFE INSTITUTE

Table des matières

1. Introduction 1
2. Contexte 1
3. Matériels et données 3
   3.1. Le modèle SWAT et les autres logiciels utilisés 3
   3.2. Données de débit 6
   3.3. Données météorologiques 6
   3.4. Données cartographiques 7
4. Prétraitement des données pour la mise en œuvre d'ArcSWAT 8
   4.1. Homogénéisation des systèmes de projection 8
   4.2. Fusion des MNTs 8
   4.3. Fusion des réseaux hydrographiques 9
   4.4. Création d'un MNT hydrologique 11
   4.5. Regroupement et homogénéisation des données d'occupation du sol 12
   4.6. Regroupement et homogénéisation des données pédologiques 14
   4.7. Extraction des données météorologiques 24
5. Calibration du modèle SWAT sur la zone d'étude 25
   5.1. Le bassin versant de la station de Schéimelzerbesch 25
   5.2. Paramétrisation du bassin versant de la station de Schéimelzerbesch 28
      5.2.1. Délimitation des sous-bassins versants 28
      5.2.2. Délimitation des HRUs 29
      5.2.3. Paramétrisation des données météorologiques 30
      5.2.4. Création et modification des tables d'entrée 30
   5.3. Résultats du modèle sans calibration 31
   5.4. Calibration du modèle 34
6. Validation du modèle SWAT sur la zone d'étude 41
   6.1. Le bassin versant de la station de Grondmillen 41
   6.2. Le bassin versant de la station de Bavigne 46
   6.3. Le bassin versant de la station de Rommelerkraiz 51
   6.4. Le bassin versant de la station de Bigonville 56
7. Conclusions et perspectives 77
8. Bibliographie 80

Annexe 1 : Regroupements des codes cultures du RPG du Grand-Duché de Luxembourg 82
Annexe 2 : Regroupements des codes cultures du parcellaire SIGEC wallon 86
Annexe 3 : Regroupements des classes d'occupation de l'OBS 2009 90
Annexe 4 : Regroupements des écotopes de la couche LifeWatch 94
Annexe 5 : Méthode pour créer la carte des successions culturales 2015 à 2017 et d'occupation du sol 95
Annexe 6 : Méthode de recalage du réseau hydrographique sur le réseau d'écoulement du MNT hydrologique et correction des discontinuités 96
Annexe 7 : Méthode de délimitation des sous-bassins versants et de segmentation des cours d'eau dans un format correct pour ArcSWAT 97
Annexe 8 : Paramètres utilisés pour renseigner les successions culturales observés sur la carte d'occupation du sol 2015-2017 dans la table « crop » de la mdb SWAT2012 98
Annexe 9 : Code utilisé pour intégrer les informations pédologiques dans la table « usersoils » de la mdb SWAT2012 99
Annexe 10 : Sensibilité du modèle aux paramètres du Set#1 103
Annexe 11 : Sensibilité du modèle aux paramètres du Set#2 105
Annexe 12 : Sensibilité du modèle aux paramètres du Set#3 106
Annexe 13 : Sensibilité du modèle à la conductivité hydraulique à saturation avant calibration 108
Annexe 14 : Flux observés sur le bassin versant de Schéimelzerbesch pour les 6 périodes définies de 2016 à 2017 109
Annexe 15 : Bilan annuel des principaux types d'écoulement par sous bassins versant sur le BV de Schéimelzerbesch 110
Annexe 16 : Bilan annuel des principaux types d'écoulement par sous bassins versant sur le BV de Grondmillen 112
Annexe 17 : Bilan annuel des principaux types d'écoulement par sous bassins versant sur le BV de Bavigne 114
Annexe 18 : Bilan annuel des principaux types d'écoulement par sous bassins versant sur le BV de Rommelerkraiz 116
Annexe 19 : Bilan annuel des principaux types d'écoulement par sous bassins versant sur le BV de Bigonville 118
Annexe 20 : Liste délivrables 120

1. Introduction

Le présent rapport présente les résultats obtenus dans le cadre de la convention de recherche relative au développement d'outils de gestion intégrée du ruissellement, de l'érosion et des transferts de polluants associés pour les bassins versants du Grand-Duché de Luxembourg (GDL). Cette convention conclue entre l'Administration des Services Techniques de l'Agriculture et l'Earth and Life Institute de l'UClouvain s'inscrit dans la continuité de la convention PESTEAUX (novembre 2015 – juillet 2017, Centre wallon de Recherches Agronomiques de Gembloux) visant à mettre au point un outil d'aide à la décision, basé sur un Système d'Information Géographique, pour l'évaluation du risque de pollution diffuse des eaux de surface et souterraines par l'utilisation de produits phytopharmaceutiques, à l'échelle de la parcelle agricole, au GDL. La convention PESTEAUX a mis en évidence les potentialités du modèle SWAT dans le cadre de la gestion de la qualité des eaux de surface. Ce modèle permet aussi de quantifier les débits à l'échelle de sous-bassins versants, constituant ainsi un outil particulièrement pertinent pour la gestion des écoulements superficiels à l'échelle du bassin versant. Il intègre notamment de nombreuses fonctionnalités permettant une prise en compte détaillée de l'occupation du sol et de la gestion des cultures. Il permet aussi de simuler l'effet de l'implantation d'aménagements hydrauliques tels que des bandes enherbées, des chenaux enherbés ou bien des zones d'immersion temporaires sur les débits liquides et solides. SWAT peut donc constituer, à l'échelle du GDL, un outil de gestion intégrée des bassins versants particulièrement pertinent dans une optique de gestion de la qualité des eaux de surface, notamment dans le contexte du barrage d'Esch-sur-Sûre qui représente au moins un tiers de la production d'eau potable au GDL. La mise au point d'un tel outil nécessite de pouvoir le calibrer et valider le modèle de manière fiable en intégrant aussi bien le territoire wallon que luxembourgeois. L'objectif principal de cette convention est donc de pouvoir reproduire de manière fiable au moyen du modèle choisi les différents débits liquides mesurés sur la Sûre et ses affluents en amont du barrage. Cet objectif est une étape préalable et indispensable pour pouvoir à terme déboucher sur un outil de gestion.

2. Contexte

Le bassin versant de la Sûre à Esch-sur-Sûre se situe à cheval sur le GDL et la Wallonie (Figure 1). Sa surface est d'environ 425 km² dont la majeure partie, à savoir 63 %, se situe en Wallonie. Deux stations de mesures de hauteurs d'eau sont présentes sur la Sûre pour ce bassin versant à savoir l'une à Esch-sur-Sûre et l'autre à Bigonville. Sur les affluents de la Sûre, à savoir le Dirbech à Grondmillen, le Ningserbaach à Schéimelzerbesch, la Syrbaach à Rommelerkraiz et le Béiwenerbaach à Bavigne, des données de hauteurs d'eau sont également enregistrées. Les données de débit journalières et horaires sont disponibles pour la station de Bigonville depuis 1996 et pour les autres stations depuis 2015. Du côté wallon une station située à Martelange mesure les débits sur la Sûre depuis 1975 avec un pas de temps horaire et avec un pas de temps 10 minutes depuis 2012. Au total, 7 stations disposent donc de données de débit mesurées pour la calibration et la validation du modèle SWAT (Figure 2 et Tableau 1). Ces dernières drainent des bassins versants de 15 km² à 428 km².

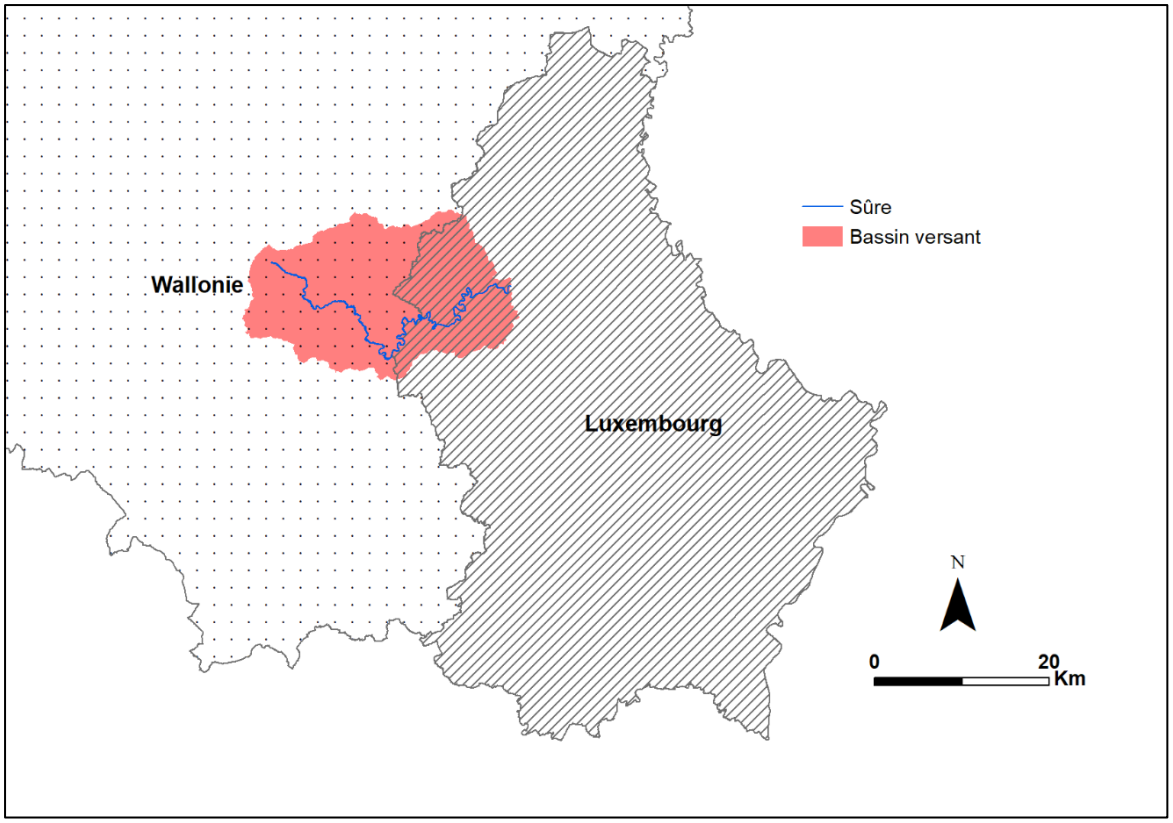


Figure 1 : Situation du bassin versant de la Sûre à Esch-sur-Sûre

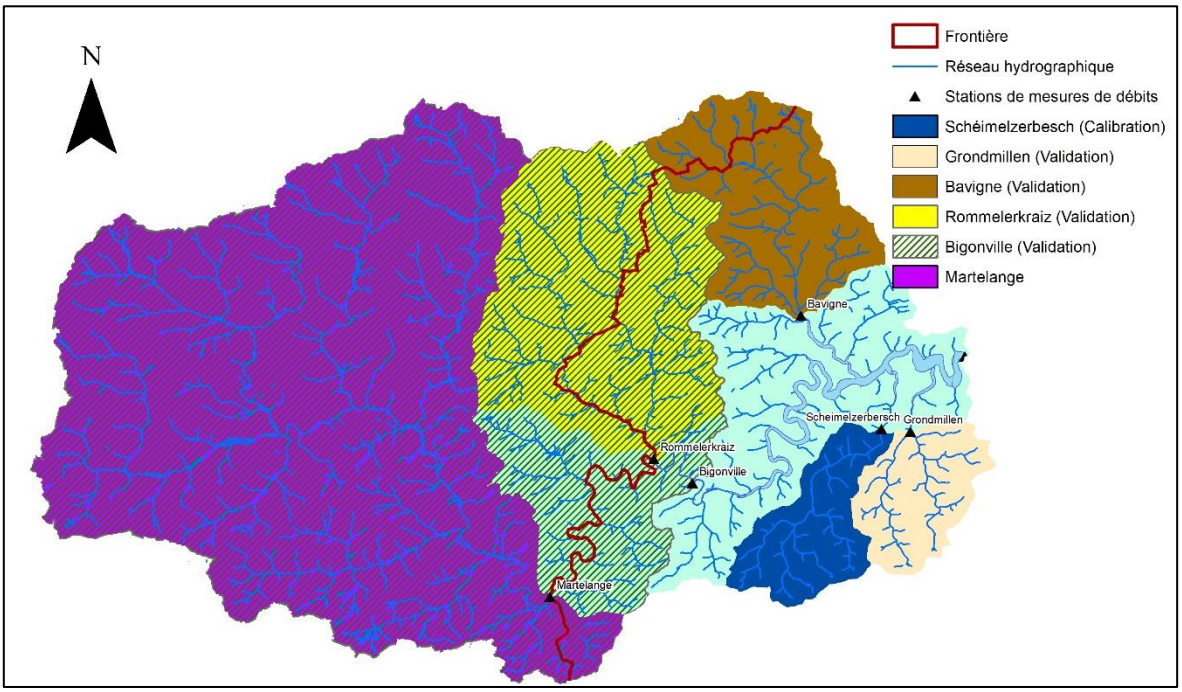


Figure 2 : Stations de mesures disposant de données de débits pouvant être exploitées dans le cadre du projet (5 des 7 stations ont été utilisées dans ce présent rapport. Schéimelzerbesch pour la calibration et Grondmillen, Bavigne, Rommelerkräiz et Bigonville pour la validation)

Tableau 1 : Superficie des surfaces drainées par les stations de mesure des hauteurs d'eau / débits

BV	Cours d'eau	Superficie [km²]	Date de mise en service	Mesure de hauteur	Mesure de débit	Fréquence
Rommelerkräiz	Syrbaach	63.83	1/10/2015	Oui	Non	24 h
Bigonville	Sûre	308.4	1/9/1996	Oui	Oui	24 h
Esch/Sûre	Sûre	428	1/7/2013	Oui	Non	24 h
Bavigne	Béiwenerbaach	33.57	1/10/2015	Oui	Non	24 h
Grondmillen	Dirbech	15.33	1/10/2015	Oui	Non	24 h
Schéimelzerbesch	Ningserbaach	16.16	1/10/2015	Oui	Non	24 h
Martelange	Sûre	209.00	17/03/1975	Oui	Oui	10 min (2012) / 24h (1975)

3. Matériels et données

Le bassin versant de la Sûre à Esch-sur-Sure étant à cheval sur le GDL et la Wallonie, cela entraine une difficulté supplémentaire dans l'acquisition et la gestion des données nécessaires au fonctionnement du modèle SWAT. Il faut en effet s'assurer de la disponibilité et de la concordance des données sur les deux pays et le cas échéant veiller à leur homogénéisation.

3.1. Le modèle SWAT et les autres logiciels utilisés

ArcSWAT est issu de la combinaison du modèle SWAT avec l'interface graphique ArcGIS. SWAT est un modèle continu dans le temps, fonctionnant à l'échelle d'un bassin versant et pour un pas de temps d'une journée. Il a été développé par le département de l'agriculture des Etats-Unis (USDA) dans le but de déterminer l'impact des techniques de gestion sur le bilan en eau, sédiments, pesticides, nutriments, … d'un bassin versant pour différents types de sols et utilisations des terres (Lang et al., 2011)

Ce modèle se base sur les processus physiques en jeu dans le bassin versant. Sa grande robustesse et son efficience en font un modèle largement utilisé dans le domaine de la modélisation de bassins versant, notamment par différentes agences fédérales américaines ou de la Commission Européenne (Gassman et al., 2007). Les composantes de base du modèle sont :

- la composante hydrologique : calcul du bilan hydrologique sur le bassin versant. La Figure 3 montre le fonctionnement du cycle hydrologique dans SWAT ;
- la composante météorologique (SWAT peut également être utilisé afin de déterminer l'impact des changements climatiques passés sur le bilan hydrologique ainsi que pour des projections) ;
- les propriétés du sol ;
- la gestion des terres.

D’autres aspects peuvent également être intégrés au modèle :

- la croissance des plantes : détermination des rendements de cultures associés à différentes techniques de gestion des terres en fonction des paramètres météorologiques, de l’irrigation, …
- les nutriments et pesticides : détermination de leur date d’application aux cultures et de leur impact sur les rendements ainsi que leur transport dans le réseau hydrographique, leur transformation, …
- une composante ayant trait aux bactéries et éléments pathogènes, …
- le transport de sédiments, …

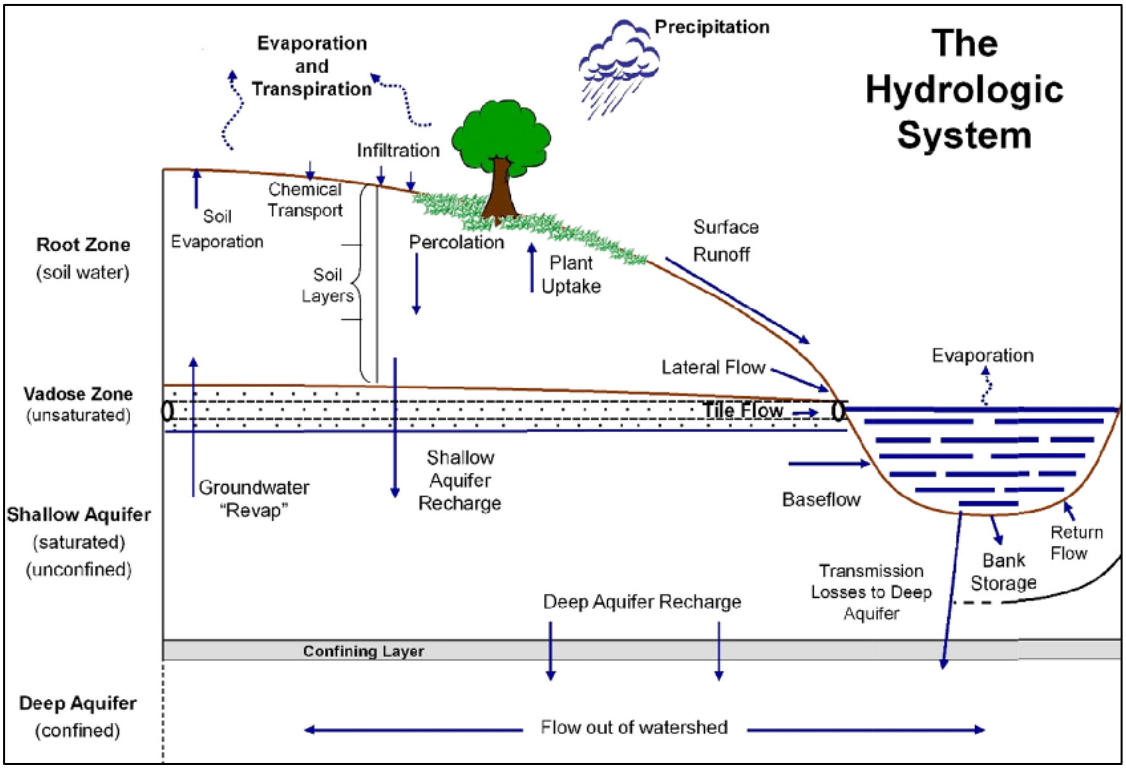


Figure 3 : Schéma du fonctionnement du cycle hydrologique dans le modèle SWAT (Neitsch et al. 2011)

L’eau du sol se dirigeant vers l’exutoire peut prendre deux directions : la première verticale rechargeant l’aquifère peu profond (percolation) et la seconde latérale au sein du profil du sol (Neitsch et al. 2011). Cet écoulement hypodermique est appelé *lateral subsurface flow* dans SWAT. Pour être mobile, la teneur en eau du sol doit dépasser la capacité au champ. Ce flux est calculé par un modèle de stockage cinématique pour chaque couche de sol simultanément à la redistribution verticale de l’eau. Ce calcul prend en compte les conductivités hydrauliques des horizons de sol, la teneur en eau du sol, la porosité de drainage et la pente. Pour que l’écoulement hypodermique soit important en volume, il est nécessaire que plusieurs critères soient remplis : la présence de sols avec une forte perméabilité en surface, suivi d’une couche moins perméable en profondeur et d’un gradient de pente important. SWAT partitionne l’eau souterraine entre deux compartiments. Le premier est un aquifère peu profond et non confiné qui contribue au débit du réseau hydrographique par restitution des flux. Le second est un aquifère profond confiné qui ne restitue pas d’eau au réseau hydrographique.

Dans le modèle SWAT, le bassin versant considéré est divisé en différents niveaux d'organisation représentés à la Figure 4. Les limites du bassin versant sont déterminées à partir de la topographie du terrain. Celui-ci est divisé en différents sous-bassins (SB_1, …, SB_n) également délimités par la topographie. Ces SBs sont reliés spatialement de sorte que le flux contenu dans un SB s'écoule entièrement vers le SB suivant. Chaque SB contient une branche du réseau hydrographique connectées par SWAT afin de former le réseau à l'échelle du bassin versant. Les SBs sont ensuite divisés en unités de réponse hydrologique (HRU, Hydrological Response Unit). Les HRUs sont des unités homogènes en termes d'utilisation du sol, de classe de pente et de caractéristiques du sol. Si les SBs sont connectés les uns aux autres, il n'existe par contre pas d'interaction entre les unités de réponse hydrologique. Les sorties du modèle sont calculées séparément pour chaque unité et additionnées dans chaque SB. Une fois que les valeurs ont été déterminées au niveau des sous-bassins, SWAT détermine les relations spatiales entre les SBs et incorpore les données calculées au réseau hydrographique global. SWAT 2012 a été implémenté dans le logiciel ArcMap 10.4. Il s'agit de la version ArcSWAT 2016 (rev 664). Les traitements cartographiques des différentes couches ont été effectués dans ArcMap 10.4 et Whitebox GAT 3.4 'Montréal'.

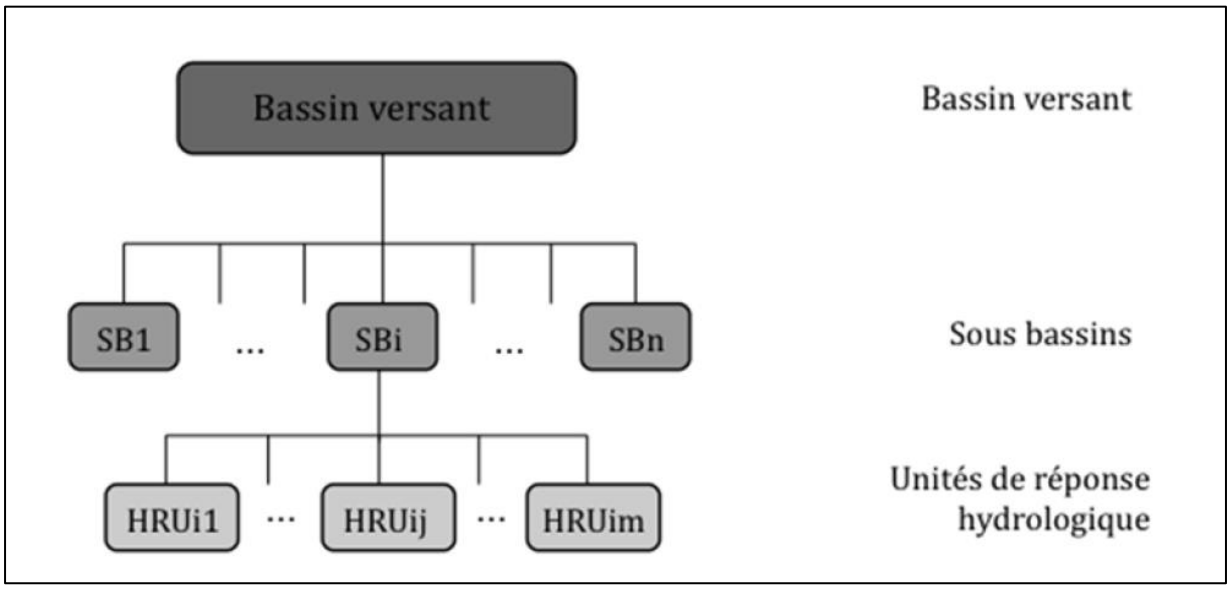


Figure 4 : Organisation des unités spatiales dans le modèle SWAT

3.2. Données de débit

Les données de débit proviennent de l'Administration de la gestion de l'eau et ont été transmises le 15 mai 2018 par l'ASTA pour les stations luxembourgeoises pour la période 2015 à avril 2018. Les données horaires pour la station de Martelange peuvent être demandées via le site Aqualim (http://aqualim.environnement.wallonie.be) du Service Public de Wallonie (SPW).

3.3. Données météorologiques

Trois sources de données météorologiques sont disponibles pour couvrir le bassin versant de la Sûre à Esch-sur-Sûre. Il s'agit des données de l'ASTA téléchargeables sur le site (http://www.agrimeteo.lu), des données de la Direction générale opérationnelle de la mobilité et des voies hydrauliques du SPW[1] et de l'asbl PAMESEB[2]. Les données wallonnes ne sont pas directement téléchargeables et doivent faire l'objet d'une demande. La Figure 5 montre la répartition spatiale des diverses stations à proximité du bassin versant étudié. Le Tableau 2 montre les principaux paramètres météorologiques mesurés par ces stations. Il est à noter que SWAT requiert au minimum pour pouvoir fonctionner des données pluviométriques et de température maximales et minimales avec un pas de temps journalier ou horaire selon le pas de temps choisi pour les simulations.

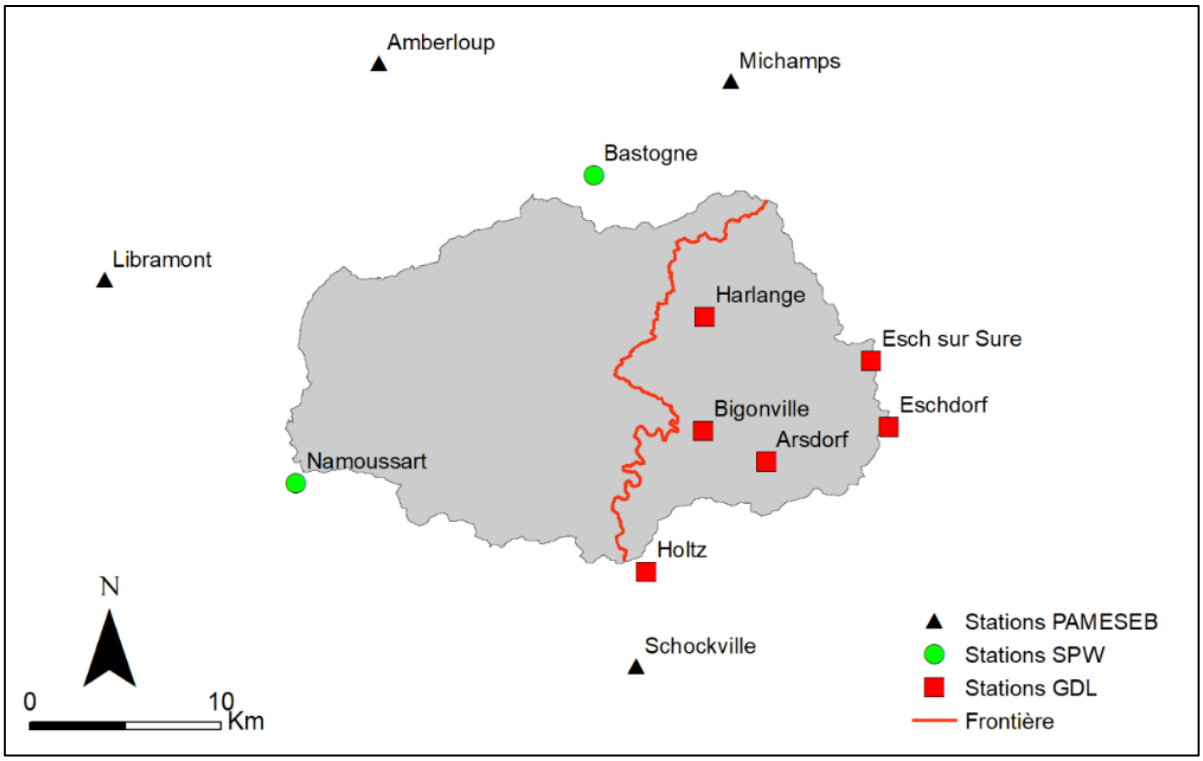


Figure 5 : Répartition spatiale des stations météorologiques sur ou à proximité du bassin versant étudié.

[1] http://voies-hydrauliques.wallonie.be/opencms/opencms/fr

[2] http://www.pameseb.be/

Tableau 2 : Principaux paramètres météorologiques mesurés avec un pas de temps journalier par les stations sur ou à proximité du bassin versant étudié

Station	Pluie	T_min	T_max	T_moy
Arsdorf	X	X	X	X
Bigonville	X	-	-	-
Esch	X	X	X	X
Eschdorf	X	X	X	X
Harlange	X	-	-	X
Holtz	X	X	X	X
Amberloup	X	X	X	X
Michamps	X	X	X	X
Libramont	X	X	X	X
Schockville	X	X	X	X
Bastogne	X	-	-	-
Namoussart	X	-	-	-

3.4. Données cartographiques

Outre les données météorologiques, SWAT nécessite au minimum trois types données pour pourvoir fonctionner. Il s'agit d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT), de l'occupation du sol et du type de sol. Le réseau hydrographique peut soit être approximé à partir du MNT ou renseigné à partir d'une couche de données existante pour rendre compte de la situation la plus proche de la réalité. Le MNT et le réseau hydrographique sont utilisés pour découper le bassin versant en sous-bassins versants (SBs). Le MNT est également utilisé pour dériver la carte des pentes qui est combinée à la carte d'occupation du sol et la carte pédologique pour définir les HRUs (Hydrologic Response Units) au sein de chaque SBs.

Les données suivantes ont été utilisées :

- **MNT** : le MNT 1 m de résolution dérivé du vol LiDAR 2013-2014 pour la Wallonie[3] et le MNT de 5 m de résolution pour le GDL [BD-L-MNT5].
- **Réseau hydrographique** : le RHW (Réseau Hydrographique Wallon) pour la Wallonie et la fusion des couches « Ruisseau » et « Cours d'eau » de la BD TOPO 2008 pour le GDL.
- **Surfaces agricoles :** les données vectorielles du parcellaire agricole anonyme 2015, 2016 et 2017 pour les surfaces cultivées en Wallonie. Pour le GDL, les données culturales utilisées sont celles des référentiels parcellaires graphiques (RPG) 2015, 2016 et 2017.
- **Occupation du sol** : les données vectorielles LifeWatch[4] qui identifient les principaux écotopes et classes d'occupation du sol en Wallonie et celles de l'OBS 2007 au GDL.
- **Pédologie** : la carte vectorielle des sols au 1:20.000 pour la Wallonie et la carte vectorielle des sols au 1 :25.000 du GDL ainsi que la carte des associations de sols au 1 :100.000 pour les zones non couvertes par la carte au 1 :25.000.

[3] http://geoportail.wallonie.be/catalogue/6029e738-f828-438b-b10a-85e67f77af92.html
[4] http://lifewatch.be/ (consulté le 04/09/2018)

4. Prétraitement des données pour la mise en œuvre d'ArcSWAT

4.1. Homogénéisation des systèmes de projection

Les données cartographiques luxembourgeoises et wallonnes ne possèdent pas le même système de projection. Les données produites au Luxembourg sont projetées dans le système « Luxembourg 1930 Gauss » et les données wallonnes sont quant à elles pour la plupart en « Lambert belge 1972 ». Pour pouvoir fusionner les données, il est donc nécessaire de les reprojeter dans un système commun. Il n'existe pas de relations directes entre les différents systèmes de coordonnées utilisés par les pays du Benelux, mais toutefois, depuis l'établissement du nouveau système de référence européen ETRS 89 (European Terrestrial Reference System), les pays européens ont défini avec précision les paramètres de transformation entre leurs systèmes et le système européen. Le secrétariat général du Benelux[5] recommande de convertir les données dans l'un des systèmes de coordonnées européens suivants selon l'objectif poursuivi :

- ETRS89/LCC pour une cartographie paneuropéenne dont les niveaux d'échelle sont égaux ou inférieurs à 1:500 000
- ETRS89/TM pour une cartographie paneuropéenne dont les niveaux d'échelle sont supérieurs à 1:500 000
- ETRS89/LAEA pour des applications statistiques ou autres pour lesquelles la représentation la plus fidèle possible des superficies est importante.

Dans le cadre des simulations hydrologiques effectuées avec SWAT où les surfaces doivent être définies avec précision, il a été choisi d'utiliser le système ETRS89/LAEA (ESPG : 3035).

4.2. Fusion des MNTs

Les opérations suivantes ont été effectuées sur le MNT à 5 m du GDL :

- les différentes tuiles du MNT ont été regroupées pour créer un fichier unique à l'échelle du GDL (fonction Mosaic to New raster d'ArcGIS)
- les valeurs d'altitude en centimètre du MNT regroupé ont été divisées par 100 pour les convertir en mètres
- le système de projection « Luxembourg 1930 Gauss » est assigné à la couche
- la fonction « Project Raster » d'ArcGIS est utilisée pour reprojeter la couche dans le système « ERTS_1989_LAEA » avec la transformation « Luxembourg_1930_To_ETRS_1989_1 » et la méthode de resampling « bilinear ».

[5] http://www.benelux.int/fr/publications/publications/geodonnees-transfrontalieres (consulté le 04/09/2018)

4.3. Fusion des réseaux hydrographiques

Les réseaux hydrographiques vectoriels wallons et du GDL ont été convertis en raster en choisissant une résolution de 5 m. Les réseaux hydrographiques rastérisés ont ensuite été fusionnés en suivant la méthode suivante pour définir un tracé unique dans les zones de recouvrement entre les données wallonnes et luxembourgeoise (Figure 6) :

- Fusion des deux rasters au moyen du « Raster Calculator » d'ArcGIS et des fonctions « Conditionnal » et « IsNull » afin de créer une couche unique ou la valeur des cours d'eau est égale à 1 et le reste est du « NoData »
- Utilisation de la fonction « Expand » d'ArcGIS en étendant d'une cellule
- Utilisation de la fonction « Thin » d'ArcGIS

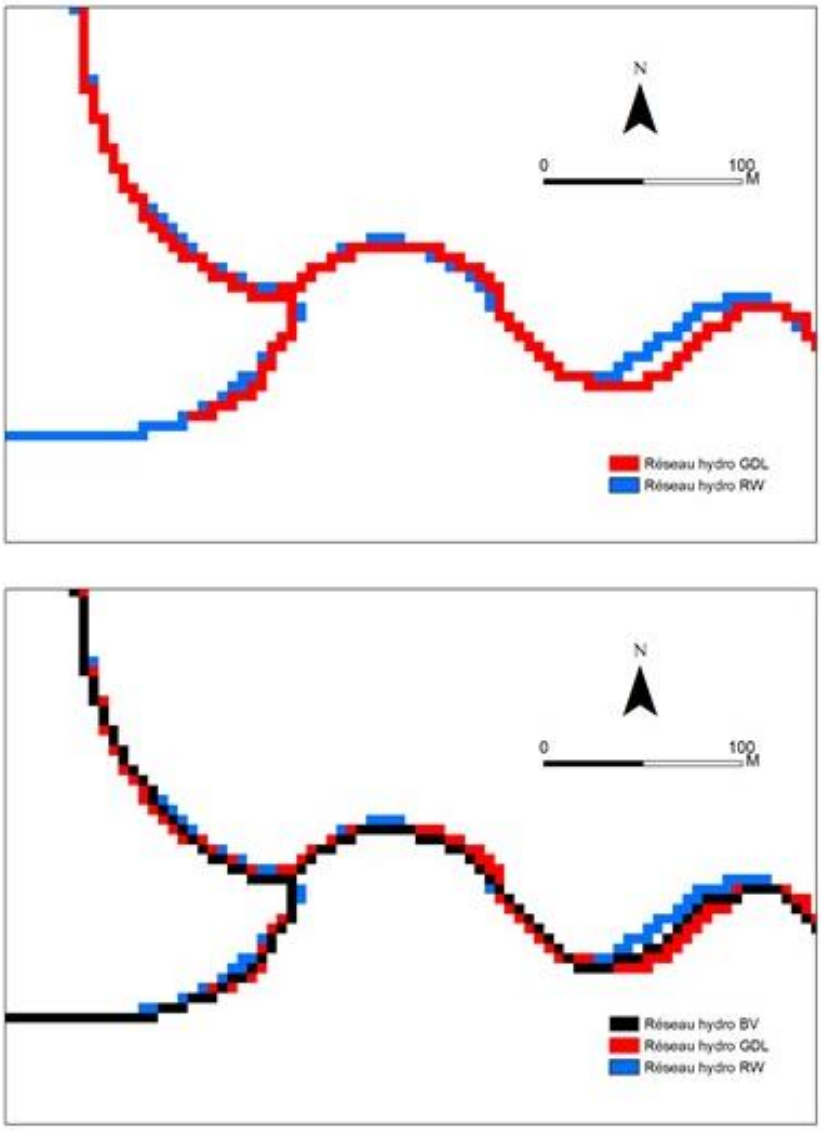


Figure 6 : Création d'un réseau hydrographique moyen (Réseau hydro BV) à partir des réseau hydrographiques wallons (RW) et luxembourgeois (GDL).

Le réseau hydrographique fusionné des deux régions a servi à creuser le MNT et à établir le MNT hydrologique. Le réseau doit cependant être retravaillé avant de pouvoir être intégré dans ArcSWAT. Ce réseau présente en effet des discontinuités principalement en Wallonie (Figure 7), or ArcSWAT nécessite un réseau hydrographique continu. De plus, le réseau hydrographique en Wallonie et au Luxembourg peut ne pas se superposer parfaitement aux zones d'écoulement dérivés du MNT hydrologique du fait d'inexactitude dans la digitalisation des cours d'eau, de la précision du MNT ou bien des modifications induites lors de la fusion des MNTs et réseaux hydrographiques wallons et luxembourgeois. S'il existe un décalage entre le réseau hydrographique et la zone d'écoulement sur le MNT hydrologique et si l'altitude de la zone d'écoulement sur le MNT est moins élevée que l'altitude au droit du cours d'eau digitalisé malgré son enfoncement de 2.5 m, alors l'écoulement se fera dans la zone d'écoulement défini par le MNT et ne suivra pas la couche digitalisée du réseau hydrographique. Ces cas de figures sont cependant plutôt rares et l'ensemble du réseau suit en général le réseau hydrographique qui a été enfoncé dans le MNT. Là où cela n'est pas le cas, le réseau hydrographique a été recalé sur le réseau d'écoulement du MNT hydrologique et les discontinuités ont été supprimées selon la méthode exposée à l'Annexe 6. Cette méthode consiste à extraire les extrémités amont du réseau hydrographique et à retracer un réseau hydrographique d'amont en aval en suivant les directions de flux déterminées à partir du MNT hydrologique (Figure 8). Cette tâche a été effectuée à l'échelle du bassin versant de la Sûre à Esch-sur-Sûre.

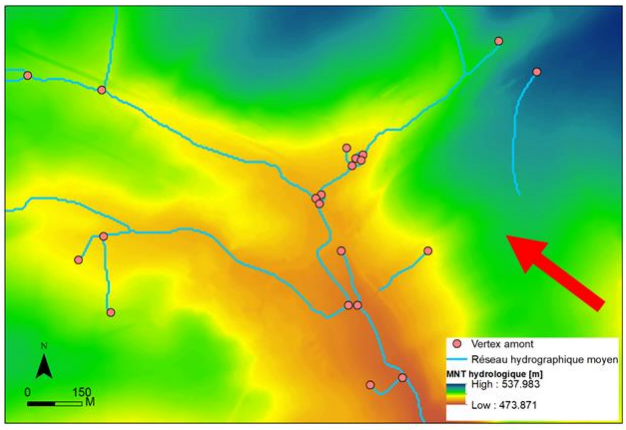


Figure 7 : Exemple de discontinuité dans le réseau hydrographique

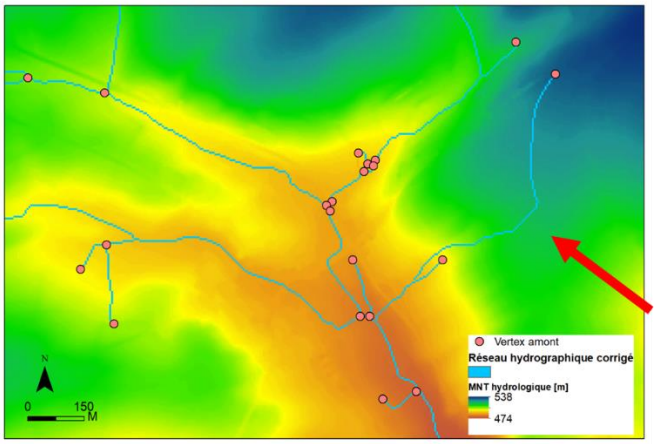


Figure 8 : Correction des discontinuité et calage du réseau hydrographique sur le réseau d'écoulement défini à partir du MNT hydrologique

4.4. Création d'un MNT hydrologique

Avant son utilisation dans SWAT, le MNT doit être traité pour être cohérent d'un point de vue hydrologique. Ceci consiste notamment à enfoncer le réseau hydrographique pour y forcer les écoulements superficiels et à éliminer les cellules sans exutoire. Ces opérations ont été effectuées à partir du MNT fusionné et du réseau hydrographique fusionné dans le logiciel Whitebox GAT de la manière suivante :

- Utilisation de la fonction « Burn streams » en choisissant une profondeur d'enfoncement de 2,5 m.
- Utilisation de la fonction « Breach » de manière incrémentielle en choisissant une distance de recherche de solutions de successivement 2, 8 et 40 pixels.

Pour finir, le MNT traité dans Whitebox GAT a été importé dans ArcGIS pour appliquer la fonction « Fill » afin d'éliminer les cellules sans exutoires non solutionnées par la fonction « Breach ». Ceci permet de créer un MNT hydrologiquement continu (Figure 9) à partir duquel les bassins versants des différentes stations pourront être délimités. Pour cela, il est nécessaire d'appliquer la fonction « Flow Direction » d'ArcGIS puis « Flow Accumulation ». Chacune des stations de mesure de débits doit être ensuite calée sur la valeur d'accumulation de flux la plus importante à proximité, puis la fonction « Watershed » est appliquée. Ceci permet de délimiter pour chaque station de mesure de débit le bassin versant drainé. Le MNT hydrologique est aussi utilisé par le modèle SWAT pour déterminer les pentes (Figure 10) qui serviront à la délimitation des HRUs.

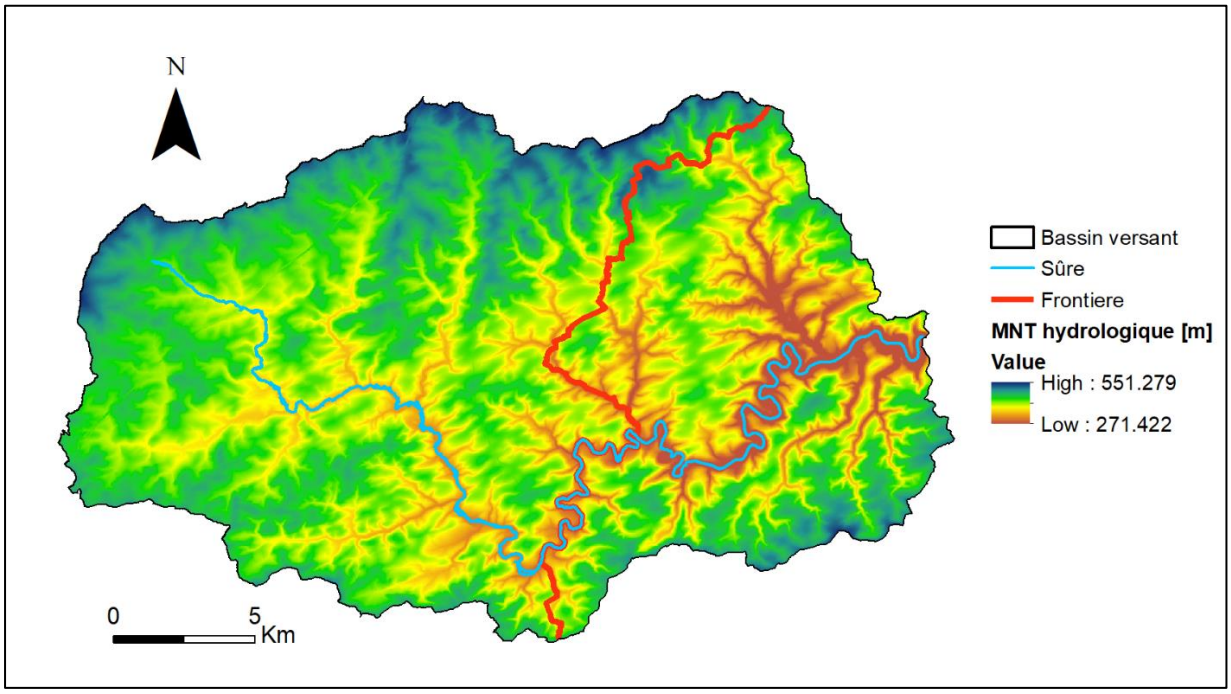


Figure 9 : Création d'un MNT hydrologique pour le bassin versant de la Sûre à Esch-sur-Sûre

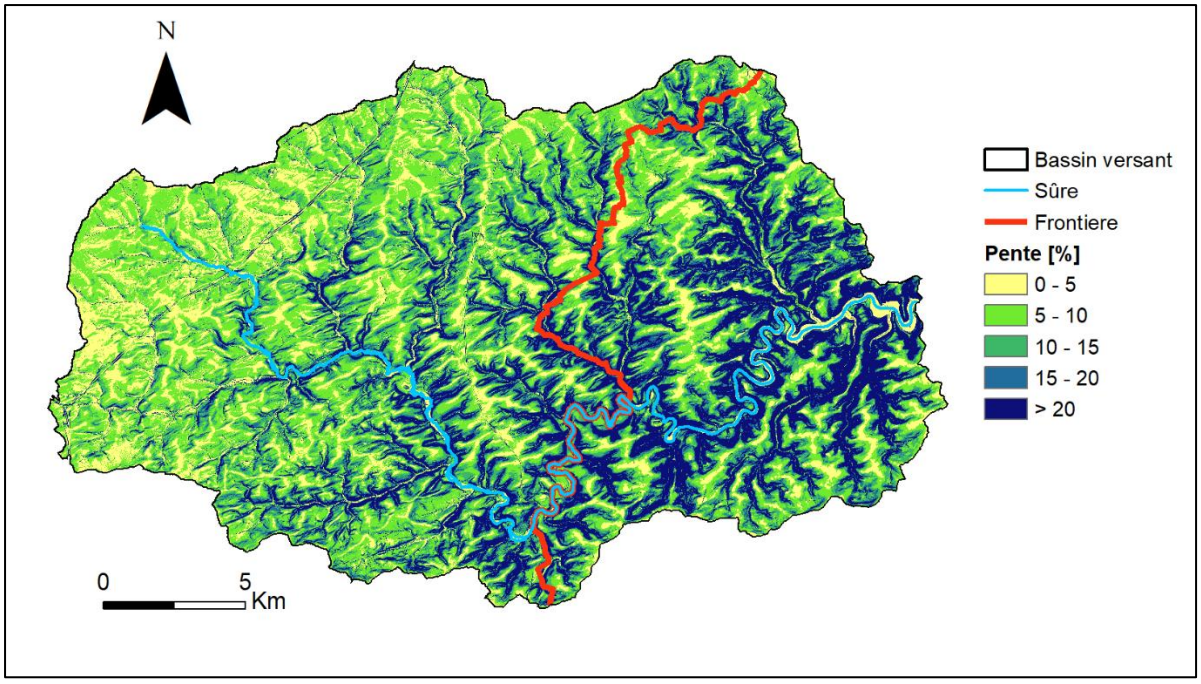


Figure 10 : Carte des pentes dérivée du MNT hydrologique pour le bassin versant de la Sûre à Esch-sur-Sûre

4.5. Regroupement et homogénéisation des données d'occupation du sol

Les données d'occupation du sol des deux régions ont été regroupées de manière à créer une carte unique d'occupation du sol à l'échelle du bassin versant étudié. Les données d'occupation du sol prises en considération sont les cultures présentes sur les surfaces cultivées en Wallonie et au GDL ainsi que le type d'occupation du sol en dehors des surfaces cultivées. Les surfaces cultivées pouvant être dédiées à différentes spéculations selon l'année culturale, une carte d'occupation du sol a été créée pour chaque parcellaire agricole qui couvre la série temporelle des débits des stations de mesure du GDL, à savoir 2015, 2016 et 2017. Les cartes d'occupation du sol générées en 2015, 2016 et 2017 ont ensuite été fusionnées en une carte unique où les surfaces cultivées reprennent les successions culturales 2015 à 2017. L'occupation du sol en dehors de ces zones a été définie sur base des données LifeWatch et de l'occupation biophysique du sol (OBS) 2007. En cas de recouvrement entre les données wallonnes et luxembourgeoises, il a été de décidé de donner la priorité aux données wallonnes. Concernant les surfaces cultivées, il est également important de noter que, comme le nombre de libellés culturaux sur la zone d'étude est relativement conséquent pour chacune des régions (85 pour la Wallonie et 84 pour le GDL sur 3 ans), il a été décidé de regrouper les cultures en classes présentant des similitudes quant à leur calendrier cultural et leur impact hydrologique et érosif. L'objectif était de réduire le nombre de combinaisons uniques de successions culturales, ce qui permet de réduire le nombre de HRUs et de faciliter la paramétrisation du modèle ainsi que de diminuer les temps de calcul. Le niveau de regroupement choisi distingue les principales cultures ou type de culture à savoir : le maïs, le colza d'hiver, la pomme de terre, les céréales d'hiver, les céréales de printemps, les cultures sarclées (en dehors du maïs et de la pomme de terre), l'arboriculture, et les prairies.

A ces classes, s'ajoutent d'autres d'occupation à savoir la forêt, les espaces naturels herbeux, les espaces naturels buissonnant, les zones humides, les zones urbaines à forte densité, les zones urbaines à faible densité, et les surfaces en eau. Les annexes 1 à 4 montrent les regroupements effectués pour chacune des couches d'entrée utilisées. Malgré ces regroupements, il a été constaté que de nombreuses combinaisons uniques de successions culturales étaient générées sur la période 2015 à 2017. La plupart d'entre elles sont liées à des pixels isolés et sont souvent improbables (ex : maïs – forêt - maïs). Ceci est notamment lié au fait que l'exactitude de la délimitation des parcelles est variable d'une année à l'autre en Wallonie. Du côté du GDL, bien que les limites du parcellaire soient invariables d'une année à l'autre, on remarque certaines parcelles qui, d'une année à l'autre, disparaissent ou bien apparaissent. Il s'agit cependant d'un nombre limité de parcelles. Toutefois, pour éviter ce type de problème, il a été décidé de fixer pour chacune des régions les limites du parcellaire agricole à celles de l'année 2017. Sur chacune de ces parcelles, les successions culturales ont été déterminées de 2015 à 2017. En dehors de ces limites parcellaires, ce sont les données LifeWatch ou de l'OBS 2007 qui ont été utilisées pour déterminer le type d'occupation du sol. La méthode utilisée pour établir la carte d'occupation du sol intégrant les successions culturales 2015-2017 est exposée à l'Annexe 5. A cette carte est liée une table de reclassification qui fait correspondre chaque succession culturale à un code de 4 lettres qui permet à ArcSWAT de retrouver les caractéristiques de l'occupation du sol ou de la succession culturale sur les trois années (calendrier, CN, …) dans sa base de données interne. Les 3 premières lettres du code correspondent aux 3 cultures successives observées de 2015 à 2017 (Tableau 3). Comme SWAT requiert des codes de 4 lettres, le code a été complété quelle que soit la succession culturale avec un 'X'. Une rotation pomme de terre – céréale d'hiver – maïs aura donc la code « PAMX ».

Tableau 3 : Cultures principales et occupation du sol principales associées aux regroupent d'occupation du sol pour les simulations effectuées dans SWAT. Les codes attribués sont également indiqués.

Description	Culture principale RW	Culture principale GDL	Code SWAT	CODE
Céréale d'hiver	Epeautre	Blé d'hiver	WWHT	A
Colza d'hiver	Colza d'hiver	Colza d'hiver	CANA	C
Céréale de printemps	Orge de printemps	Orge de printemps	BARL	L
Cultures sarclées	Betterave	Betterave	SGBT	S
Maïs	Maïs	Maïs	CSIL	M
Pomme de terre	Pomme de terre	Pomme de terre	POTA	P
Forêt	Forêt		FRST	F
Arboriculture / Vigne	Arboriculture / Vigne		ORCD	O
Prairie buissonnante	Prairie buissonnante ou espace naturel buissonnant		RNGB	B
Prairie herbeuse	Prairie herbeuse ou espace naturel herbeux		RNGE	R
Zone urbaine à forte densité	Zone urbaine à forte densité		URHD	H
Zone urbaine à faible densité	Zone urbaine à faible densité		URLD	D
Surfaces en eau	Surfaces en eau		WATR	E
Prairie humide	Prairie humide		WETN	W

La Figure 11 montre l'occupation du sol de 2015 à 2017 sur le bassin versant. L'essentiel du BV est occupé par la forêt (46 %) et la zone agricole (45%). Cette dernière est composée pour la période 2015 à 2017 à plus de 60% de surfaces uniquement en prairie et se situe en grande partie sur le versant wallon du BV. La succession de trois cultures de céréales de printemps représente environ 5% de la surface agricole et les principales rotations font intervenir une ou deux prairies sur 3 ans. La plupart des rotations qui font intervenir des cultures se trouvent sur la partie luxembourgeoise du BV. Les espaces naturels hors forêt représentent un peu moins de 5 % de la surface totale du BV et les zones urbanisées environ 3%. Les autres occupations du sol comme l'arboriculture, les zones humides et les surfaces en eau représentent chacune moins de 1 % de la surface totale du BV.

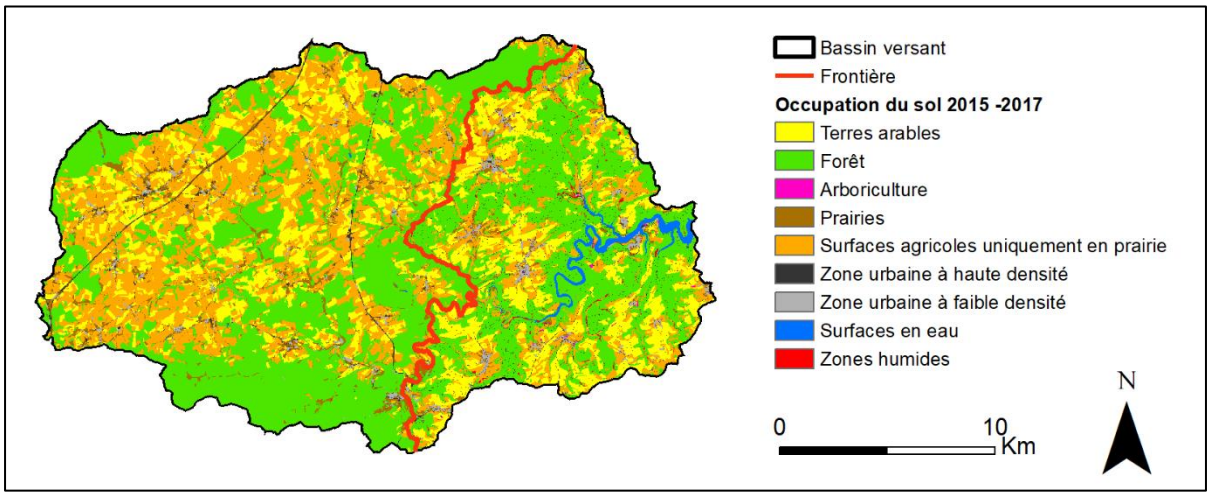


Figure 11 : Carte combinée de l'occupation du sol de 2015 à 2017 après regroupement en grandes classes d'occupation du sol pour le bassin versant de la Sûre à Esch-sur-Sûre. Sous l'appellation « Prairies » sont repris des espaces herbeux faisant partie de l'espace naturel et non de la surface agricole.

4.6. Regroupement et homogénéisation des données pédologiques

La carte au 1 :20.000 wallonne couvre un peu plus de 62 % de la zone d'étude, la carte des sols détaillée luxembourgeoise au 1 :25.000 couvre quant à elle près de 33%. Les 5 % de la surface non couverte par ces deux cartes se sont vues attribuer l'information de la carte des associations de sols au 1 : 100.000 du GDL (Figure 12). La zone d'étude présente un nombre important de séries pédologiques puisque l'on en recense 306 sur la partie wallonne et 114 sur la partie luxembourgeoise, auxquelles il faut ajouter 8 types d'associations de sol.

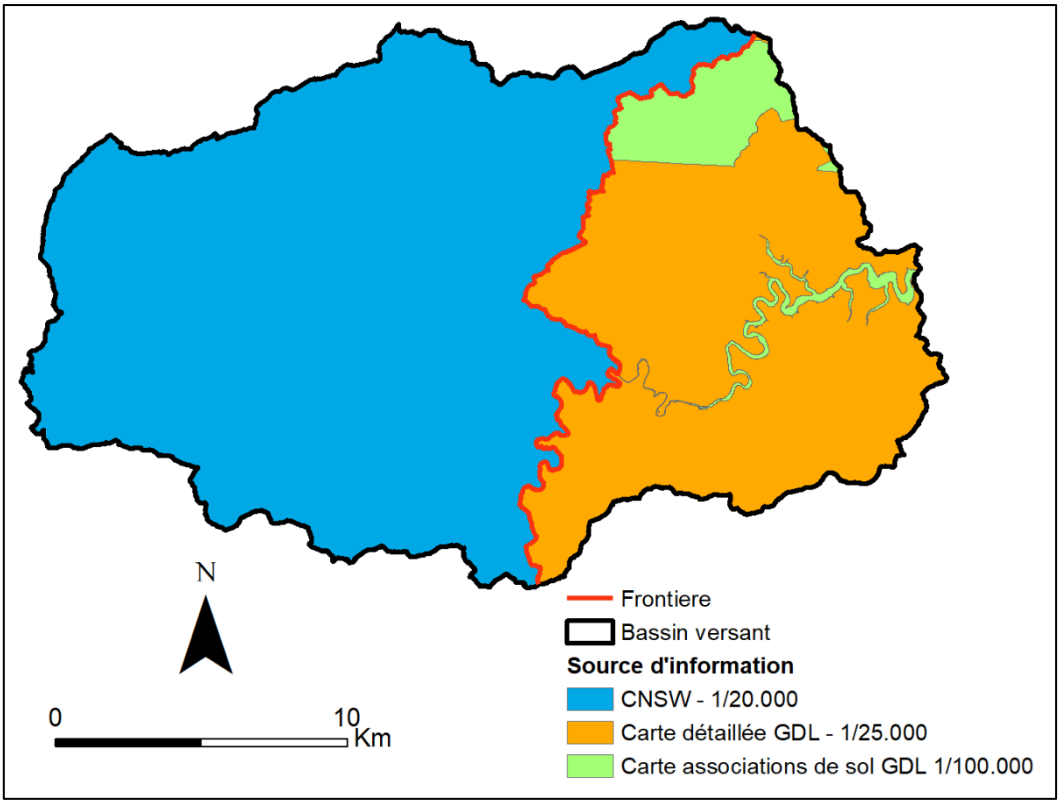


Figure 12 : Représentation cartographique des sources d'information pédologiques utilisées sur la zone d'étude

Après un premier travail d'homogénéisation effectué par le service de pédologie de l'ASTA consistant à (i) faire correspondre entre eux les sigles pédologiques de chaque région et (ii) regrouper les sols dont les descriptions sont relativement proches après avoir éliminé certaines phases ou variantes de développement de profil, on aboutit à 142 sols sur la zone d'étude. Cela reste un nombre conséquent qui induit un travail de paramétrisation important car il faut renseigner au modèle SWAT un nombre important de paramètres pédologiques pour chaque horizon de chaque sol. Il a donc été décidé de regrouper les sols sur base des paramètres qui influencent leur comportement hydrologique selon la méthode exposée à la Figure 13. Il s'agit notamment de la texture de sols, de l'ampleur de la charge caillouteuse, de leur position dans le paysage, de leur classe de drainage et de leur profondeur. La position dans le paysage est donnée par le développement de profil où les sols sans développement de profil (p) ont été classés différemment des autres. Le code fonctionnel d'un sol résulte de l'agrégation successive des codes attribués pour la texture, la charge caillouteuse, la position dans le paysage, la classe de drainage et la profondeur. Les séries spéciales ont quant à elles été regroupées selon la classification exposée au Tableau 4 et au Tableau 5. Ceci a permis d'aboutir à la carte des sols fonctionnels présentée à la Figure 14.

Texture (1)		
Sigle	*Description*	*Code*
A	Limoneuse	1
E	Argile Lègère	2
G	Limono-caillouteuse	3
L ou P	Limon sableux	4
S	Sable limoneux	5
U	Argile lourde	6
V	Tourbe	7
Z	Sable	8

Charge caillouteuse (2)	
Description	*Code*
Pas de charge	1
Peu caillouteux	2
Caillouteux à très caillouteux	3

Position dans le paysage (3)	
Description	*Code*
Sols des plateaux et des pentes	1
Sols des vallées et des dépressions	2

Profondeur (5)	
Description	*Code*
< 20 cm	1
Entre 20 et 40 cm	2
Entre 40 et 80 cm	3
> 80 cm	4
Variable	5

Drainage (4)			
Description	*Code*	*Wallonie*	*GDL*
Drainage naturel excessif ou légèrement excessif - favorable	1	b	a, b, B
Drainage naturel modéré ou imparfait	2	c, d, D	c, d, D
Drainage naturel assez pauvre ou pauvre sans horizon réduit	3	h, i, I	h, i, I
Drainage naturel assez pauvre ou pauvre, à horizon réduit	4	e, f, F, g, G	f, F

Figure 13 : Système de regroupement des sols en dehors des séries spéciales. Le chiffre entre parenthèse à côté de chaque paramètre indique l'ordre de concaténation des paramètres pour obtenir le code fonctionnel d'un sol à savoir 1) la texture, 2) la charge caillouteuse, 3) la position dans le paysage, 4) la classe de drainage et 5) la profondeur.

Tableau 4 : Codes attribués aux différentes séries spéciales wallonnes présentes sur la zone d'étude. La série spéciale H est assimilé à un GbbfiP (33115) et les zones non cartographiées se voient attribuer le code majoritaire dans son voisinage

RW		
Sigle	*Description*	*Code*
B	Zones de source anthropisées	9003
H	Complexe de sols sur fortes pentes	33115
J	Affleurements rocheux	9004
NC	Non cartographié	Variable – Interpolé avec la fonction « Shrink » d'ArcGIS : remplacement par les cellules les plus fréquentes dans le voisinage
OE	Fosses d'extraction	9000
ON	Remblais	9000
OT	Terrains remaniés	9000

Tableau 5 : Codes attribués aux différentes séries spéciales luxembourgeoises présentes sur la zone d'étude. Les séries spéciales sont issues à la fois de la carte de sols au 1 :25.000 et de la carte d'association de sols au 1 :100.000. La série spéciale L est assimilé à un GDp1 (32224) et la série spéciale R est assimilée à un Gbbfi6 (33111).

GDL		
Sigle	*Description*	*Code*
A	Fonds de vallons argileux	9005
D	Remblais	9000
Eau	Eau	9001
Etang	Etang	9001
FE	Fosses d'extraction	9000
J	Affleurements rocheux	9004
L	Fonds de vallons limoneux	32224
M	Mares	9001
R	Fonds de vallons rocailleux	33111
S	Zones de sources et de suintement	9003
TR	Terrains remaniés	9000
ZB	Zones bâties	9002
27	Zone de suintement	9003
30	Zones bâties (1969)	9002
32	Lac	9001

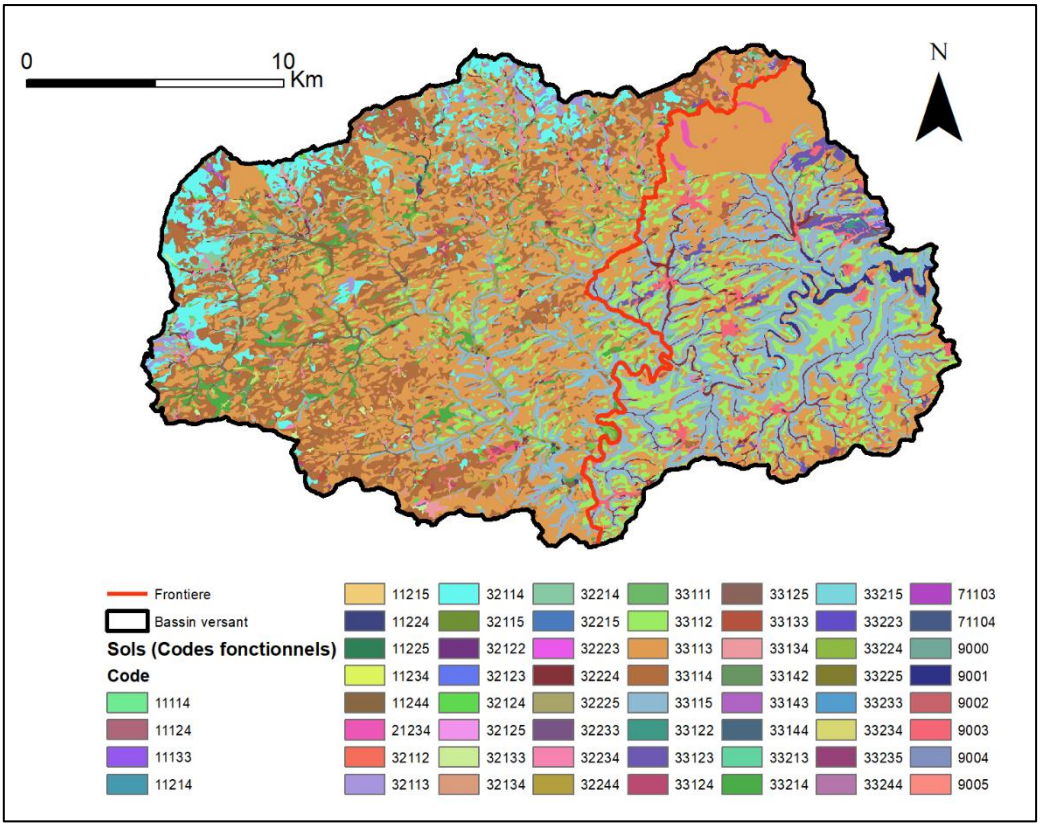


Figure 14 : Carte des sols fonctionnels pour le bassin versant de la Sûre à Esch-sur-Sûre

Comme le montre la Figure 15, les sols de la zone d'étude présentent à plus de 96% des textures argilo-limono-caillouteuse. Le reste est constitué d'inclusions de sol à texture limoneuse, d'argiles légères, de tourbières et de séries spéciales. Près de 78 % des sols de la zone d'étude sont décrits comme caillouteux à très caillouteux, ce qui correspond respectivement à une charge caillouteuse de plus 15 % à plus de 50 % (Figure 16). Le reste est essentiellement constitué de sols peu caillouteux, c'est-à-dire avec une charge de 5% à 15%. Ils se retrouvent principalement sur la partie wallonne du bassin versant à son extrémité ouest à nord-ouest. Le classes de drainage des sols sont quant à elles essentiellement déterminées comme excessives à légèrement excessives ou favorables sur la zone d'étude (Figure 17). On retrouve les classes de drainage les moins favorables dans les fonds de vallées. On remarque également que les fonds de vallées en Wallonie sont souvent classés avec des drainages moins bons que les fonds de vallées du côté luxembourgeois de la zone d'étude. Les sols sur la zone d'étude ont majoritairement des profondeurs comprises entre 40 et 80 cm (40 %) ou de plus de 80 cm (36 %) (Figure 18). Les sols les plus profonds se retrouvent sur la partie wallonne de la zone d'étude. Sur la partie luxembourgeoise, on recense de nombreux sols avec une profondeur entre 20 et 40 cm ou bien décrits comme ayant une profondeur variable. Très peu de sols avec une profondeur de plus de 80 cm sont décrits du côté du GDL. Cette répartition de la profondeur des sols et les classes variables peuvent être mis en lien avec le relief plus escarpé de la partie luxembourgeoise par rapport à la partie wallonne, comme cela est mis en évidence par la carte des pentes (Figure 10).

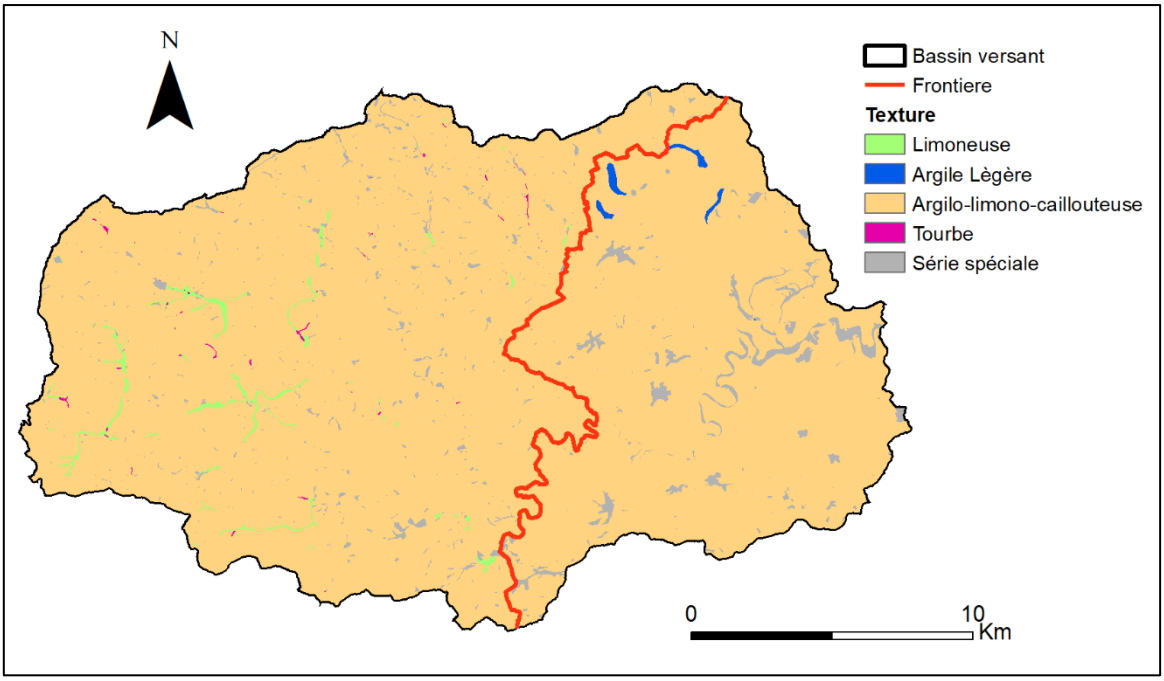


Figure 15 : Textures des sols sur la zone d'étude

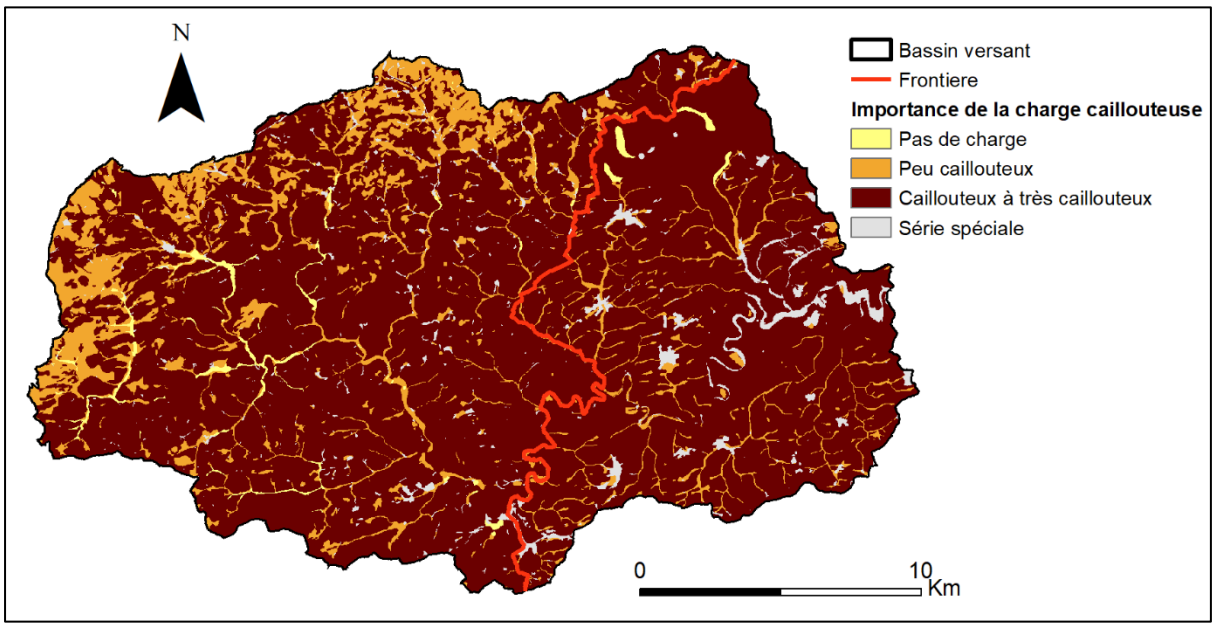


Figure 16 : Importance de la charge caillouteuse des sols sur la zone d'étude

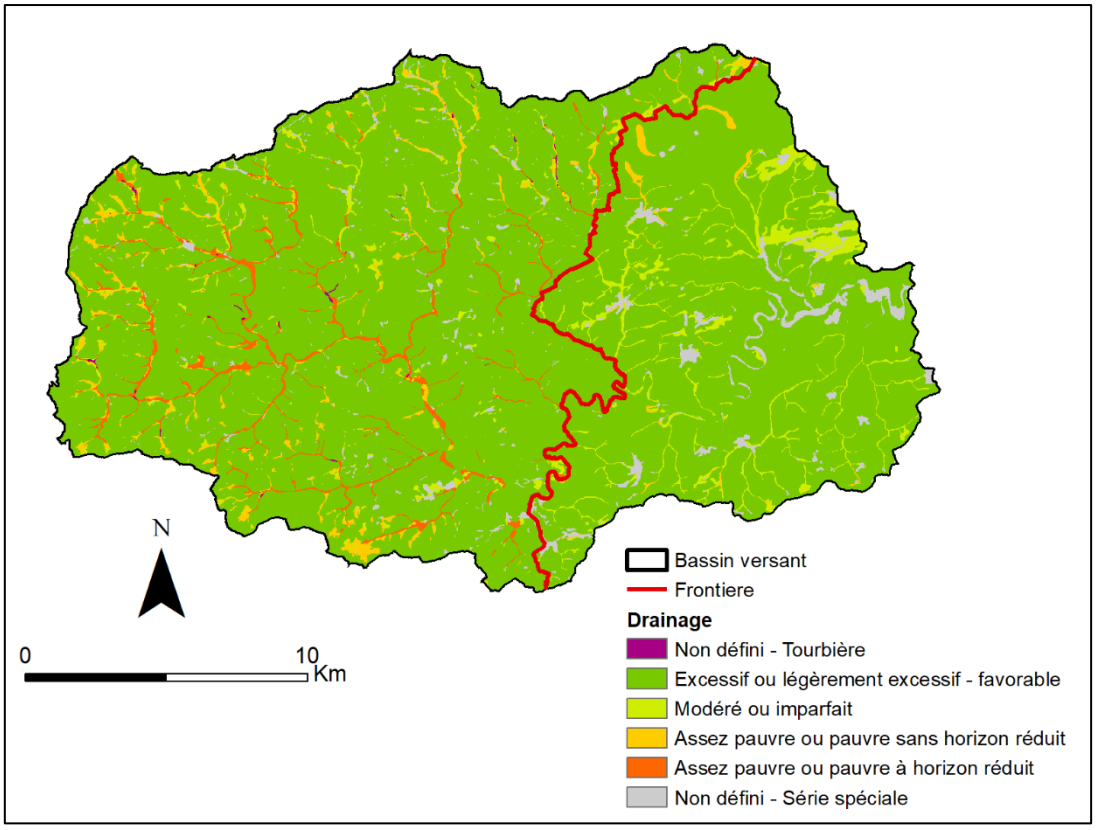


Figure 17 : Classes de drainage des sols sur la zone d'étude

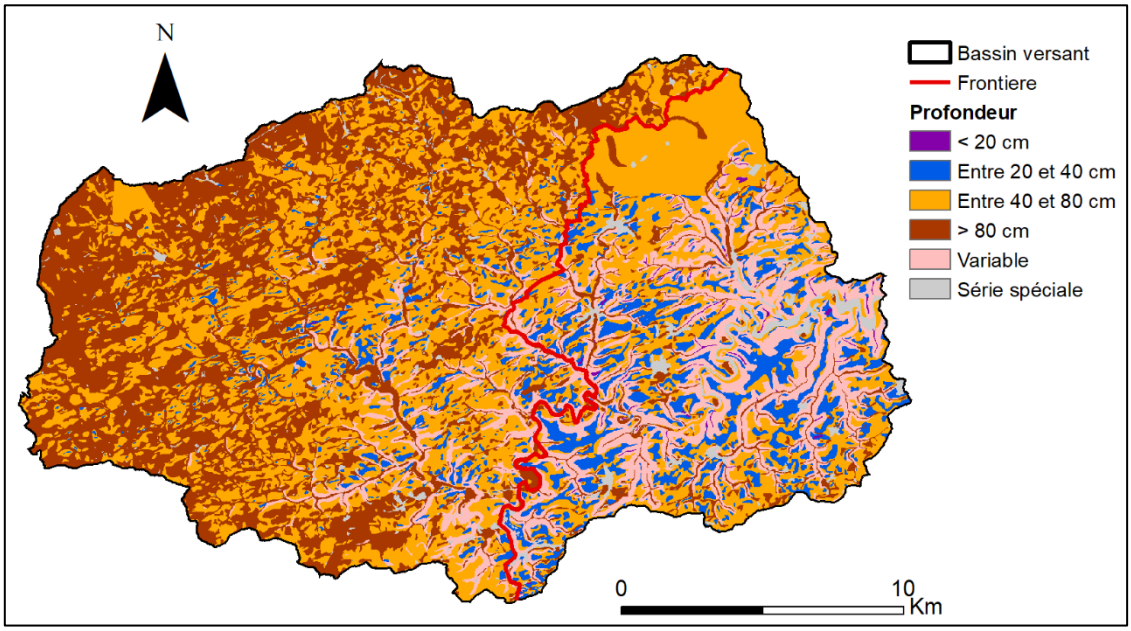


Figure 18 : Classes de profondeur de sol sur la zone d'étude

Une fois les regroupements de sols effectués, il convient de paramétrer chacun des sols fonctionnels pour l'intégrer au modèle SWAT. Chaque nouveau code doit être intégré dans la base de données de SWAT avec ses caractéristiques descriptives. Il a été choisi de paramétrer les sols wallons et luxembourgeois de la même manière en se basant sur les données luxembourgeoises. Cette hypothèse a été prise en raison de l'uniformité des assises géologiques des deux côtés de la frontière. Pour chaque regroupement de sols, il est tout d'abord nécessaire de spécifier : le nombre de couches, le groupe hydrologique ainsi que l'érodibilité du sol [t m^2hr) / (m^3t cm)] (Bah et al. 2016). Il a été constaté que la classification des groupes hydrologiques des sols sur base des informations existantes est très différente entre la Wallonie (Demarcin et al. 2011) et le GDL (Bah et al. 2016) (Figure 19). Il a donc été décidé de procéder à un travail de reclassification des groupes hydrologiques de sol en se conformant à la partie luxembourgeoise qui place la majorité des sols dans le groupe hydrologique A. Cette hypothèse se base notamment sur différentes études du LIST, du KIT du projet CAOS (Scaini et al., 2018, Martinez-Carreras et al., 2016 et Jackish et al., 2016) et sur le mémoire de Nau (2015) qui montrent des vitesses d'infiltration et de conductivité hydraulique à saturation importantes sur les sols de l'Oesling. Suite à ce travail de reclassification, 89% de la surface du bassin versant se retrouvent dans le groupe hydrologique A et 6 % dans le groupe hydrologique B (Figure 20). Les fonds de valons limoneux sont repris dans le groupe hydrologique B et les fonds de vallons argileux, les zones de suintement ainsi que les zones urbaines sont classés dans les deux groupes hydrologiques les plus défavorables à savoir C et D.

Pour chaque horizon pédologique des regroupements fonctionnels de sols, 9 paramètres ont ensuite été intégrées dans la base de données de SWAT. Pour chacun de ces paramètres, le Tableau 6 indique les méthodes d'estimation ainsi que les sources de données employées. Pour plus de détails sur chacun des paramètres, nous renvoyons vers le chapitre 22 « SWAT Input :SOL » de la documentation officielle du modèle SWAT 2012 (Arnold et al., 2012). Nous attirons l'attention sur le fait qu'il faut renseigner pour chacun des paramètres une valeur. Afin de définir la profondeur des horizons pédologiques A, B, et C des sols caillouteux, une moyenne a été effectuée par phase de profondeur sur base des données de profils récents et historiques du GDL (BDSOL) (Tableau 7). Le Tableau 8 montre à titre illustratif la manière dont le sol dominant du bassin versant (Gbbfi2) a été paramétré.

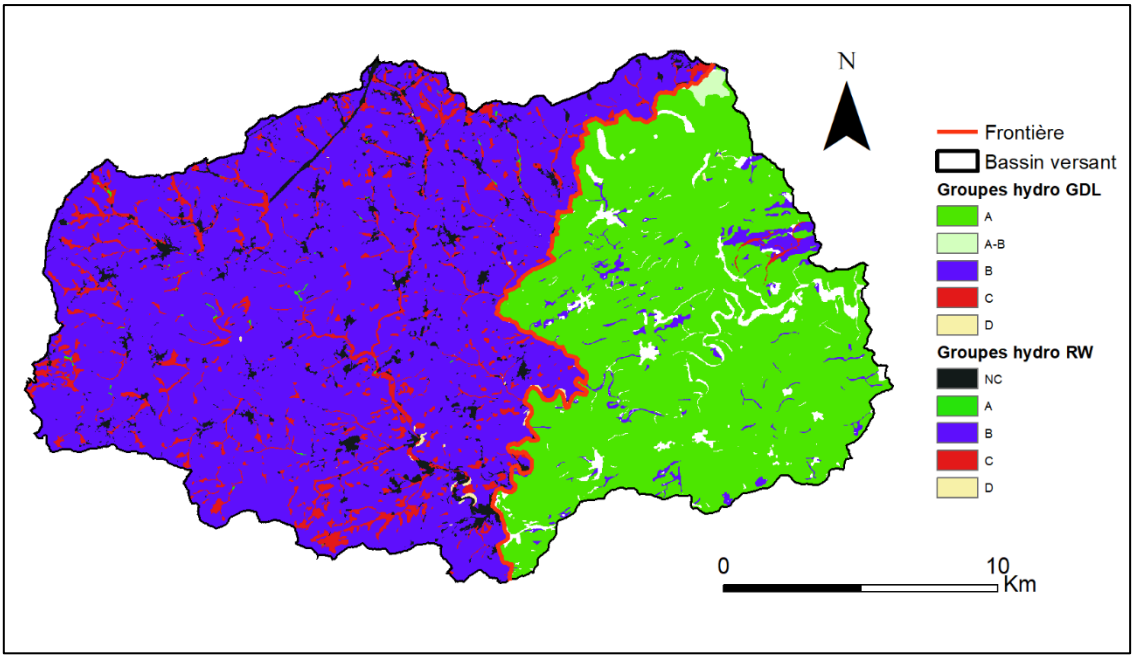


Figure 19 : Groupes hydrologiques de sol sur base des informations wallonnes et luxembourgeoises

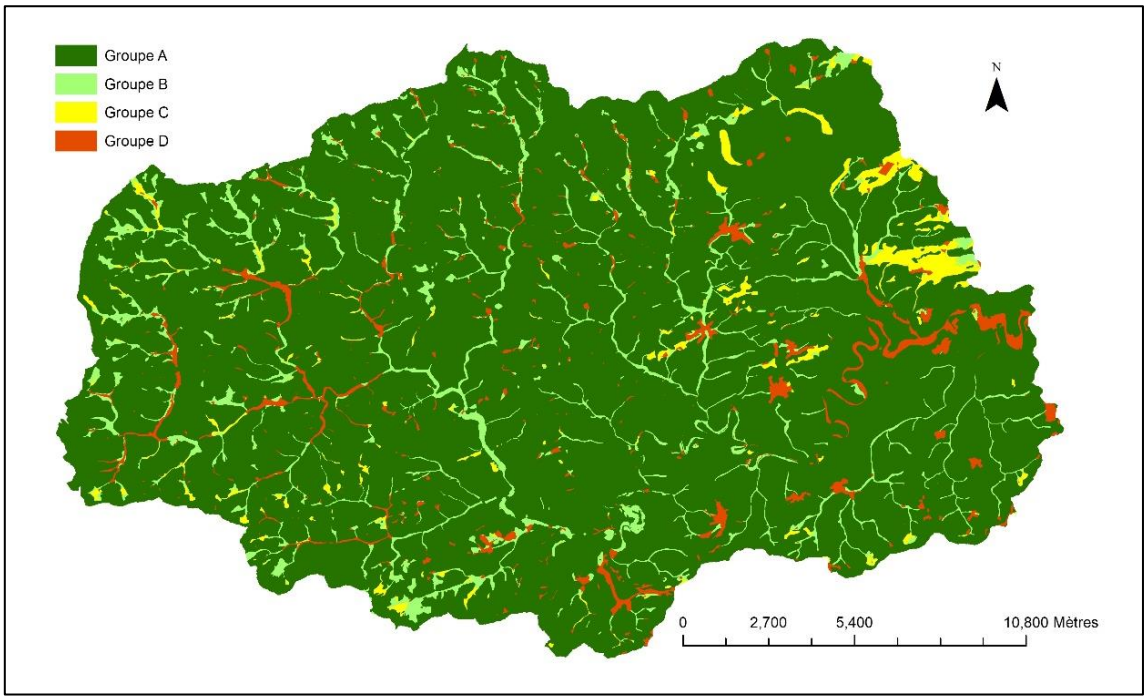


Figure 20 : Groupes hydrologiques de sol après homogénéisation des données et reclassification

Tableau 6 : Méthodes d'estimation et sources de données employées pour la paramétrisation des sols dans SWAT

Paramètre	Unité	Source de données	Méthode
Profondeur des horizons	cm	Profils historiques et récents	Moyenne par phase de profondeur des profils
Granulométrie	%sable (>2mm), %limon (50µm-2 µm), %argile (<2µm)	Carte de la texture par régression kriging	Moyenne par groupement
Pourcentage volumique en éléments grossiers	%	Profils récents BDsol, Profils historiques de l'ASTA, TFE J. Nau	Estimation sur le terrain de la profondeur de phase Moyenne par groupement après conversion de la charge massique [Cm] en volumique [Cv] selon l'équation Cv=0,4943·Cm+0,482
Carbone organique de surface	%	Carte du carbone organique (Stevens et van Wesemael, 2014) par Generalized Additive Model	Moyenne par groupement et par occupation des sols (Forêt, prairies, culture)
Carbone organique : Horizon B et Horizon C	%	Fonction décroissance de type puissance en fonction de la profondeur du sol et de l'occupation du sol-basée sur les analyses des profils historiques	Moyenne par groupement et par occupation des sols (Forêt, prairies, culture)
Densité apparente	g/cm^3	Estimation via la fonction de pédotransfert de Rawls adaptée sur base des données de l'Asta et de la littérature, ajusté par un facteur correctif selon l'occupation (terres arables, prairies, forêt)	$\rho_{t0} = \frac{100}{\frac{MO}{\rho_{MO}} + \frac{100-MO}{\rho_{minéral}}} + C$
Réserve utile	mm/mm de sol	Fonction de pédotransfert sur base des valeurs de la BDsol-	$RU = \sum_{i} Ep \ * 100 * (\theta_{2,5} - \theta_{4,2}) * (100 - Charge_{volumique})$ Les teneurs en eau caractéristiques sont déterminées à partir de la texture, du C_{org} et de la densité.
Conductivité hydraulique à saturation		Fonction de pédotransfert sur base de 78 valeurs de la BDsol	F(%Argile,%Limon,%TOC)

Tableau 7 : Nombre de profils utilisés pour déterminer la profondeur moyenne des horizons pour les sols caillouteux.

Code profondeur	Phase de profondeur	Nombre de profils ayant servi à l'estimation	Horizon A	Horizon B	Horizon C
1	G…6	-	0-15 cm		
2	G…3 G…4	17	0-25 cm	25-48 cm	48-70 cm
3	G…2 G…7	48	0-25 cm	25-57 cm	57-78 cm
4	G…1 G..1	15	0-25 cm	25-63 cm	63-97 cm
5	G…P	11	0-25 cm	25-57 cm	57-78 cm[6]

Tableau 8 : Valeurs renseignées pour le sol dominant sur le bassin versant (Gbbfi2, code fonctionnel 33113)

	Code fonctionnel : 33113	**Prof. sup (cm)**	**Prof. inf (cm)**	**Sable**	**Limon**	**Argile**	**Vol >2mm**	**TOC**	**Densité apparente**	**Θ à pF 2.5**	**Θ à pF 4.2**	**RU**	**Ksat initial**
Horizon	**Unité/Type d'occupation du sol**	**cm**	**cm**	**%**	**%**	**%**	**%**	**%**	**g/cm³**	**%vol**	**%vol**	**mm/mm de sol**	**mm/h**
A	Culture	0	25	22	53	25	16	3,4	1,18	43,54	23,41	0,17	1206
	Prairie	0	25	22	53	25	16	4,3	1,08	43,54	23,41	0,17	1454
	Forêt	0	25	22	53	25	16	5,2	0,90	43,54	23,41	0,17	1660
B	Culture	25	57	21	52	26	17	0,8	1,42	41,66	24,20	0,14	388
	Prairie	25	57	21	52	26	17	0,9	1,33	41,66	24,20	0,14	396
	Forêt	25	57	21	52	26	17	1,0	1,24	41,66	24,20	0,14	432
C	Culture	57	78	29	50	22	25	0,5	1,46	39,20	21,29	0,13	300
	Prairie	57	78	29	50	22	25	0,5	1,38	39,20	21,29	0,13	327
	Forêt	57	78	29	50	22	25	0,6	1,29	39,20	21,29	0,13	355

4.7. Extraction des données météorologiques

Les données météorologiques ont été extraites des stations météorologiques PAMESEB et Agrimeteo présentées à la Figure 5. Les données du SPW n'ont pas été utilisées car ces stations ne fournissent pas de données de température. Pour les données luxembourgeoises, lorsque des données étaient manquantes, elles ont été approximées sur base des stations météorologiques les plus proches s'il s'agissait de grandes plages de données manquantes ou de données de précipitations ou bien interpolées sur base des données antérieures et postérieures lorsqu'il s'agit de données uniques pour les températures.

[6] Sur les fortes pentes, la profondeur est très variable. Les quelques profils sélectionnés montrent une profondeur médiane de 60 cm, ils pourraient être nécessaire de calibrer ce paramètre.

5. Calibration du modèle SWAT sur la zone d'étude

Etant donné que les séries temporelles de débits disponibles sont courtes pour les bassins versants de la partie luxembourgeoise (depuis fin 2015), la calibration et la validation ne peuvent pas être effectuée pour un même bassin versant. Etant donnée qu'au début de ce travail l'information sur les cultures étaient manquantes en Wallonie pour l'année 2017, seuls deux bassins versants pouvaient être modélisés car il s'agissait des seuls entièrement situés au GDL. Il s'agit du bassin versant de la station de Schéimelzerbesch et de celui de la station de Grondmillen. Il s'agit de deux bassins versants contigus dont les stations de mesure sont situées sur des affluents de la Sûre à 2 km en amont de celle-ci (Figure 2). Les stations de mesure sont distantes de moins de 1 km. Les caractéristiques physiques, pédologiques et d'occupation du sol des deux bassins versants sont relativement proches. Il a été décidé d'opérer la calibration du modèle sur le bassin versant de Schéimelzerbesch et d'utiliser celui de Grondmillen pour sa validation ainsi que les autres bassin versants après acquisition des données du parcellaire agricole wallon pour l'année 2017. Etant donné que SWAT nécessite plusieurs années de « préchauffage »[7], que l'année 2015 présente peu de données de débits mesurés pour les stations du GDL (fin octobre, début novembre) et que les cultures présentent en 2018 ne sont pas connues, les simulations sont effectuées sur la période 2012 à 2017 en considérant 4 années de préchauffage du modèle (2012-2015). Les débits simulés sur 2016 et 2017 sont quant à eux utilisés pour la calibration et la validation du modèle.

5.1. Le bassin versant de la station de Schéimelzerbesch

Le bassin versant de Schéimelzerbesch présente une superficie de 16,16 km² (Figure 21). Le réseau hydrographique y est relativement dense et les pentes sont élevées puisque près de 30 % d'entre elles sont supérieures à 20 % (Figure 22). Le bassin versant est peu urbanisé car moins de 4 % de la surface est artificialisé (Figure 23). L'occupation du sol est essentiellement composée de surfaces forestières (42%) et agricoles (53%) dont une proportion non négligeable de prairies permanentes sur la période 2015 à 2017 (19%).

[7] Le préchauffage (Warm-up period) correspond à faire tourner le modèle sans chercher à calibrer les débits simulés mais cela permet d'établir un équilibre hydrique réaliste pour débuter la calibration.

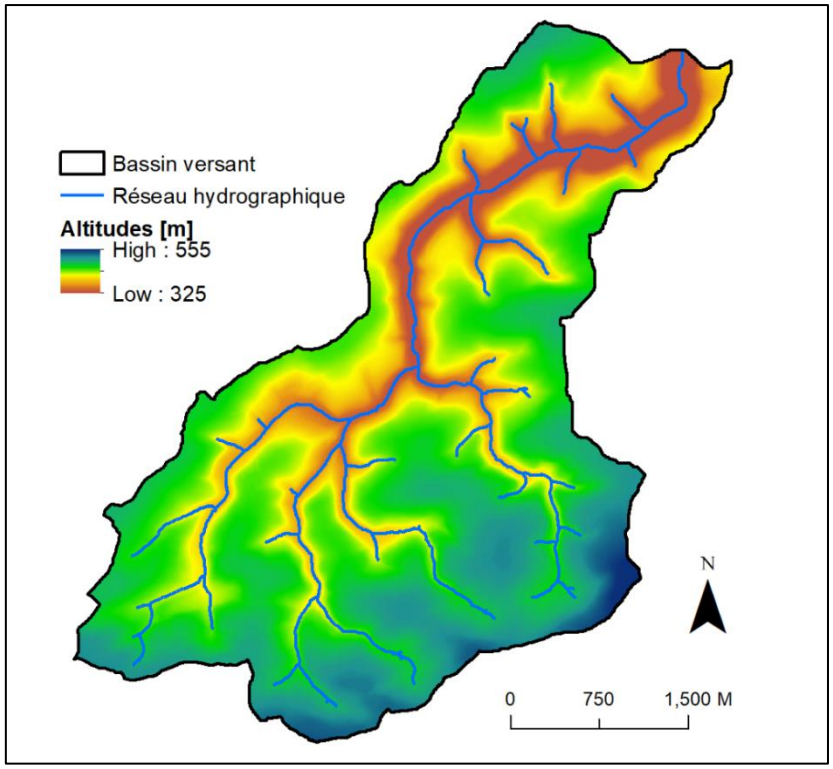


Figure 21 : Bassin versant de la station de Schéimelzerbesch

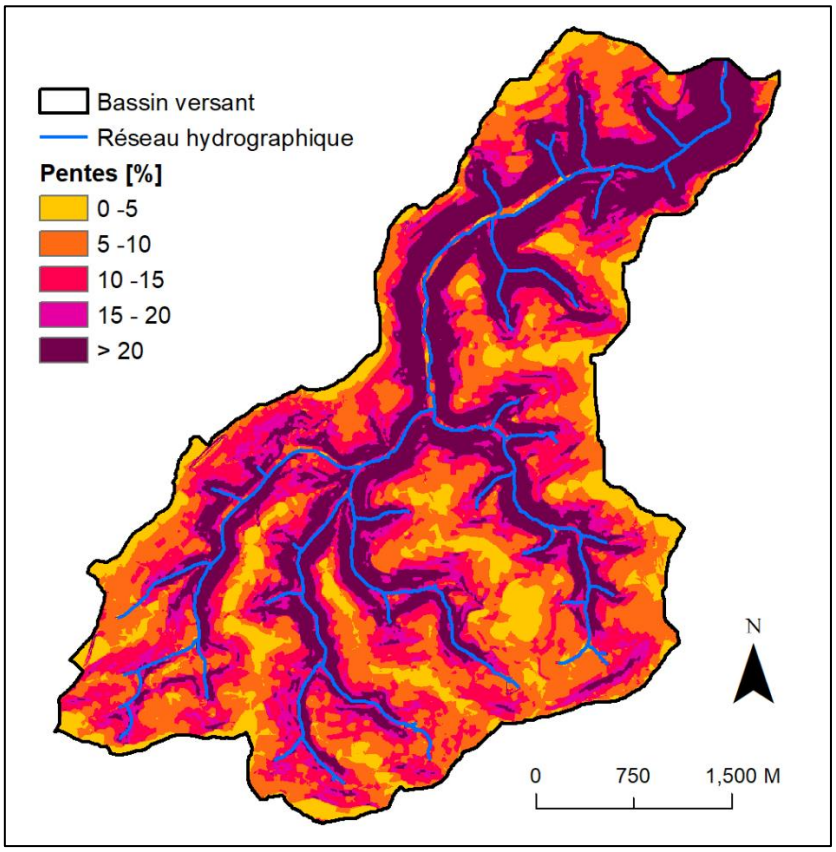


Figure 22 : Pentes du bassin versant de la station de Schéimelzerbesch

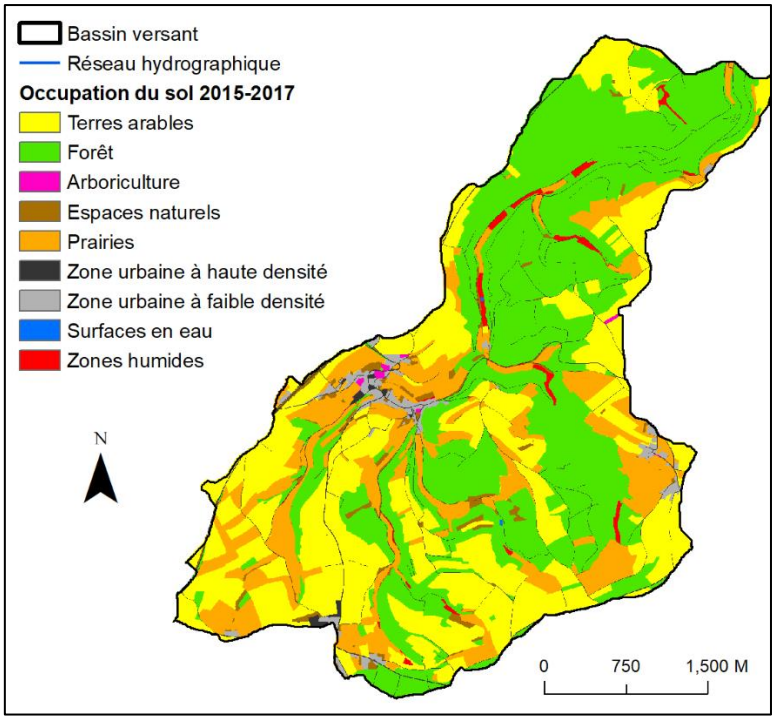


Figure 23 : Occupation du sol du bassin versant de la station de Schéimelzerbesch

Les sols du bassin versant sont à texture argilo-limono-caillouteuse avec une charge principalement définie comme caillouteuse à très caillouteuse (Figure 24). Sur les plateaux, on retrouve principalement des sols à bon drainage avec une profondeur modérée comprise entre 40 et 80 cm. On y retrouve également quelques poches de sols plus profonds (> 80 cm). Sur les versants la profondeur est définie comme variable. Peu de sols présentent des problèmes de drainage.

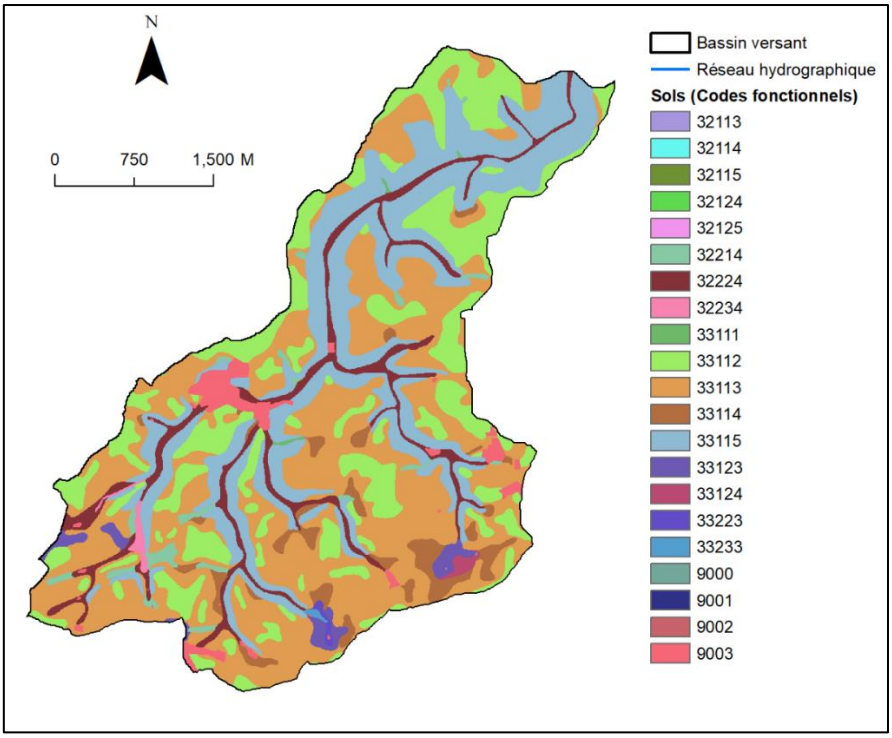


Figure 24 : Sols du bassin versant de la station de Schéimelzerbesch

5.2. Paramétrisation du bassin versant de la station de Schéimelzerbesch

5.2.1. Délimitation des sous-bassins versants

Le MNT hydrologique a été extrait sur le bassin versant de Schéimelzerbesch et les couches de Flow Direction et de Flow Accumulation en ont été dérivées. La Toolbox ArcHydro d'ArcGIS a ensuite été utilisée pour segmenter le réseau hydrographique et définir les sous-bassins versants qui seront utilisés dans ArcSWAT. L'annexe 7 expose la méthodologie pour aboutir à ce résultat (Figure 25). Chaque cours d'eau est apparenté à un sous-bassin versant et la table d'attributs de ces deux couches vectorielles fournit les connexions entre les segments du réseau hydrographique et les sous-bassins versant. Une fois la segmentation des cours d'eau et la délimitation des sous-bassins versants effectuées dans ArcGIS, ces couches peuvent être renseignées dans le module « Watershed Delineator » afin d'être intégrées dans la base de données du modèle.

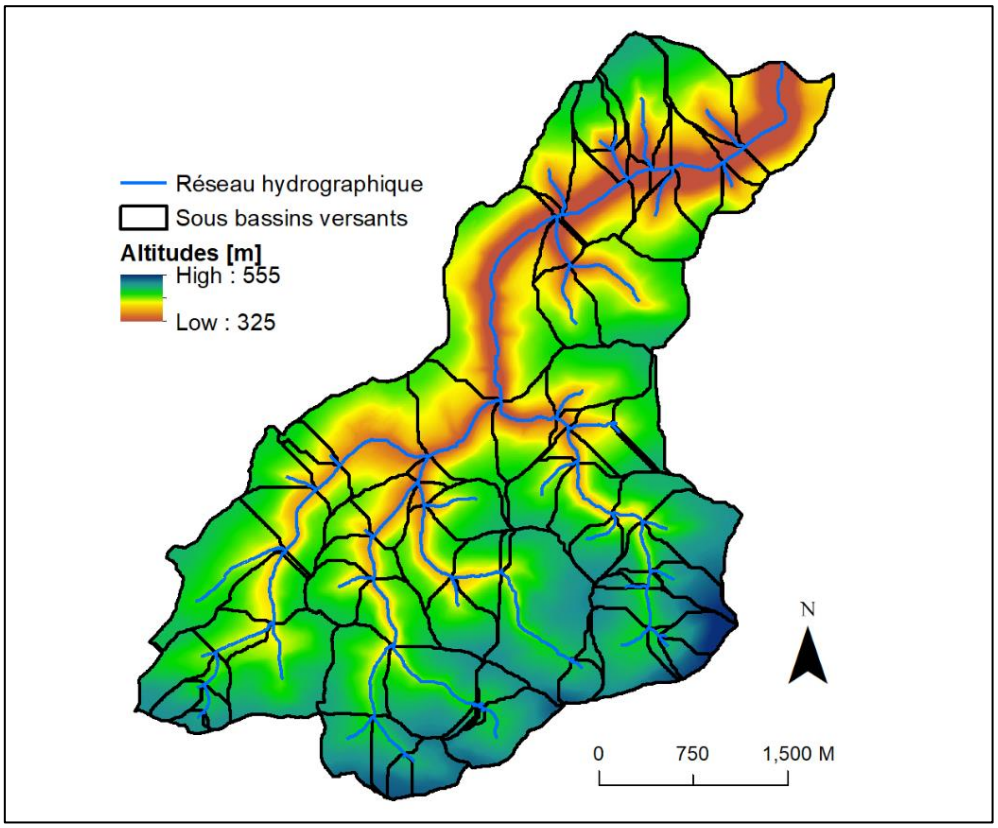


Figure 25 : Segmentation du réseau hydrographique et découpage du bassin versant de la station de Schéimelzerbesch en 85 sous-bassins versants

5.2.2. Délimitation des HRUs

Après avoir délimité les sous-bassin versants, les HRUs peuvent été déterminées via le menu « HRU Analysis » d'ArcSWAT. Cependant, avant de créer les HRUs, il faut mettre à jour la base de données « SWAT2012.mdb » relative aux paramètres des sols du BV et aux paramètres culturaux des successions culturales du bassin versant.

Les codes des successions culturales extraites des cartes des parcellaires culturaux et d'occupation du sol en Wallonie et au GDL ont été intégrés dans la table « crop » de la mdb SWAT2012. Les paramètres requis pour chaque succession culturale sont ceux de la première culture intervenant dans la succession culturale (Annexe 8). Lorsque l'on renseigne à ArcSWAT la carte d'occupation du sol général du bassin versant ainsi que la table de reclassification entre les valeurs du raster et les codes de successions culturales/occupation du sol, ce dernier peut dès lors faire le lien avec les codes qui sont renseignés dans la base de données SWAT2012.

Concernant les sols, de nombreux paramètres physico-chimiques sont nécessaires pour chaque code de sol issu du regroupement des séries pédologiques des cartes des sols wallonne et luxembourgeoise. Les sols fonctionnels (Figure 14) du bassin versant de la Sûre à Esch-sur-Sûre ont été paramétrés par l'ASTA en renseignant chacun des paramètres dans un tableur Excel. Il est à noter que pour chaque code de sol, une distinction est faite pour la teneur en matière organique selon que le sol se trouve sous culture, prairie ou forêt. Il en résulte que pour chaque code de sol, le suffixe de 1, 2 ou 3 a été ajouté à la valeur du code fonctionnel selon qu'il s'agit respectivement d'un sol sous culture, prairie ou forêt. De même pour chaque sol, le groupe hydrologique est indiqué dans la valeur du code fonctionnel avec le préfixe 1, 2, 3 ou 4 selon que le sol appartient respectivement au groupe hydrologique A, B, C ou D afin de faciliter la paramétrisation des HRUs qui seront créées, le CN variant pour une même occupation du sol en fonction du groupe hydrologique de sol.

Comme pour l'occupation du sol, à la couche raster des sols fonctionnels est joint une table de reclassification qui permet de faire la correspondance entre la valeur renseignée dans le raster et le code sol qui sera utilisé dans SWAT. Les codes sols de SWAT sont composés du code lié au regroupement effectué (Figure 13 ; Tableau 4 et Tableau 5) ainsi qu'un préfixe A, B, C ou D selon le groupe hydrologique du sol et le suffixe C (Culture), P (Prairie) ou F (Forêt) selon l'occupation du sol. Un script permet d'intégrer les sols spécifiques au bassin versant et leurs paramètres dans la table « usersoils » de la mdb SWAT2012 (Annexe 9). Ceci évite de devoir encoder manuellement chaque sol via l'interface ArcSWAT. Lorsque ces différentes opérations ont été effectuées, on importe le raster sol dans ArcSWAT pour définir les HRUs et on renseigne la table de reclassification permettant de faire le lien entre les valeurs du raster et les codes sol encodés dans la base de données SWAT2012.mdb.

Concernant les pentes, 5 classes de pentes ont été renseignées à savoir 0-5%, 5-10%, 10-15%, 15-20% et > 20%. Pour finir, un seuil de 0% est choisi dans l'option « Multiple HRU » de la fonction « HRU définition » afin de délimiter le plus de HRUs possibles.

5.2.3. Paramétrisation des données météorologiques

Les données de précipitation et de température de la station d'Arsdorf avec un pas de temps journalier ont été utilisées et chargées dans ArcSWAT. Il s'agit de séries temporelles météorologiques du 1er janvier 2012 au 31 décembre 2017.

5.2.4. Création et modification des tables d'entrée

Une fois les HRUs créées et les données météorologiques renseignées, le modèle crée les tables d'entrée (Input Tables) qui seront utilisées lors de la modélisation. Une HRU possède plusieurs tables d'entrée qui reprennent les informations sur le sol et ses caractéristiques, les paramètres d'écoulement profond, la végétation, …

Opérations culturales

Avant de pouvoir procéder aux simulations, il convient de modifier les fichiers avec l'extension « mgt » (Management). Ces fichiers reprennent les différentes opérations effectuées sur chaque HRU et qui dépendent de l'occupation du sol / succession culturale en place. Pour chaque succession culturale, il faut définir le calendrier relatif aux dates de semis et de récolte des différentes cultures. Lorsqu'une culture est implantée, le CN de la culture est renseigné dans le champ 'CN_OP ». Lorsqu'une culture est récoltée, le CN d'un sol nu est renseigné dans le même champ. Les CNs utilisés sont ceux renseignés dans l'Annexe 8. Comme la valeur de CN varie en fonction du groupe hydrologique de sol, il faut créer un calendrier cultural pour chaque culture en fonction du groupe hydrologique de sol renseignée en première position dans le code sol. Enfin, comme le modèle comporte 4 années de préchauffage et deux années de simulations, il convient de renseigner une occupation du sol pour les années 2012 à 2014. Il a été décidé pour simplifier les choses pour cette période de préchauffage du modèle de considérer pour les surfaces cultivées une succession de céréales d'hiver. Les calendriers culturaux des différentes successions culturales selon le groupe hydrologique du sol identifié sur la période 2015-2017 ont été créés et intégrés à la table « op Schedule » de la mdb SWAT 2012. Pour les autres occupations du sol, les paramètres LAI, BIO_INIT, … ont été renseignés selon les valeurs reprises à l'Annexe 8.

Ecoulements souterrains

Les différents paramètres des aquifères sont repris dans les tables avec l'extension « gw » (Groundwater) où ils peuvent être modifiés. Le bassin versant présente des sols où l'eau s'infiltre facilement et percole rapidement jusqu'à une couche de schiste située entre 2 et 5m qui est imperméable. Nous avons donc choisi de fixer une valeur de profondeur d'eau initiale dans la nappe superficielle (SHALLST) relativement faible de manière à correspondre à une accumulation d'eau sur le schiste situé entre 2 et 5 m. Cette valeur a été fixée à 2000 mm.

Le transfert de l'eau du fond du profil jusqu'à la nappe superficielle (GW_DELAY) étant plutôt rapide, nous avons fixé un temps de transfert de 1 jour, en se référant aux études du LIST (Scaini et al. 2018). Le schiste étant quasiment imperméable à l'exception des fissures, un coefficient de transfert entre l'aquifère superficiel et profond (RCHRG_DP) de 0.1 % a été fixé. Le seuil de profondeur de l'eau dans l'aquifère superficiel (GWQMN) à partir duquel le flux d'eau retourne au réseau hydrographique a été fixé de manière arbitraire à 750 mm. La profondeur initiale de l'eau dans l'aquifère profond a été fixé à 3000 mm. Il est à noter que la manuel SWAT précise que cette valeur est optionnelle et est ajustée lors de la phase de préchauffage du modèle. Le facteur alpha du débit de base (ALPHA_BF) qui rend compte de la réponse de l'aquifère à des changements dans la recharge a été déterminé à l'aide du logiciel Baseflow Filter Program téléchargeable sur le site du modèle SWAT. Il ressort de l'analyse des débits par le programme une valeur de 0.2656 [jour^{-1}], ce qui correspond à une récession assez lente. Pour les autres paramètres, les valeurs par défaut ont été conservées.

5.3. Résultats du modèle sans calibration

Le modèle avec la paramétrisation exposée dans les paragraphes précédents a été exécuté en considérant 4 années de préchauffage (2012 à 2015) et les deux années complètes de données de débits (2016 et 2017) comme résultats de la simulation. La fonction « SwatCheck » a ensuite été exécutée et montre que les paramètres choisis reflètent le comportement attendu du bassin versant quant à la répartition des flux (Figure 26). Il est attendu que les écoulements souterrains soient prédominants sur le bassin versant (Wrede et al. 2015). Le ruissellement est en effet faible avec environ 15 mm par an alors que les flux souterrains sont les plus importants avec près de 303 mm liés à de l'écoulement hypodermique et 69 mm liés à des échanges entre l'aquifère peu profond et le réseau hydrographique.

La recharge de l'aquifère profond c'est-à-dire l'infiltration dans la couche inaltérée de schiste est quasiment nulle. Si d'un point de vue conceptuel, le modèle tel qu'il a été paramétré semble plutôt correct, la Figure 27 montre que les débits simulés à l'exutoire sont assez éloignés des débits observés. Les indicateurs de performance des différentes fonctions objectives sont faibles avec un R^2 de 0.28, un coefficient de Nash-Sutcliffe (NS) de -0.09 et un coefficient d'efficience Kling-Gupta (KGE) de 0.51. La calibration doit donc servir à reproduire au mieux la dynamique et l'intensité des débits.

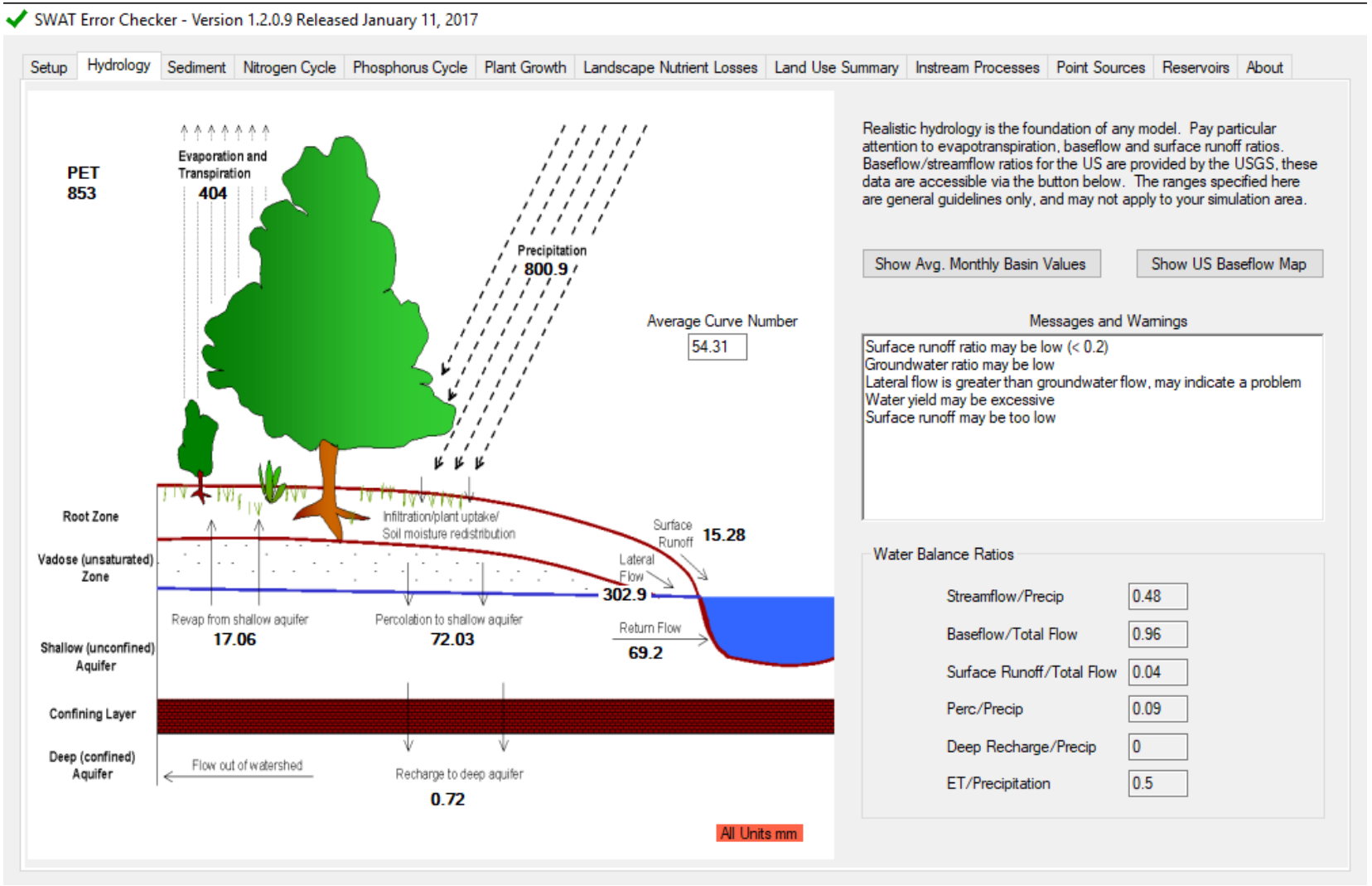


Figure 26 : Informations issues de la fonction "SwatCheck" appliquée aux résultats du modèle non calibré pour les années 2016-2017 sur le bassin versant de la station de Schéimelzerbesch

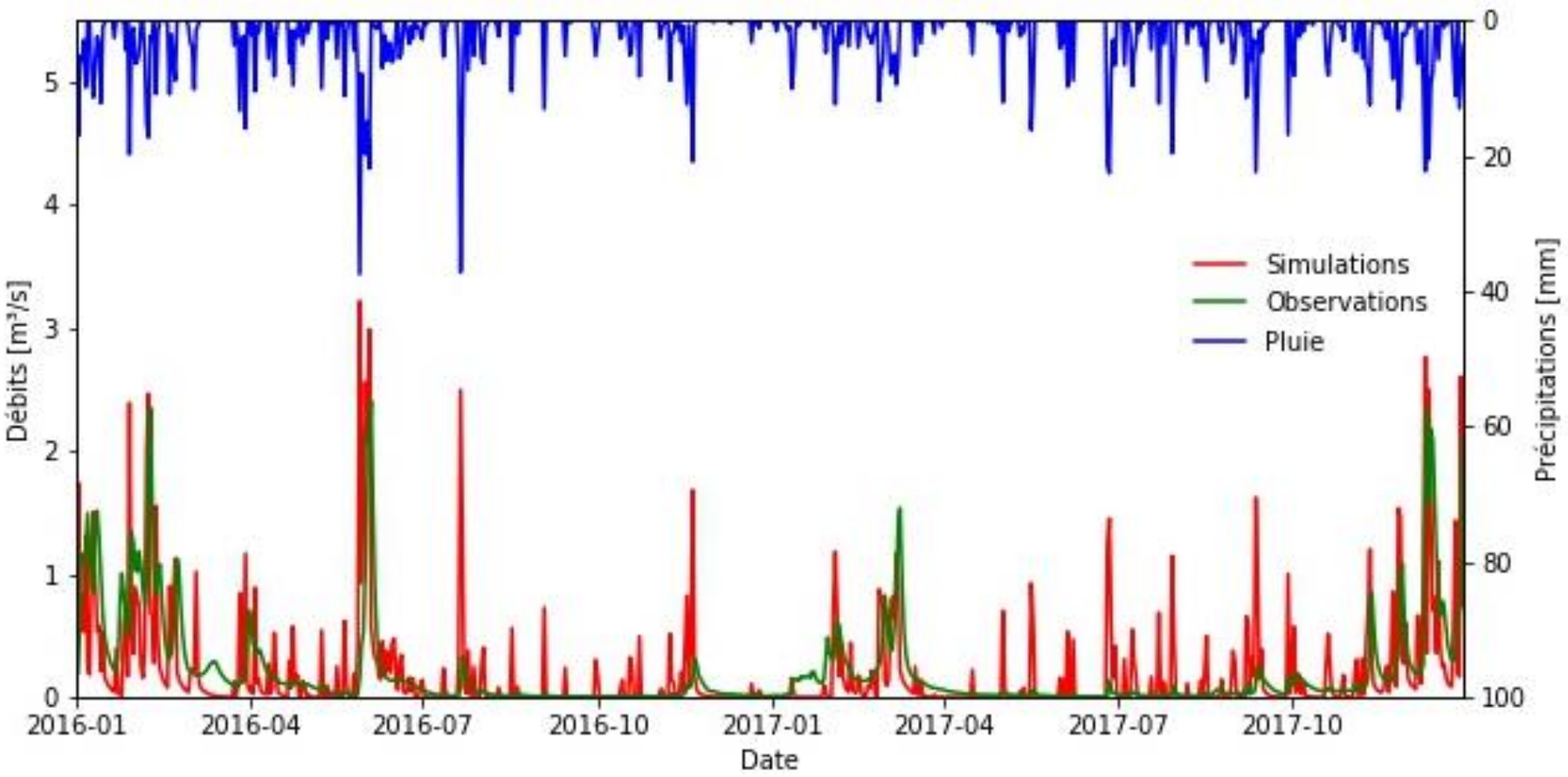


Figure 27 : Comparaison des débits observés et simulés par le modèle non calibré pour les années 2016-2017 sur le bassin versant de la station de Schéimelzerbesch

5.4. Calibration du modèle

Les résultats de la simulation comptent de nombreux pics de débits qui peuvent être mis en lien avec le pattern des précipitations (Figure 27). Ceci signifie que le bassin versant, dans sa version non calibrée, est très réactif aux précipitations qui sont rapidement transférées à l'exutoire. Comme le transfert total par ruissellement de surface est assez faible sur l'année, cela indique que les transferts souterrains sont probablement trop rapides. Il convient donc d'augmenter l'inertie des transferts souterrains. Pour cela, nous avons calibré les principaux paramètres qui peuvent influencer les transferts souterrains via le logiciel SWAT-CUP. De nombreuses simulations ont été effectuées en faisant varier les paramètres présents dans les tables avec l'extension « gw » (Groundwater). La gamme de variation est celle des valeurs limites indiqués dans le logiciel SWAT CUP.

Les paramètres pédologiques qui influencent les écoulements souterrains ont également été testés. Il s'agit de la conductivité à saturation, de la capacité de rétention en eau et la densité apparente du sol. Pour les deux premiers paramètres, des simulations ont été effectuées en faisant varier de manière relative les valeurs issues de la paramétrisation de -99% à +100%. Pour les densités apparentes du sol, la gamme de variation était comprise entre -20% et +20% de manière à conserver des valeurs réalistes.

Certains des paramètres de routage du flux ont été également testés. Il s'agit notamment du paramètre CH_K2, à savoir la conductivité hydraulique effective des alluvions du lit mineur qui rend compte de la vitesse de transfert entre l'aquifère et les rivières et le paramètre ALPHA_BNK qui caractérise les courbes de récession des berges des cours d'eau. Ces deux paramètres se trouvent dans les tables avec l'extension « rte » (route).

Les paramètres ESCO et EPCO des tables avec l'extension « hru » ont aussi été testés. Le facteur ESCO est un coefficient qui permet de jouer sur l'évaporation du sol tandis que le facteur EPCO est lié à la demande évaporative. Les paramètres de températures de chutes de neige et de leur fonte (respectivement SFTMP et SMTP) que l'on peut trouver dans les tables avec l'extension « bsn » ont également été intégrés à la calibration.

Pour finir, les principaux paramètres qui influencent les écoulements de surface ont été analysés afin de déterminer leur impact sur les débits à l'exutoire. Il s'agit des facteurs CN_OP pour les étapes de semis et de récolte que l'on trouve dans les tables avec l'extension « mgt ». Il s'agit également du coefficient SURLAG qui contrôle la fraction de la quantité totale d'eau disponible qui sera autorisée à entrer chaque jour dans le réseau hydrographique. Ce paramètre se trouve dans la table avec l'extension « bsn ».

Concrètement, seuls les facteurs des tables « gw » et « sol » et les paramètres du ruissellement de surface ont été testés dans un premier temps. Seuls les paramètres ayant un impact significatif sur les différentes fonctions objectives servant à évaluer la qualité de la calibration (R^2, Nash-Sutcliffe, KGE) ont été conservés. Cet impact a été évalué sur base des analyses de sensibilité fournies par le modèle SWAT-CUP. Ceci a permis d'aboutir à un premier set de paramètres de calibration (Set#1). Ce set de paramètres a ensuite été retravaillé afin de limiter au maximum le nombre de paramètres tout en conservant des indicateurs de performance du modèle élevés. Ceci a permis d'aboutir à un set de paramètres plus restreint (Set#2).

Comme les deux premiers sets de paramètre présentaient les mêmes défauts au niveau des patterns de débits, à savoir des récessions parfois lentes et quelques pics non souhaités, un Set#3 a été créé. L'objectif était de repartir du Set#2 qui contenait le moins de paramètres et de trouver parmi les nombreux paramètres de SWAT ceux qui pouvaient potentiellement corriger ces défauts comme les paramètres ESCO, EPCO ou ALPHA_BNK.

La Figure 28 monte les résultats obtenus à partir des 3 sets de calibration et le Tableau 9 montre les paramètres utilisés pour chacun des sets et les indicateurs de performance obtenus pour la calibration du modèle. Ces résultats mettent en évidence le problème d'équifinalité lors de la calibration de modèles puisque les différents sets de paramètres permettent d'obtenir des résultats quasiment similaires. La liste des paramètres intervenant dans les différents sets est la suivante :

- **ALPHA_BF** : constante de récession du débit de base qui influence principalement les échanges entre l'aquifère peu profond et le réseau hydrographique [1/jours] ;
- **ALPHA_BNK** : constante de récession qui caractérise les flux entre l'eau stockée dans les berges des cours d'eau et le réseau hydrographique [jours] ;
- **CH_K2** : conductivité hydraulique effective des alluvions du lit mineur qui influence les pertes en eau dans le réseau hydrographique lorsque ce dernier ne reçoit pas de contribution de l'aquifère [mm/h] ;
- **CN_OP[5,]** : SCS Curve Number après récolte qui détermine la partition des précipitations entre ruissellement et infiltration [-] ;
- **ESCO** : Facteur de compensation de l'évaporation du sol qui détermine la part de l'eau disponible pour l'évaporation en fonction de la profondeur [-] ;
- **GWQMN** : seuil de profondeur de l'eau dans l'aquifère peu profond nécessaire pour que le flux vers le réseau hydrographique se produise [mm] ;
- **GW_DELAY** : temps de transfert de l'eau pour la recharge de l'aquifère peu profond depuis le bas du profil du sol [jours] ;
- **GW_REVAP** : coefficient de réévaporation des eaux souterraines [-] ;
- **RCHRG_DP** : fraction de l'eau qui percole vers l'aquifère profond [-] ;
- **SHALLST** : profondeur initiale de l'eau dans l'aquifère peu profond [mm] ;
- **SMTMP** : Température de fonte de la neige [°C] ;
- **SOL_AWC** : capacité de rétention en eau utile du sol utilisée pour déterminer la capacité au champ des horizons du profil pédologique qui lorsqu'elle est dépassée induit des écoulements latéraux [mm H_2O /mm sol] ;
- **SOL_BD** : densité apparente du sol utilisée pour déterminer la porosité de drainage des différents horizons du sol [g/cm³] ;
- **SOL_K** : conductivité hydraulique saturation qui influence à la fois la vitesse de percolation vers le bas du profil de sol et la vitesse des écoulements latéraux [mm/h].

La Figure 29 montre le lien entre le fonctionnement du cycle hydrologique de SWAT et les différents paramètres retenus.

Tableau 9 : Sets de calibration et indicateurs de performance obtenus lors de la calibration. Les valeurs indiquées sont des valeurs absolues sauf pour les paramètres avec la mention « (r) » pour lesquels la valeur est relative. (R^2 : coefficient de détermination, NS : Nash-Sutcliffe, KGE : Kling Gupta Efficiency, bR^2 : produit du coefficient de déterminantion et de la pente de la doite de régression entre données simulées et mesurées, MSE : erreur quadratique moyenne , SSQR : variance, PBIAS : estimation relative (%) de la surestimation (+) ou sous-estimation (-) des volumes totaux prédits)[8].

		Set#1	Set#2	Set#3
Paramètres	*SOL_K (r)*	-0.968	-0.968	-0.969
	SOL_AWC (r)	-0.480	-0.375	-0.560
	ALPHA_BF	0.902	0.902	0.669
	GWQMN	3112.800	3262.500	4012.500
	GW_DELAY	2.677	2.163	0.764
	CH_K2	173.800	117.500	276.250
	SHALLST	3162.500	3062.500	4275.000
	SMTMP	2.513	-	-
	SOL_BD (r)	-0.067	-	-
	GW_REVAP	0.028	-	-
	CN_OP (r)	-0.041	-	-
	RCHRG_DP	-	-	0.013
	ALPHA_BNK	-	-	0.894
	ESCO	-	-	0.729
	R^2	0.80	0.77	0.79
Calibration	NS	0.80	0.77	0.79
	KGE	0.84	0.84	0.82
	bR^2	0.63	0.63	0.63
	MSE	0.027	0.031	0.0029
	SSQR	0.0038	0.0021	0.0042
	PBIAS	5.4	7.7	10.5

Les annexes 10 à 12 montrent la sensibilité du modèle à chacun des paramètres après calibration pour les 3 sets de paramètres. Il en ressort que quel que soit le set de paramètres considéré, les paramètres les plus sensibles sont essentiellement liés aux écoulements souterrains. Le temps de transfert de l'eau entre le bas du profil de sol et l'aquifère (GW_DELAY), la profondeur initiale de l'eau dans l'aquifère peu profond (SHALLST) et la constante de récession du débit de base (ALPHA_BF) sont des facteurs très sensibles qui gouvernent les écoulements liés à l'aquifère peu profond.

La conductivité hydraulique des alluvions (CH_K2) est également un facteur sensible. Dans le Set#3, la recharge de l'aquifère profond (RCHRG_DP) est un facteur très sensible ainsi que la constante de récession qui caractérise les échanges d'eau entre les berges des cours d'eau (ALPHA_BNK) et le réseau hydrographique.

[8] Voir le manuel SWAT-CUP pour plus de détails sur les différents indicateurs de performance

La conductivité hydraulique à saturation (SOL_K) qui est un facteur très sensible avant calibration (Annexe 13) montre une moindre sensibilité après calage. Ceci s'explique par le fait que les valeurs d'origine renseignées lors de la paramétrisation sont bien trop élevées. La réserve en eau utile (SOL_AWC) est un paramètre sensible mais qui montre une gamme de variation relative assez large pour laquelle les résultats sont quasiment à leur optimum pour les 3 sets (0 à 0.5). Les autres facteurs comme la densité apparente du sol (SOL_BD) et le seuil de profondeur de l'eau dans l'aquifère peu profond nécessaire pour que le flux de retour se produise (GWQMN) ont un impact plus marginal sur les résultats. C'est également le cas du CN après récolte (CN_OP). Bien que les CN_OP pour les terres nues après récolte tendent vers des valeurs faiblement inférieures aux valeurs standards (-4%), indiquant que les sols sont légèrement moins ruisselants que prévu, les choix initiaux des groupes hydrologiques de sol et des CN standard sont donc opportuns.

Si l'on découpe la série temporelle des débits selon l'alternance des principales périodes de pics et de débits de base, on peut distinguer 6 périodes telles que définies à la Figure 28. Pour chacune de ces périodes, le coefficient de Nash-Sutcliffe (NS) a été calculé (Tableau 10). Les bilans hydriques de ces différentes périodes sont également fournis en Annexe 14 à titre informatif. Les périodes de pic P1 et P6 ainsi que la période de débit de base P3 sont les mieux simulées. Le pic P2 est bien simulé par les sets# 1 et 3 mais moins bien par le set#2. Le pic P4 est moins bien prédit que les autres pics mais les coefficients NS restent tout à fait acceptables (0.67 à 0.70). La période débit de base P5 est également moins bien prédite, particulièrement par le set#1 mais ici encore les coefficients NS restent acceptables (0.65 à 0.72). Au final les 3 sets de paramètres fournissent des résultats globalement très satisfaisants mais avec des différences plus ou moins sensibles selon la période considérée.

Tableau 10 : Coefficients Nash-Sutcliffe pour les simulations issues des sets de paramètres 1 à 3 pour les différentes périodes de pics et de débits de base observées sur le bassin versant de Schéimelzerbesch (Figure 28).

	Coefficient Nash-Sutcliffe					
	Période 1 (01/01/16 - 24/05/16)	*Période 2 (25/05/16 - 08/07/16)*	*Période 3 (09/07/16 - 04/01/17)*	*Période 4 (05/01/17 - 24/04/17*	*Période 5 (24/04/17 - 31/10/17)*	*Période 6 (01/11/17 - 31/12/17)*
Set#1	0.80	0.76	0.90	0.70	0.65	0.85
Set#2	0.78	0.65	0.92	0.69	0.70	0.82
Set#3	0.78	0.75	0.88	0.67	0.72	0.84

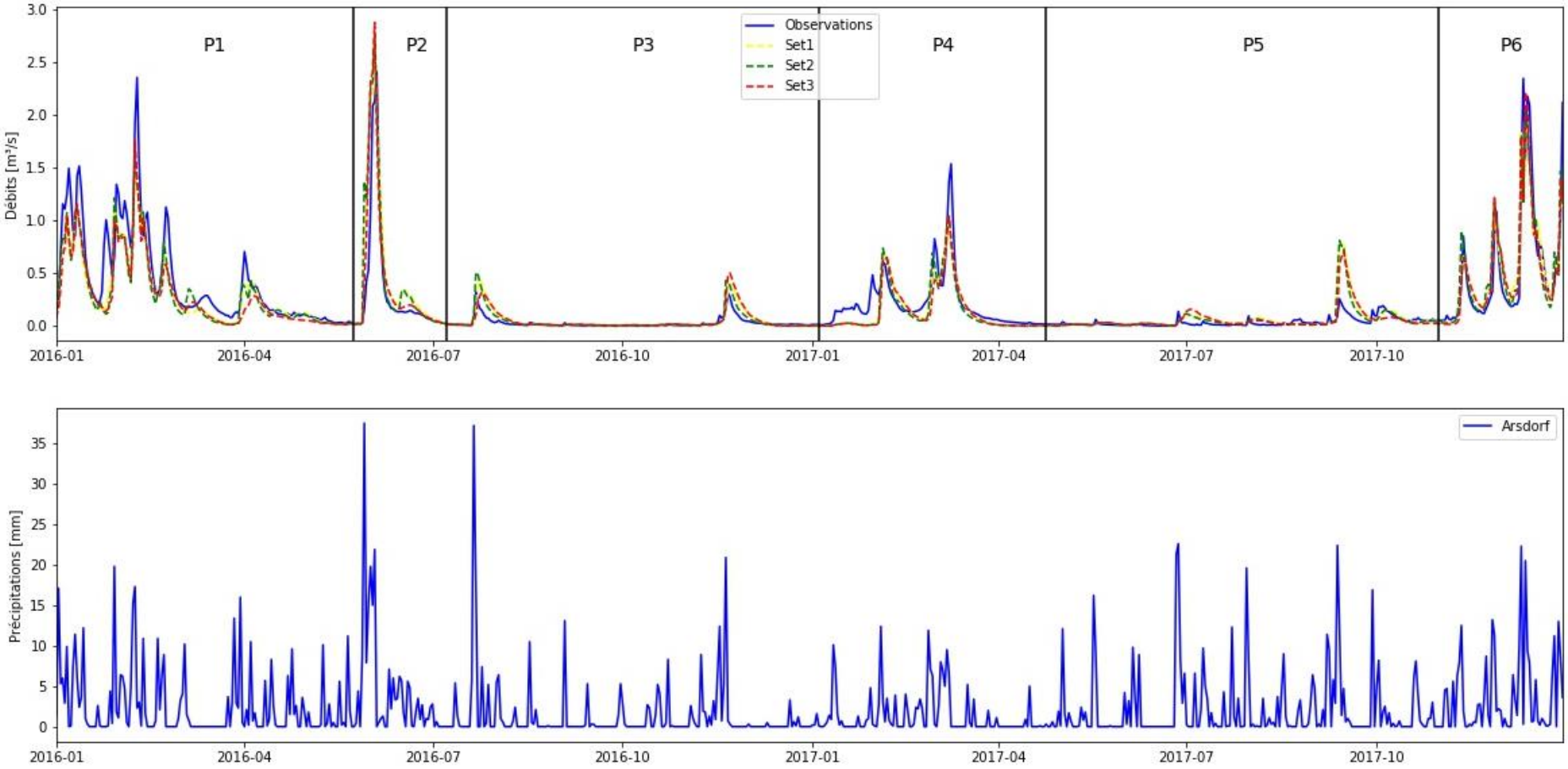


Figure 28 : Débits obtenus sur base des sets de calibration 1, 2 et 3 pour le bassin versant de Schéimelzerbesch

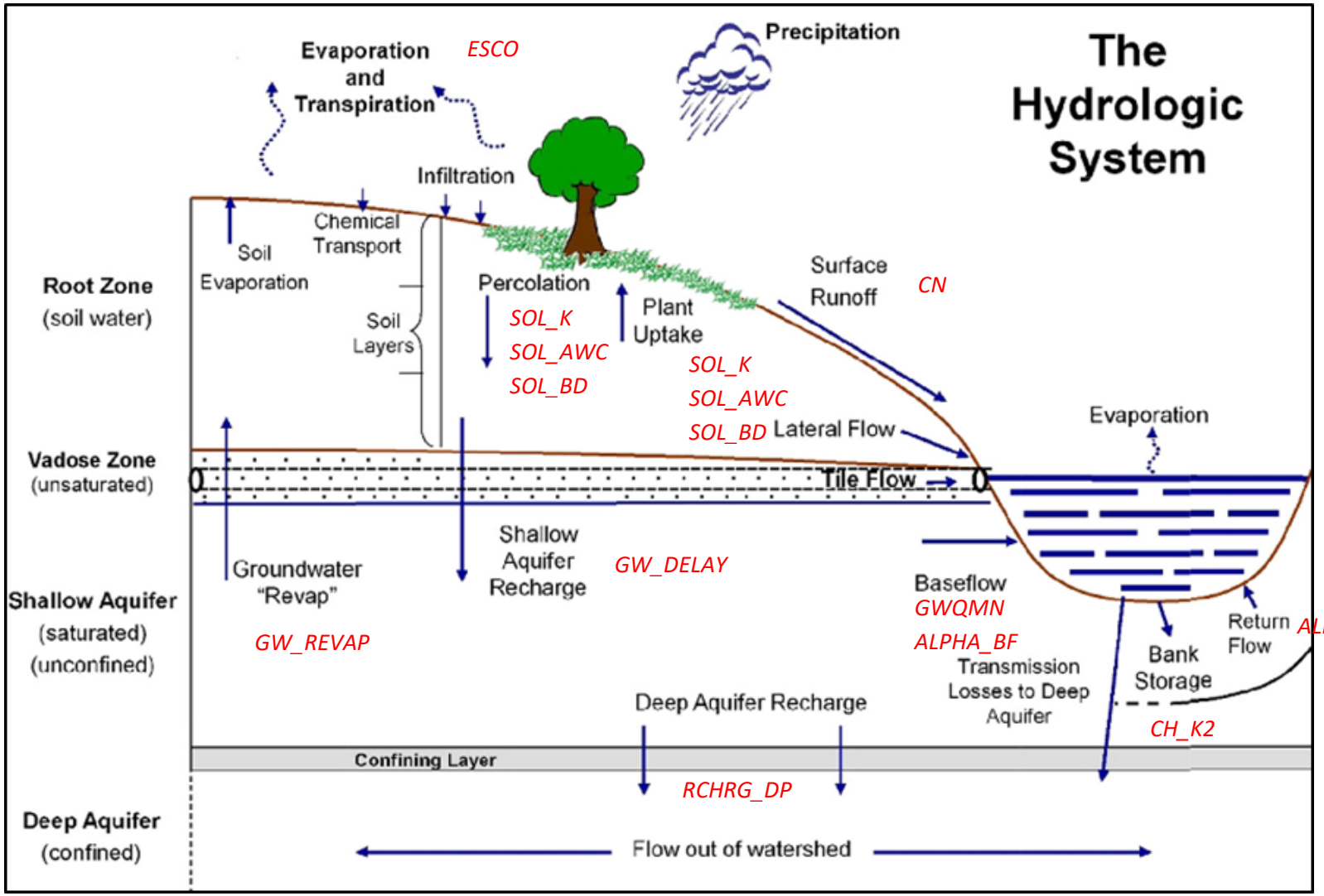


Figure 29 : Schéma du fonctionnement du cycle hydrologique dans le modèle SWAT et lien avec les paramètres des différents sets.

Le Tableau 11 montre la balance hydrique obtenue avant et après calibration. Les bilans hydriques des modélisations issues des 3 sets de paramètres calibrés sont très proches entre eux mais montrent des différences par rapport à la situation sans calibration. On remarque notamment que la contribution de l'aquifère peu profond augmente sensiblement alors que les flux latéraux diminuent. Les écoulements sont donc toujours principalement souterrains mais la part des écoulements les moins rapides (contribution de l'aquifère peu profond) est plus importante que celle des écoulements souterrains les plus rapides (flux latéraux). La proportion flux latéral/contribution de l'aquifère peu profond calculée par SWAT est après calibration plus en adéquation avec les résultats de Wrede et al. (2015). Sur base d'une séparation de l'hydrographe en 3 composantes à l'aide de mesures de conductivité électrique et de la silice en solution, il avait été calculé que 70% de l'eau provenait du milieu souterrain dans le Weierbach pour une crue en mai 2004.

Dans chaque cas de figure, le ruissellement de surface est faible. L'annexe 15 qui reprend les principaux types d'écoulement par sous-bassin versant sur le bassin versant de Schéimelzerbesch montre la variabilité spatiale des différents types d'écoulement. Les sous-bassins forestiers sont les zones pour lesquelles le ruissellement calculé est le plus faible. A l'inverse le ruissellement est plus important dans les sous-bassins versant comprenant des zones urbanisées. Le flux latéral est quant à lui plus important dans les zones de fortes pentes mais est en moyenne inférieure à l'écoulement de l'aquifère peu profond. Partout ailleurs et notamment dans les sous-bassins versant les plus distants de l'exutoire, l'écoulement de l'aquifère peu profond domine largement le bilan hydrique.

Tableau 11 : Comparaison des bilans hydriques annuels moyens sans calibration et avec calibrations pour les sets de paramètres 1 à 3 pour le bassin versant de Schéimelzerbesch

Variable [mm]	Pas de calibration	Set#1	Set#2	Set#3
Précipitations	800.90	800.90	800.90	800.90
Précipitations sous forme de neige	47.84	47.84	47.84	47.84
Fonte de neige	47.35	46.38	47.35	47.35
Sublimation	0.49	1.47	0.49	0.50
Ruissellement de surface	15.28	19.49	20.42	18.78
Flux latéral	302.90	73.96	77.82	73.30
Contribution de l'aquifère peu profond	69.20	278.74	264.26	266.32
Contribution de l'aquifère profond	0.63	2.78	2.58	3.02
Réévaporation	17.06	23.37	17.06	17.06
Recharge de l'aquifère profond	0.72	3.07	2.86	3.41
Recharge de l'aquifère peu profond et profond	72.03	306.61	285.82	272.80
Percolation au-delà du profil de sol	72.54	312.29	290.33	273.83
Evapotranspiration	404.00	392.50	409.50	431.60
Evapotranspiration potentielle	853.00	850.00	853.00	853.00

6. Validation du modèle SWAT sur la zone d'étude

Les stations de mesure des débits de Grondmillen, Bavigne, Rommelerkraiz et Bigonville ont été utilisées pour la validation du modèle calibré. Le bassin de la station de Martelange, inclus dans le bassin versant de la station de Bigonville, et le bassin versant de la station d'Esch-sur-Sûre, pour lequel il faut tenir compte de la présence du barrage n'ont pas fait l'objet du travail de validation.

6.1. Le bassin versant de la station de Grondmillen

Le bassin versant de la station de Grondmillen présente une superficie de 15,43 km² et a été divisé par SWAT en 73 sous-bassins versants (Figure 30). Les pentes sont élevées puisque plus de 32 % d'entre elles sont supérieures à 20 % (Figure 31). Le bassin versant est très peu urbanisé car moins de 5 % de la surface est artificialisée (Figure 32). L'occupation du sol est composée de 34 % de zones forestières et de plus de 59% de surfaces agricoles dont environ un tiers est occupé en permanence par de la prairie entre 2015 et 2017. Les sols sont identiques à ceux du bassin versant de la station de Schéimelzerbesch. Il s'agit de sols à texture argilo-limono-caillouteuse avec une charge principalement définie comme caillouteuse à très caillouteuse (Figure 33). Sur les plateaux on retrouve principalement des sols à bon drainage avec une profondeur modérée comprise entre 40 cm à plus de 80 cm. Sur les versants la profondeur est définie comme variable. Peu de sols présentent des problèmes de drainage.

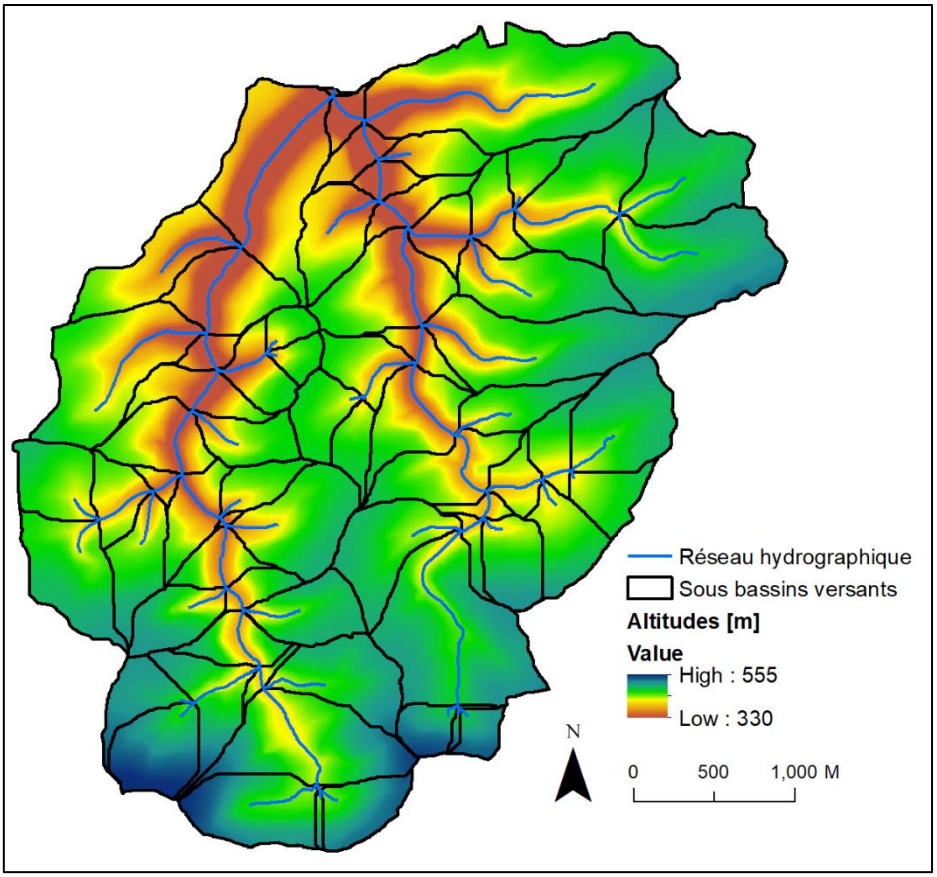


Figure 30 : Bassin versant et sous-bassins versants de la station de Grondmillen

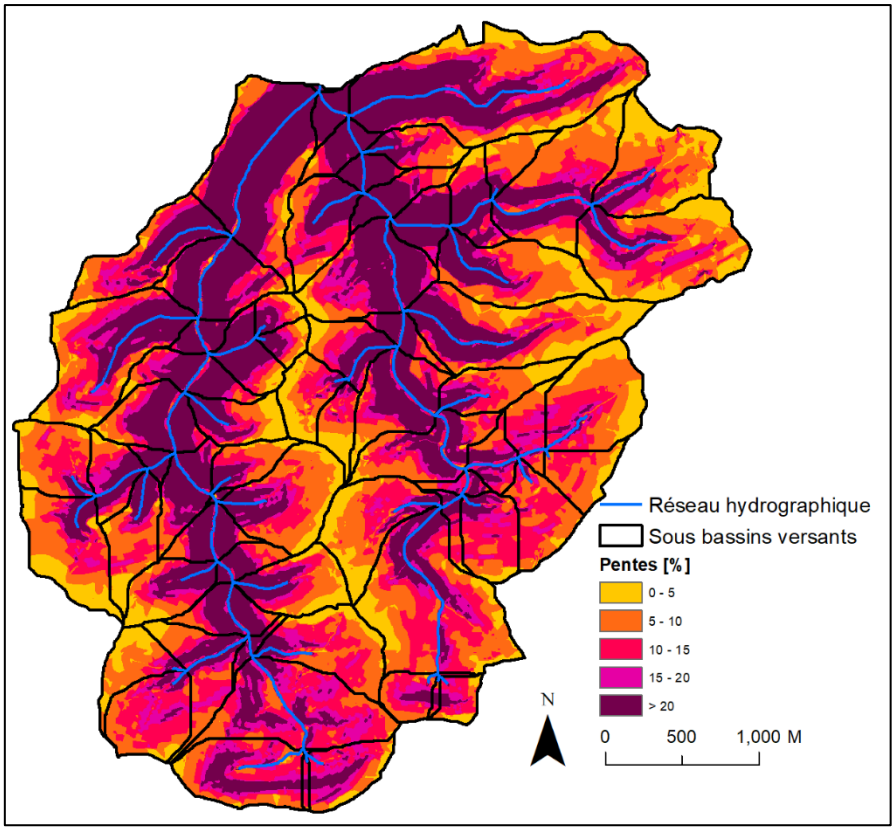


Figure 31 : Pentes du bassin versant de la station de Grondmillen

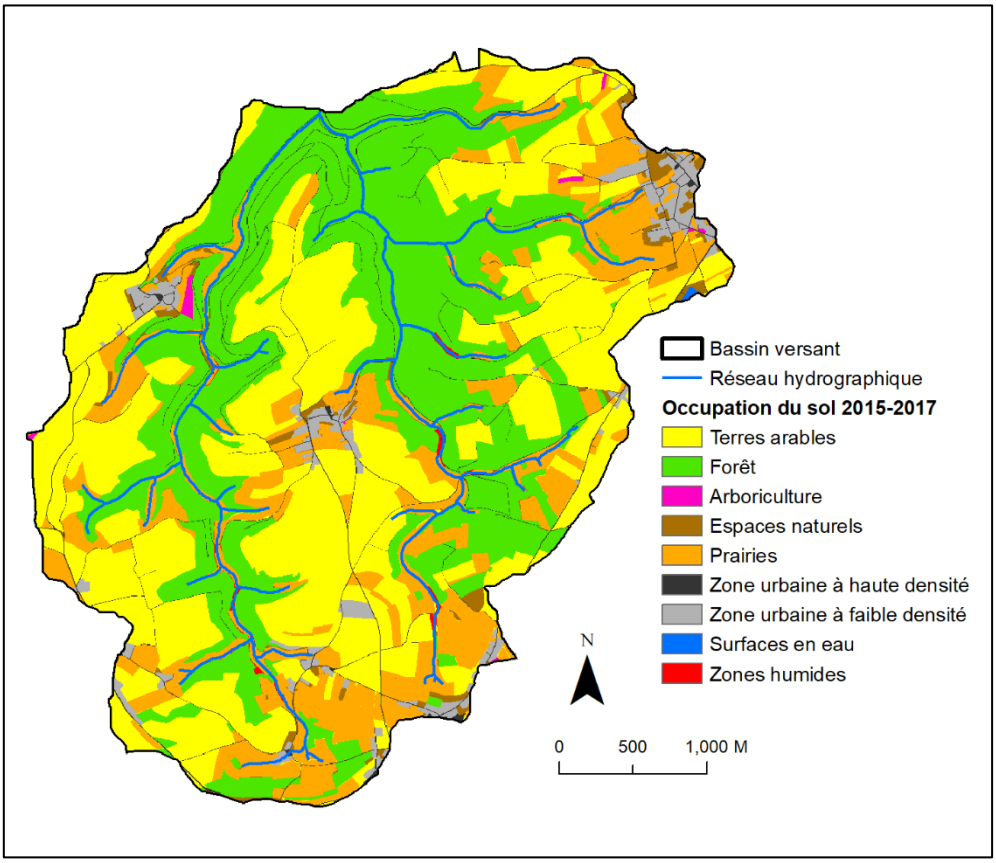


Figure 32 : Occupation du sol du bassin versant de la station de Grondmillen

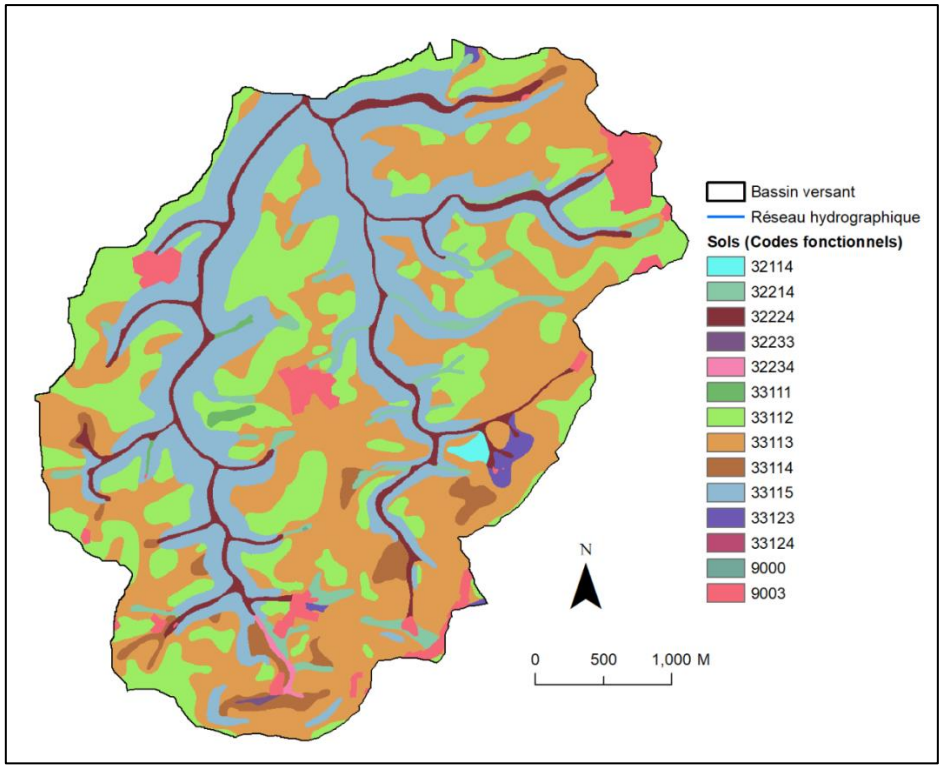


Figure 33 : Sols du bassin versant de la station de Grondmillen

Le bassin versant de de Grondmillen a été paramétré dans SWAT en suivant la même méthodologie que celle appliquée au bassin versant de de Schéimelzerbesch. Les données météorologiques des stations d'Arsdorf, d'Esch et d'Eschdorf ont été utilisées. Les séries temporelles de débit relevés aux stations de Grondmillen et de Schéimelzerbesch présentent des résultats très similaires à l'exception d'un pic qui semble anormal aux alentours des mois de janvier/février 2017 pour la station de Grondmillen (Figure 34). Ce pic est en effet inattendu car les données de pluie des 3 stations météorologiques à proximité ne montrent pas de précipitations particulièrement importantes. Les 3 sets de paramètres issus de la calibration n'arrivent pas à reproduire ce pic, ce qui affecte significativement les indicateurs de performance lors de la phase de validation. Cependant, si on l'élimine, les 3 sets de paramètres fournissent des résultats satisfaisants (Figure 35 et Tableau 12).

Tableau 12 : Indicateurs de performance obtenus lors de la validation des différents sets de paramètres sur le bassin versant de la station de Grondmillen (R^2 : coefficient de détermination, NS : Nash-Sutcliffe, KGE : Kling Gupta Efficiency, bR^2 : produit du coefficient de déterminantion et de la pente de la doite de régression entre données simulées et mesurées, MSE : erreur quadratique moyenne , SSQR : variance, PBIAS : estimation relative (%) de la surestimation (+) ou sous estimation (-) des volumes totaux prédits)

		Set#1	Set#2	Set#3
Validation	R^2	0.72	0.70	0.73
	NS	0.71	0.69	0.72
	KGE	0.81	0.83	0.85
	bR^2	0.55	0.56	0.61
	MSE	0.031	0.033	0.03
	SSQR	0.0029	0.0014	0.0012
	PBIAS	-6.0	-2.6	-2.5

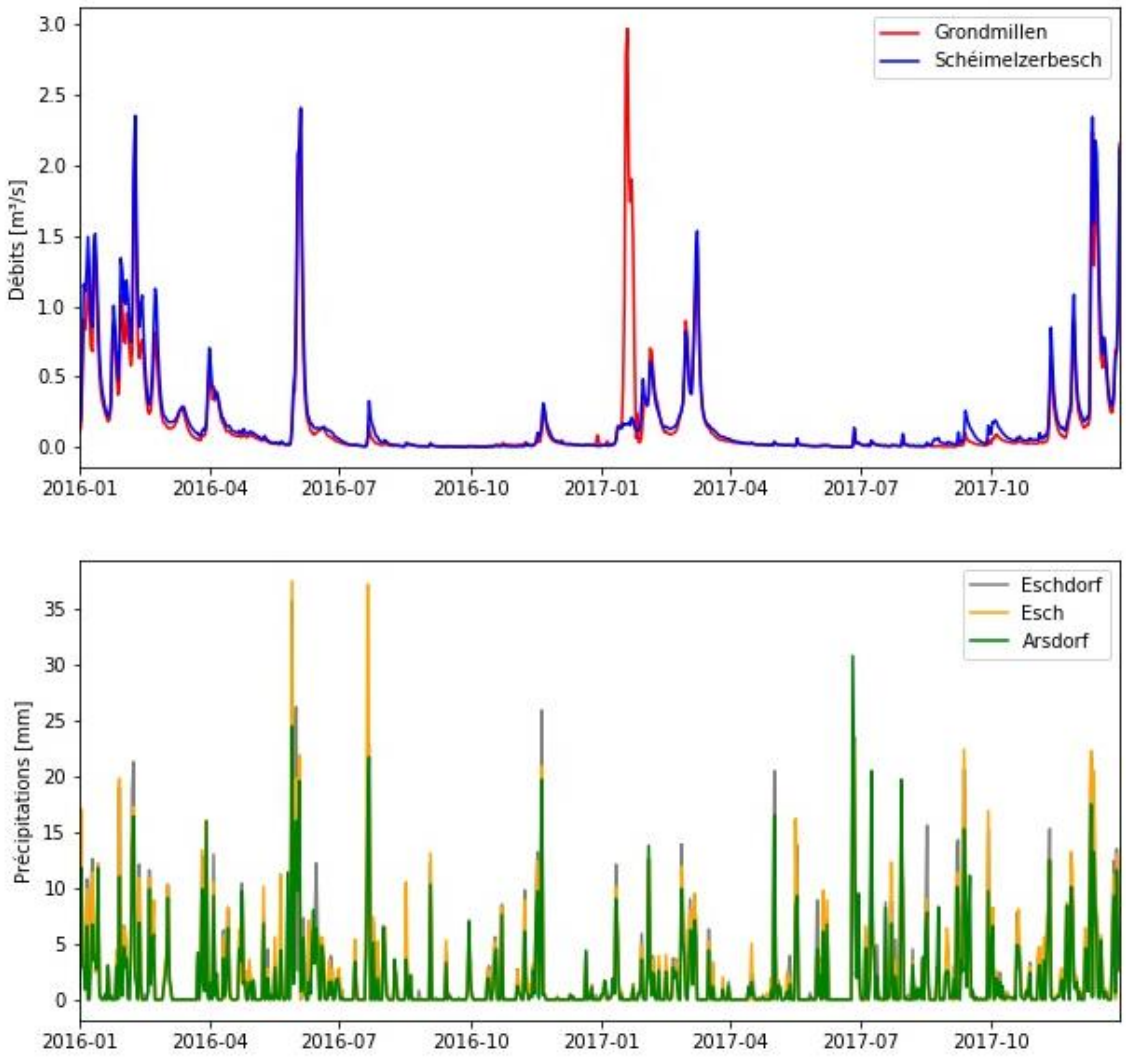


Figure 34 : Comparaisons des débits observés pour les bassins versants de Schéimelzerbesch et de Grondmillen sur la période 2016-2017. Sur le graphique du bas, relevés des précipitations pour les stations d'Arsdorf, d'Esch-sur-Sûre et d'Eschdorf pour la même période.

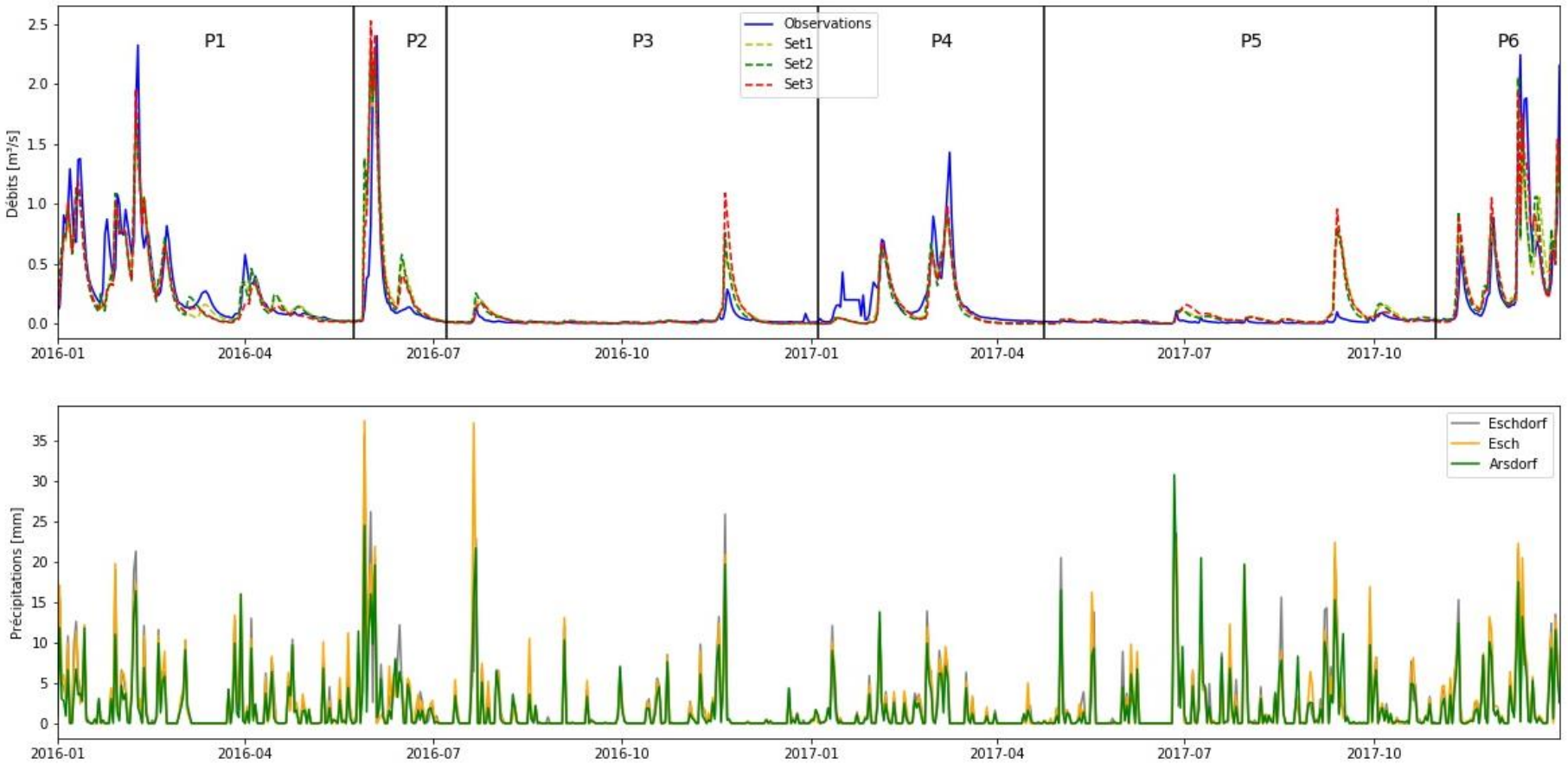


Figure 35 : Débits observés et simulés pour le bassin versant de la station de Grondmillen pour les sets de paramètres 1, 2 et 3 issus de la calibration. Le pic de débit observé en janvier-février 2017 a été éliminé

Lorsque l'on découpe la série temporelle des débits selon les périodes de pics et de débits de base, on peut distinguer 6 périodes telles que définies à la Figure 35 qui sont similaires aux périodes du BV de Schéimelzerbesch. Pour chacune de ces périodes, le coefficient de Nash-Sutcliffe (NS) a été calculé (Tableau 13). La période de pic P1 est la mieux simulée par les 3 sets de paramètres (0.82 < NS < 0.84). La période débit de base P3 est bien simulée par le set#1 et le set#2 (NS = 0.82) mais est mal simulée par le set#3 (NS = 0.49). Les périodes de pic P4 et P6 présentent des coefficients de NS acceptables (0.66 < NS < 0.77) pour les 3 sets de paramètres. Le pic P2 est le pic le moins bien simulé. Le set#1 présente toutefois un NS acceptable (0.61). La période débit de base P5 est la moins bien simulée avec des NS compris entre 0.34 et 0.48. Dans l'ensemble, les sets proposés lors de la calibration montrent de bons indicateurs de performance sur le bassin versant de Grondmillen qui présentent des caractéristiques très proches du bassin versant de Schéimelzerbesch. Les périodes de pics sont dans l'ensemble bien simulées et seule la période débit de base de mai 2017 à novembre 2017 est moins bien prédite. Les sets #1 et #2 sont ceux qui permettent de mieux prédire à la fois les périodes de pic et les périodes de débits de base. L'annexe 16 montre le bilan annuel des principaux types d'écoulement par sous bassins versant sur le BV de Grondmillen.

Tableau 13 : Coefficients Nash-Sutcliffe pour les simulations issues des sets de paramètres 1 à 3 pour les différentes périodes de pics et de débits de base observées sur le bassin versant de Grondmillen (Figure 35).

	Coefficient Nash-Sutcliffe					
	Période 1 (01/01/16 - 24/05/16)	*Période 2 (25/05/16 - 08/07/16)*	*Période 3 (09/07/16 - 04/01/17)*	*Période 4 (05/01/17 - 24/04/17*	*Période 5 (24/04/17 - 31/10/17)*	*Période 6 (01/11/17 - 31/12/17)*
Set#1	0.83	0.61	0.82	0.75	0.36	0.66
Set#2	0.82	0.51	0.82	0.71	0.48	0.66
Set#3	0.84	0.57	0.49	0.74	0.34	0.77

6.2. Le bassin versant de la station de Bavigne

Le bassin versant de la station de Bavigne présente une superficie de 33,78 km² et a été divisé par SWAT en 135 sous-bassins versants (Figure 36). La partie septentrionale du bassin versant se situe en Wallonie et le restant est inclus dans le territoire luxembourgeois. Les vallons sont relativement fort encaissés et présentent pour la plupart des pentes supérieures à 20 % (Figure 37). Le bassin versant est très peu urbanisé (3.5 % ; Figure 38). L'occupation du sol est composée de plus de 33% de surfaces en agricoles dont la moitié est uniquement occupé par de la prairie entre 2015 et 2017. On retrouve environ 60 % de zones forestières et 3% d'autres espaces naturels. L'information sur le type de sol provient de trois sources de données différentes (Figure 39). La carte numérique des sols de Wallonie couvre la partie nord du bassin versant une surface d'environ 20 %. La carte des associations de sol du GDL couvre le centre du bassin versant sur une surface d'environ 40%. La carte des sols détaillée du GDL couvre, quant à elle, la partie sud sur une surface d'environ 40%. Les sols sont essentiellement à texture argilo-limono-caillouteuse avec une charge principalement définie comme caillouteuse à très caillouteuse (Figure 39). La partie couverte par la carte des associations de sols indique quelques inclusions d'argile légère. Sur les plateaux, on retrouve principalement des sols à bon drainage avec une profondeur modérée comprise entre 40 à plus de 80 cm.

Les sols les plus profonds sont pour la plupart renseignés sur la partie nord du BV couverte par la carte numérique des sols de Wallonie. Sur les versants, la profondeur est définie comme variable. Les fonds de vallon du coté luxembourgeois présentent des classes de drainage de modéré à imparfait alors qu'ils sont classés comme pauvres du coté wallon. Les inclusions d'argile légère renseignées par la carte des associations de sol présentent également des drainages classés comme pauvres.

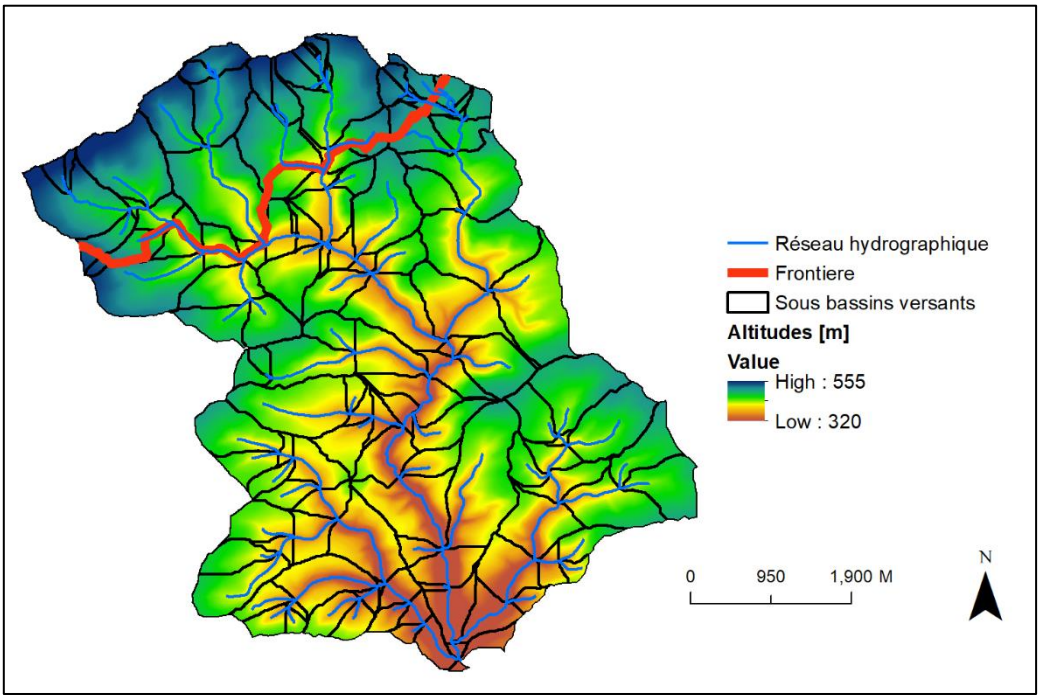


Figure 36 : Bassin versant et sous-bassins versants de la station de Bavigne

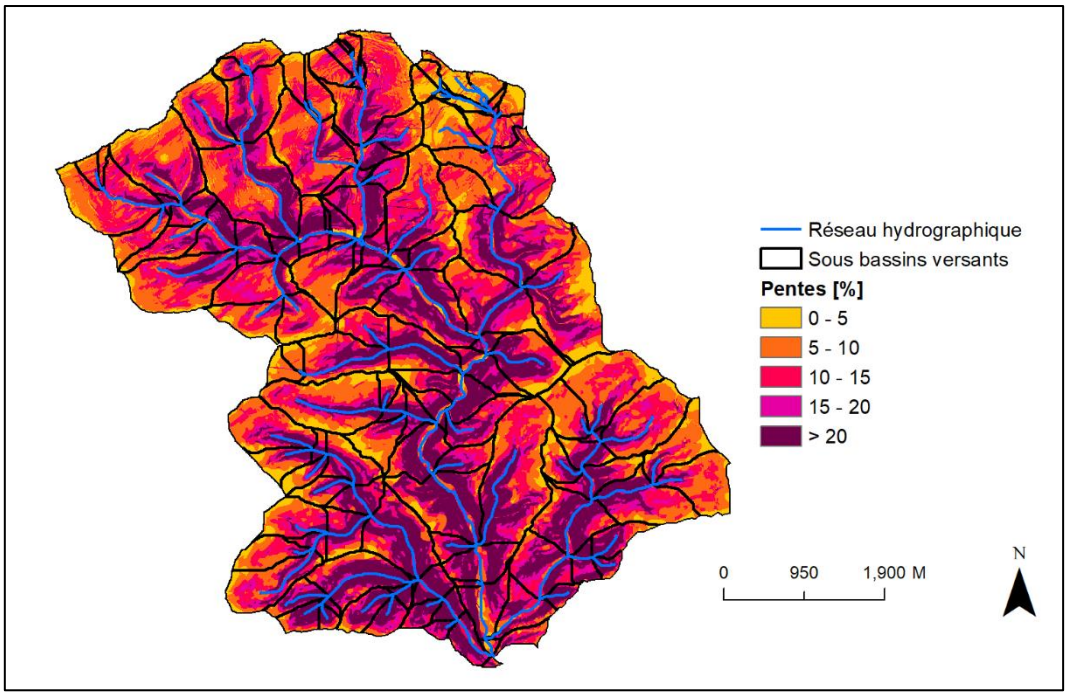


Figure 37 : Pentes du bassin versant de la station de Bavigne

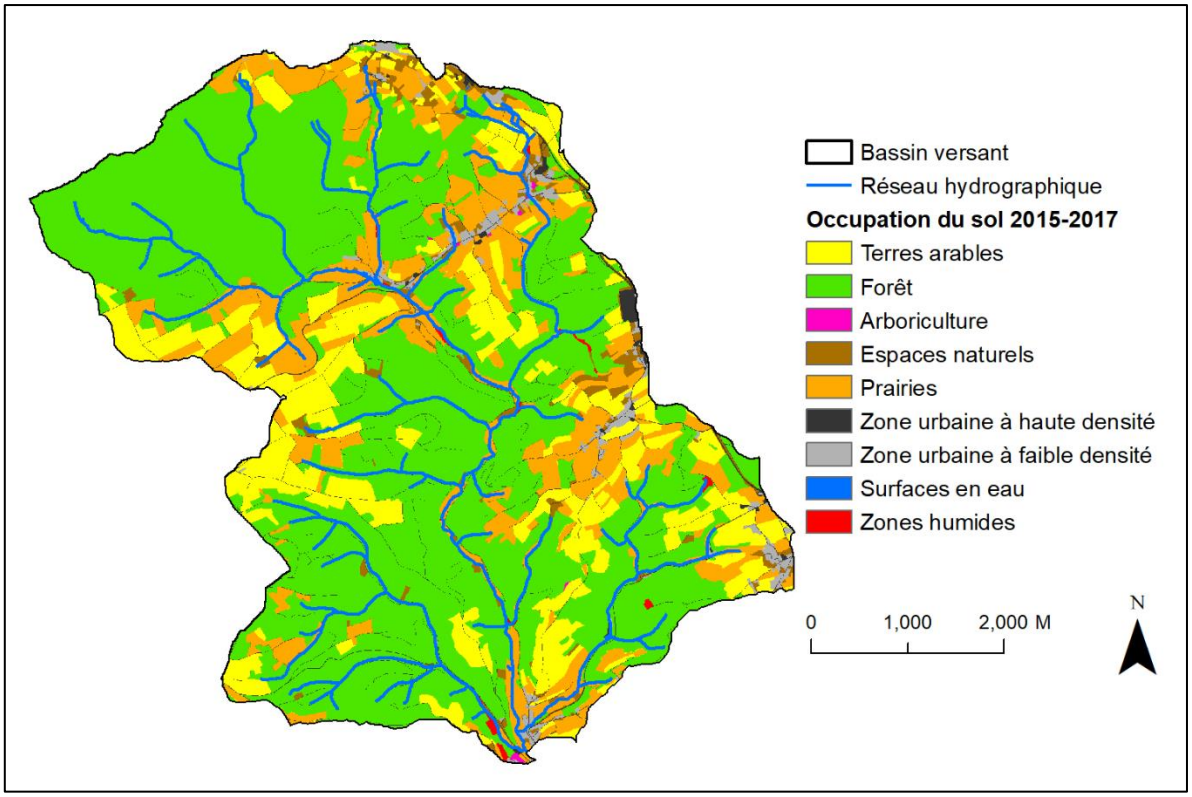


Figure 38 : Occupation du sol du bassin versant de la station de Bavigne

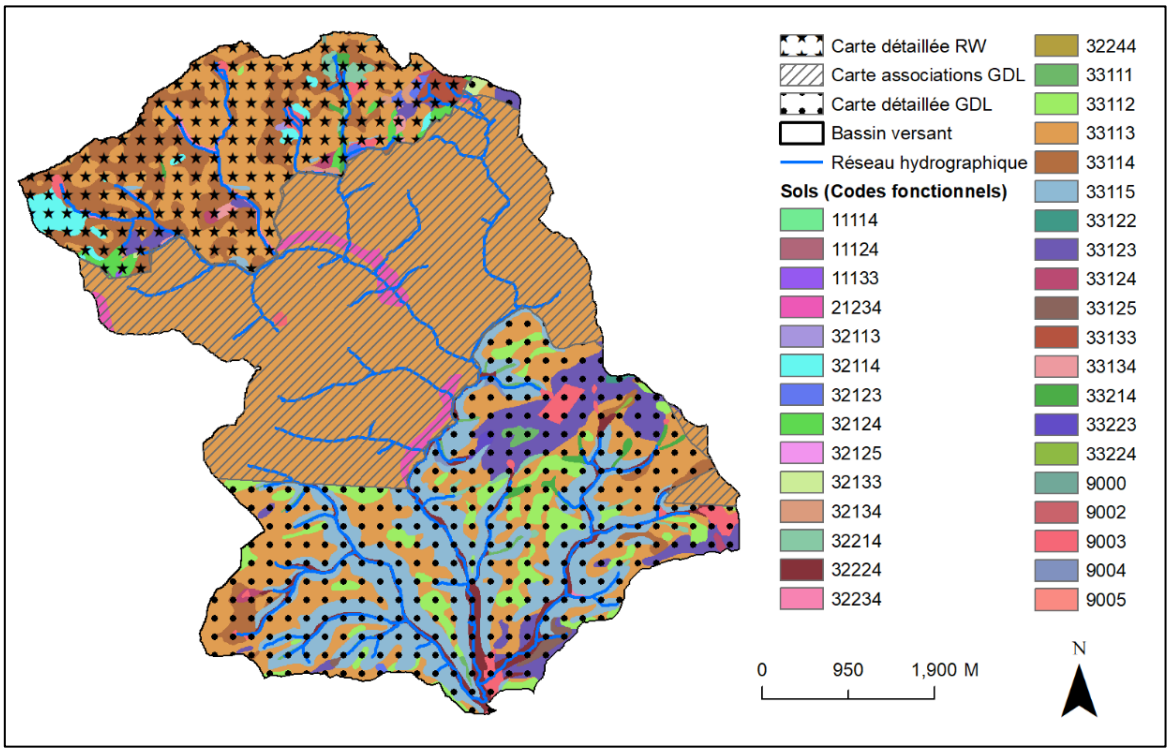


Figure 39 : Sols du bassin versant de la station de Bavigne et surfaces couvertes par les différentes cartes pédologiques

Le bassin versant de la station de Bavigne a été paramétré dans SWAT en suivant la même méthodologie que celle appliquée au bassin versant de la station de Schéimelzerbesch. Les données météorologiques des stations de Harlange, d'Esch-sur-Sûre et de Michamps ont été utilisées. Les séries temporelles de débits relevés à la station de Bavigne (Figure 40) présentent la même dynamique que les débits observés aux stations de Schéimelzerbesch et Grondmillen (Figure 28 et Figure 35). Les débits relevés en période de pic à la station de Bavigne sont néanmoins sensiblement plus importants. Les 3 sets de paramètres issus de la calibration fournissent des résultats très satisfaisants et relativement proches (Figure 40 et Tableau 14).

Tableau 14 : Indicateurs de performance obtenus lors de la validation des différents sets de paramètres sur le bassin versant de la station de Bavigne (R^2 : coefficient de détermination, NS : Nash-Sutcliffe, KGE : Kling Gupta Efficiency, bR^2 : produit du coefficient de déterminantion et de la pente de la doite de régression entre données simulées et mesurées, MSE : erreur quadratique moyenne , SSQR : variance, PBIAS : estimation relative (%) de la surestimation (+) ou sous estimation (-) des volumes totaux prédits)

		Set#1	Set#2	Set#3
Validation	R^2	0.77	0.76	0.73
	NS	0.77	0.75	0.71
	KGE	0.84	0.87	0.85
	bR^2	0.63	0.64	0.61
	MSE	0.093	0.100	0.120
	SSQR	0.011	0.006	0.006
	PBIAS	-5.9	-2.3	-2.6

Lorsque l'on découpe la série temporelle des débits selon les périodes de pics et de débits de base, on peut distinguer 6 périodes similaires à celles des BVs de Schéimelzerbesch et de Grondmillen. Pour chacune de ces périodes, le coefficient de Nash-Sutcliffe (NS) a été calculé (Tableau 15). Les périodes de pic P1 et P6 sont les mieux simulées par les 3 sets de paramètres ($0.79 < NS < 0.88$). La période de pic P4 est légèrement moins bien simulée mais les coefficients NS restent bons (0.72 à 0.80). Comme pour Grondmillen, le pic P2 est le pic le moins bien simulé avec toutefois des coefficients NS tout à fait acceptables (0.68 à 0.72). Les périodes de débit de base sont les moins bien simulées. Si la période P3 montrent des coefficients NS encore acceptables pour les sets#1 et #2 ($0.46 < NS < 0.61$), la période P5 montre des coefficients plus faibles et même mauvais pour le set#3 ($NS = 0.09$). Ces moins bons NS sont conditionnés par une moins bonne prédiction des faibles pics de débit (< 1m³/s) lors de ces périodes. Les sets de paramètres proposés lors de la calibration, en particulier les sets #1 et #2, montrent de très bons indicateurs de performance lors de la validation sur le bassin versant de Bavigne malgré une information pédologique provenant de trois bases de données différentes et 40 % de la surface qui présente une information pédologique très grossière d'un point de vue spatial. L'annexe 17 montre le bilan annuel des principaux types d'écoulement par sous bassins versant sur le BV de Bavigne.

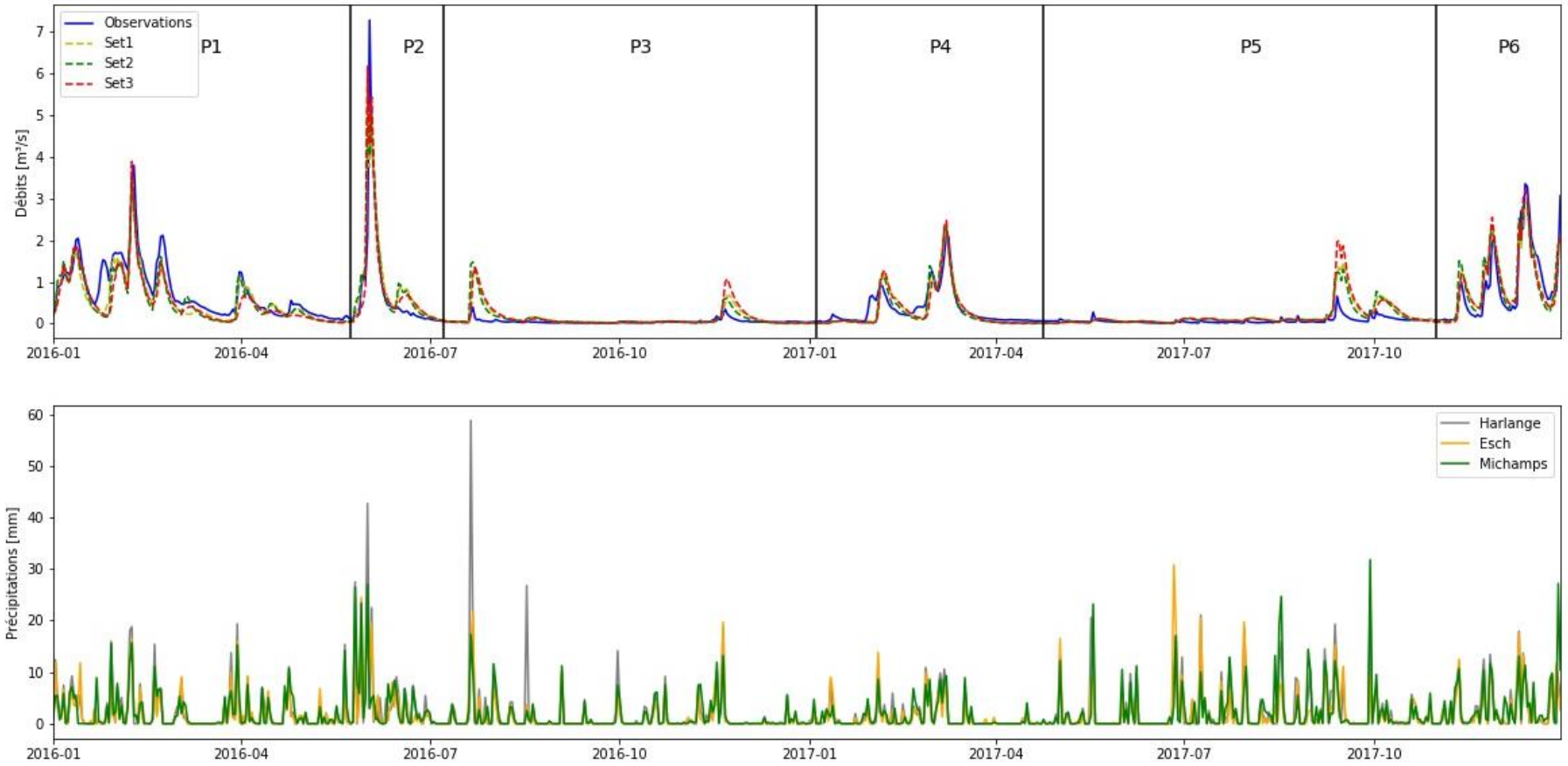


Figure 40 : Débits observés et simulés sur le bassin versant de la station de Bavigne sur base des sets de paramètres 1, 2 et 3 issus de la calibration

Tableau 15 : Coefficients Nash-Sutcliffe pour les simulations issues des sets de paramètres 1 à 3 pour les différentes périodes de pics et de débits de base observées sur le bassin versant de la station de Bavigne (Figure 40).

	Coefficient Nash-Sutcliffe					
	Période 1 (01/01/16 - 24/05/16)	*Période 2 (25/05/16 - 08/07/16)*	*Période 3 (09/07/16 - 04/01/17)*	*Période 4 (05/01/17 - 24/04/17*	*Période 5 (24/04/17 - 31/10/17)*	*Période 6 (01/11/17 - 31/12/17)*
Set#1	0.84	0.72	0.61	0.79	0.43	0.88
Set#2	0.81	0.69	0.60	0.80	0.56	0.85
Set#3	0.79	0.68	0.46	0.72	0.09	0.87

6.3. Le bassin versant de la station de Rommelerkraiz

Le bassin versant de la station de Rommelerkraiz, qui présente une superficie de 64,69 km², a été divisé par SWAT en 297 sous-bassins versants (Figure 41). Le bassin versant est coupé en son milieu par la frontière belgo-luxembourgeoise selon une ligne Nord-Sud qui le divise en deux. La surface du bassin versant est un peu plus importante sur territoire wallon. Le relief est un peu plus modéré que sur les autres bassins versants présentés jusqu'à présent. Les vallons sont toutefois relativement fort encaissés et présentent pour la plupart des pentes supérieures à 20 %. (Figure 42) Le bassin versant est très peu urbanisé car seulement 3.5 % de la surface est artificialisée (Figure 43). Le bassin versant est fortement agricole (49 % de la surface) avec plus de la moitié de cette surface occupée en permanence par des prairies sur la période 2015 à 2017. On retrouve comme pour les autres bassins versants une surface importante en forêt (43%) et près de 5% d'autres espaces naturels. L'information sur le type de sol provient de trois sources de données différentes (Figure 44). La carte numérique des sols de Wallonie couvre la partie Ouest du bassin versant sur une surface d'environ 60 %. La carte des associations de sol du GDL couvre le Nord-Est du bassin versant sur une surface d'environ 5%. La carte des sols détaillée du GDL couvre la partie Est / Sud-Est du bassin versant sur une surface d'environ 35%. Les sols sont essentiellement à texture argilo-limono-caillouteuse avec une charge principalement définie comme caillouteuse à très caillouteuse (Figure 44). Par rapport aux autres bassins versants présentés jusqu'alors, on note une plus grande présence de sols peu caillouteux, notamment au Nord-Ouest du bassin versant. Leur proportion reste toutefois relativement faible (11%). La partie couverte par la carte des associations de sols indique quelques inclusions d'argile légère. Sur les plateaux, on retrouve principalement des sols à bon drainage avec une profondeur modérée comprise entre 40 cm à plus de 80 cm. Ici aussi, les sols les plus profonds sont pour la plupart renseignés sur la partie Est du bassin versant couverte par la carte numérique des sols de Wallonie. Sur les versants, la profondeur est définie comme variable ou entre 20 et 40 cm. On distingue à nouveau la différence de classement entre les fonds de valons qui sont définis en classe de drainage de modéré à imparfait du coté luxembourgeois alors qu'ils sont classés comme pauvre du coté wallon. Les inclusions d'argile légère renseignées par la carte des associations de sol présentent également des drainages classés comme pauvre.

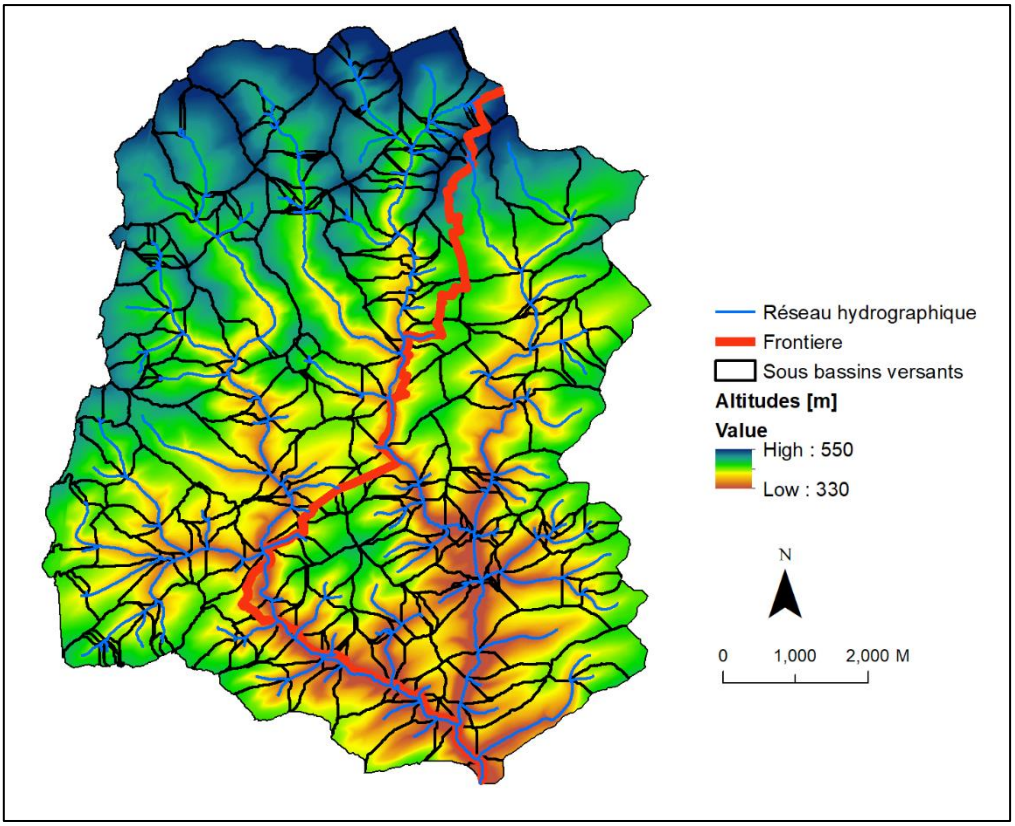


Figure 41 : Bassin versant et sous-bassins versants de la station de Rommelerkraiz

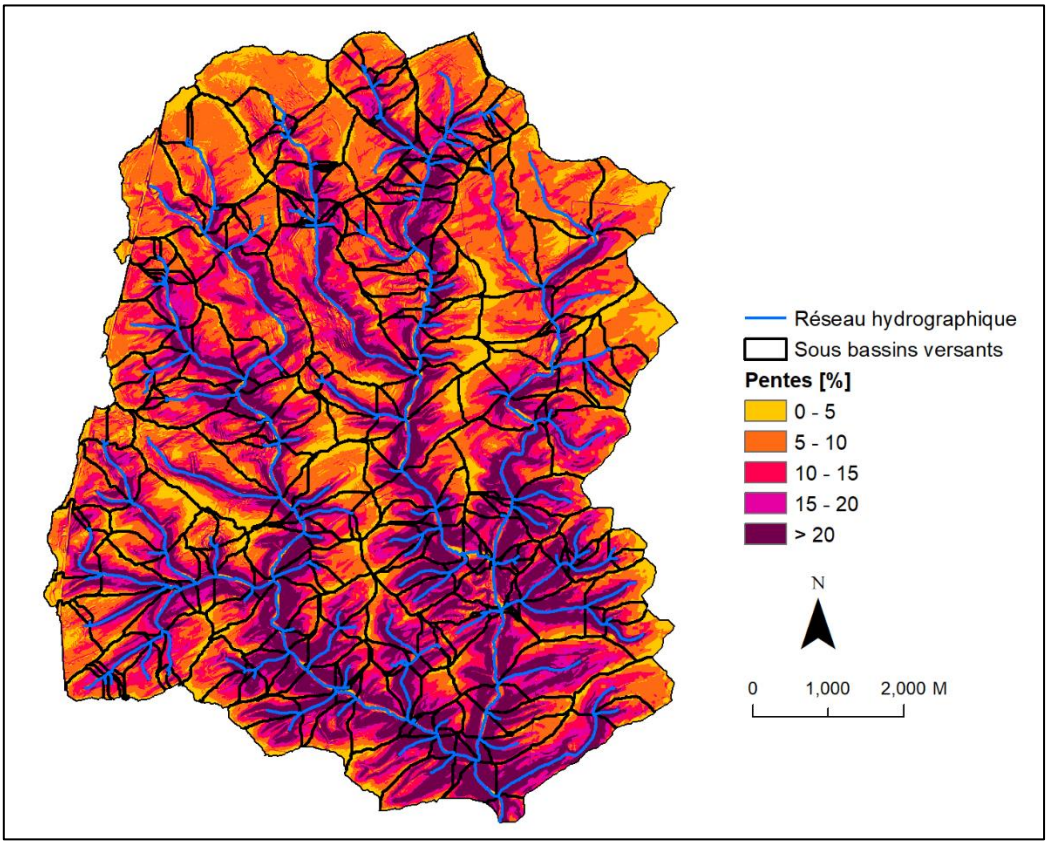


Figure 42 : Pente du bassin versant de la station de Rommelerkraiz

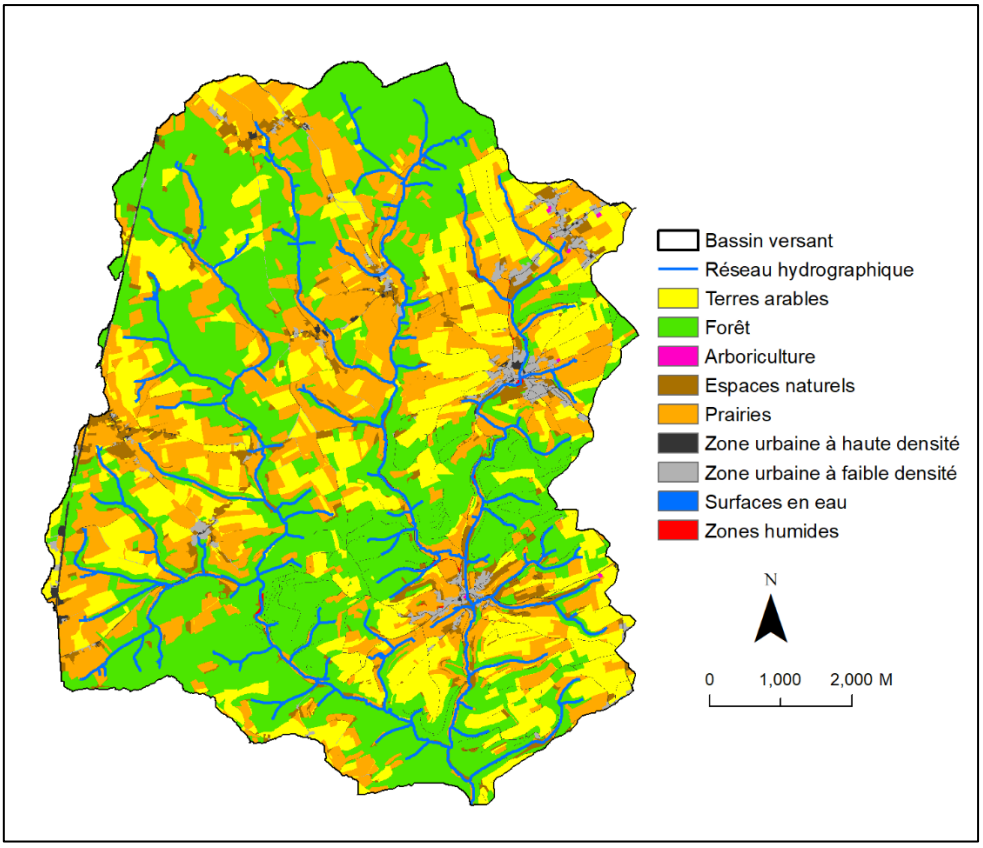


Figure 43 : Occupation du sol du bassin versant de la station de Rommelerkraiz

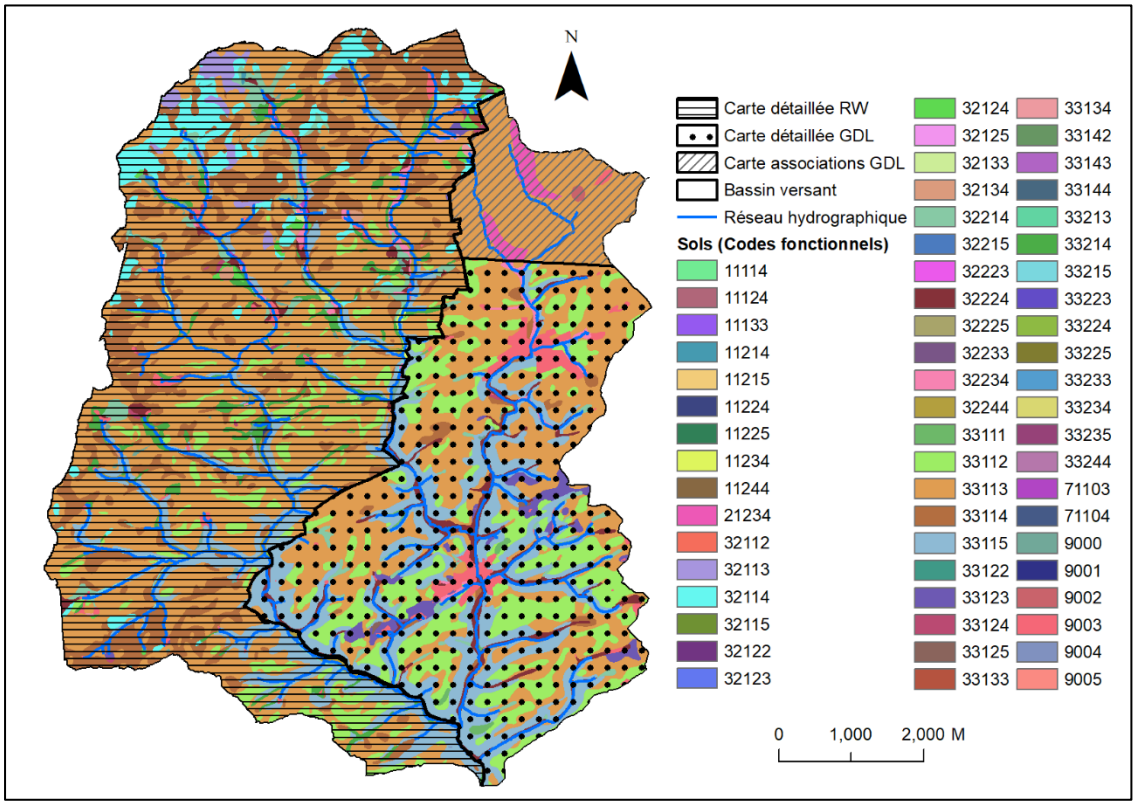


Figure 44 : Sols du bassin versant de la station de Rommelerkraiz

Le bassin versant de la station de Rommelerkraiz a été paramétré dans SWAT en suivant la même méthodologie que celle appliquée aux autres bassins versants. Les données des stations météorologiques de Bigonville et de Harlange ont été utilisées. Les séries temporelles de débits relevés à la station de Rommelerkraiz (Figure 45) présentent la même dynamique que les débits observés aux stations de Schéimelzerbesch, de Grondmillen et de Bavigne avec toutefois un pic en début d'année 2017 proportionnellement plus marqué que pour les autres stations (Figure 28, Figure 35, Figure 40). Les débits relevés en période de pic à la station de Rommelerkraiz sont sensiblement plus importants que pour les 3 bassins versants précédents du fait notamment de la taille du bassin versant. Les 3 sets de paramètres issus de la calibration fournissent des résultats moins bons que pour les 3 premiers bassins versants (Figure 45 et Tableau 16).

Tableau 16 : Indicateurs de performance obtenus lors de la validation des différents sets de paramètres sur le bassin versant de la station de Rommelerkraiz (R^2 : coefficient de détermination, NS : Nash-Sutcliffe, KGE : Kling Gupta Efficiency, bR^2 : produit du coefficient de déterminantion et de la pente de la doite de régression entre données simulées et mesurées, MSE : erreur quadratique moyenne , SSQR : variance, PBIAS : estimation relative (%) de la surestimation (+) ou sous estimation (-) des volumes totaux prédits)

		Set#1	Se0t#2	Set#3
Validation	R^2	0.66	0.64	0.64
	NS	0.65	0.60	0.60
	KGE	0.78	0.77	0.76
	bR^2	0.49	0.49	0.49
	MSE	0.56	0.63	0.64
	SSQR	0.028	0.030	0.048
	PBIAS	8.2	10.8	13.0

Lorsque l'on découpe la série temporelle des débits selon les périodes de pics et de débits de base, on peut distinguer 7 périodes. Il s'agit des 6 périodes que l'on distingue sur les autres bassins versants auxquelles s'ajoute la période de pic du début d'année 2017. Pour chacune de ces périodes, le coefficient de Nash-Sutcliffe (NS) a été calculé (Tableau 17). Les périodes de pic P1, P5 et P7 sont les mieux simulées par les 3 sets de paramètres ($0.78 < NS < 0.88$). La période de pic P2 est mal simulée par les 3 sets qui surestiment les débits avec en plus un léger décalage. Le meilleur résultat est obtenu avec le set#1 (NS = 0.41). Une partie des pics (surtout le premier) de la période P4 n'est pas simulée ce qui explique les très mauvais coefficients pour cette période quel que soit le set de paramètres considéré ($-0.55 < NS < -0.53$). Ce pic peut être attribué aux précipitations du 12 janvier 2017 qui étaient de l'ordre de 10 mm le 12 janvier 2017 et qui ont provoqué une crue rapide. Le modèle a probablement retenu l'eau dans le sol car il avait calculé une température négative (sol gelé) et l'a laissée percoler une fois que sa température était positive. D'après la station météorologique la plus proche mesurant la température du sol (Eschdorf), les sols n'étaient pas gelés durant cette période. Cet évènement pluvieux montre qu'il est nécessaire d'ajuster aussi les paramètres régissant la température du sol et le ruissellement de surface sur les sols gelés. Cette tendance du modèle à sous-estimer la température du sol avait été mise en évidence dans Qi et al. (2015). Les périodes avec les plus faibles débits (P3 et P6) sont simulées de manière satisfaisante. L'annexe 18 montre le bilan annuel des principaux types d'écoulement par sous bassins versant sur le BV de Rommelerkraiz.

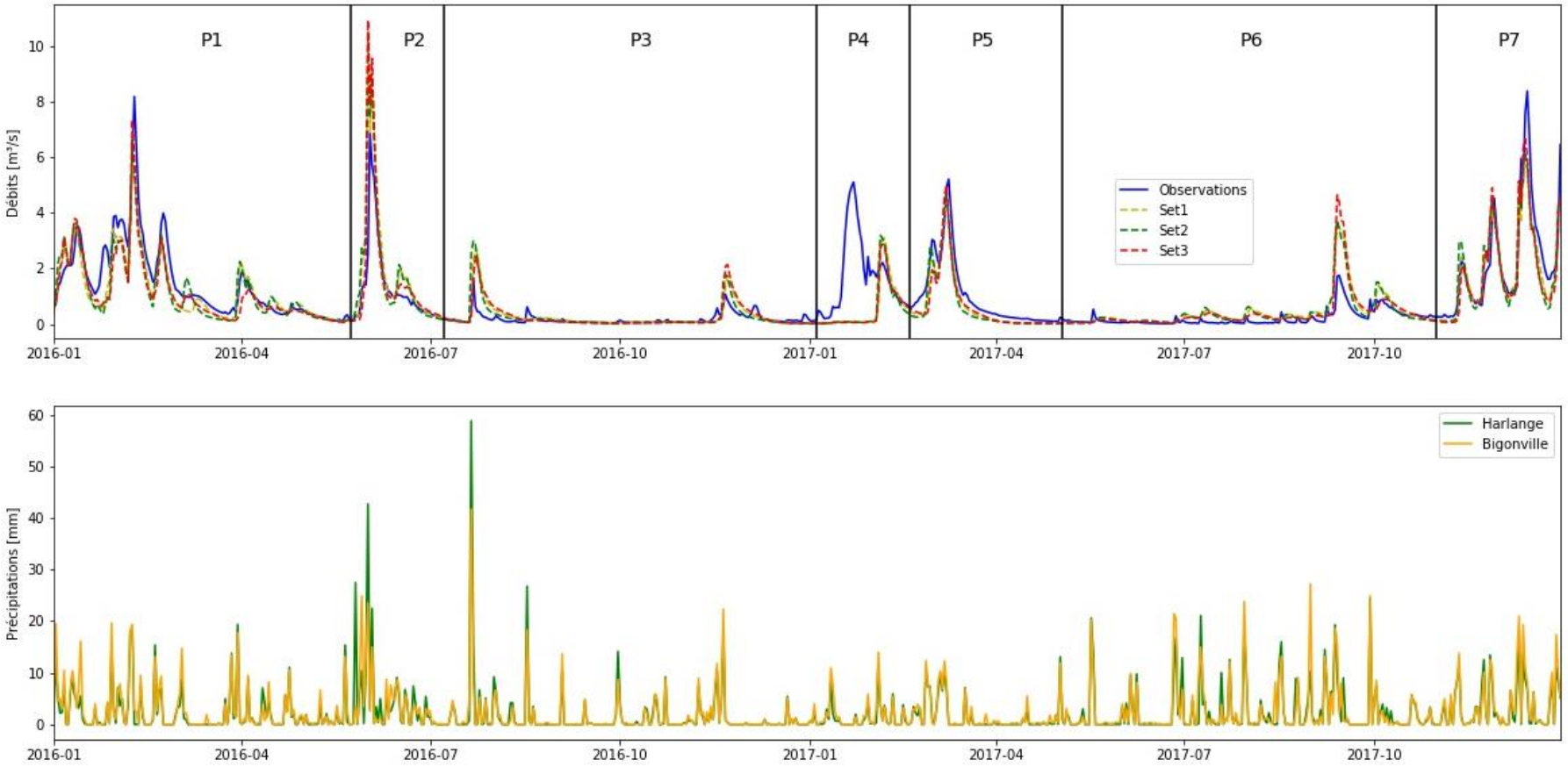


Figure 45 : Débits observés et simulés sur le bassin versant de la station de Rommelerkraiz sur base des sets de paramètres 1, 2 et 3 issus de la calibration

Tableau 17 : Coefficients Nash-Sutcliffe pour les simulations issues des sets de paramètres 1 à 3 pour les différentes périodes de pics et de débits de base observées sur le bassin versant de la station de Rommelerkraiz (Figure 45).

	Coefficient de Nash-Sutcliffe						
	Période 1 (01/01/16 - 24/05/16)	*Période 2 (25/05/16 - 08/07/16)*	*Période 3 (09/07/16 - 04/01/17)*	*Période 4 (05/01/17 - 20/02/17*	*Période 5 (05/01/17 - 03/05/17*	*Période 6 (04/05/17 - 31/10/17)*	*Période 7 (01/11/17 - 31/12/17)*
Set#1	0.84	0.41	0.77	-0.55	0.87	0.64	0.88
Set#2	0.78	0.21	0.75	-0.53	0.82	0.66	0.85
Set#3	0.80	0.16	0.77	-0.54	0.81	0.53	0.87

Dans l'ensemble, la série temporelle des débits est donc bien reproduite par les 3 sets de paramètre à l'exception de deux pics de débit (P2 et P4), ce qui explique que les indicateurs globaux de qualité du modèle sont inférieurs à ceux des bassins versants de Schéimelzerbesch, Grondmillen et Bavigne. Le pic P4 est également mal simulé pour les autres BVs mais l'impact sur les indicateurs de qualité des modèles est moins important car ce pic est moins marqué. On remarque également qu'à l'instar de la station de Bavigne, la fait de disposer de trois sources d'information différentes sur les sols, dont une peu détaillée, permet néanmoins d'aboutir à des résultats satisfaisants.

6.4. Le bassin versant de la station de Bigonville

Le bassin versant de la station de Bigonville qui présente une superficie de 308,44 km² se situe essentiellement en Wallonie. Il englobe le bassin versant de Rommelerkraiz et a été divisé par SWAT en 1515 sous-bassins versants (Figure 46). Le relief est relativement modéré sur la partie amont du bassin versant comparés aux autres bassins versants. Cela se marque par des pentes moins fortes car un peu plus de 45 % d'entre elles sont inférieures à 10%. Les vallons et vallées à l'aval du bassin versant sont toutefois relativement fort encaissés et présentent pour la plupart des pentes supérieures à 20 % (Figure 47).

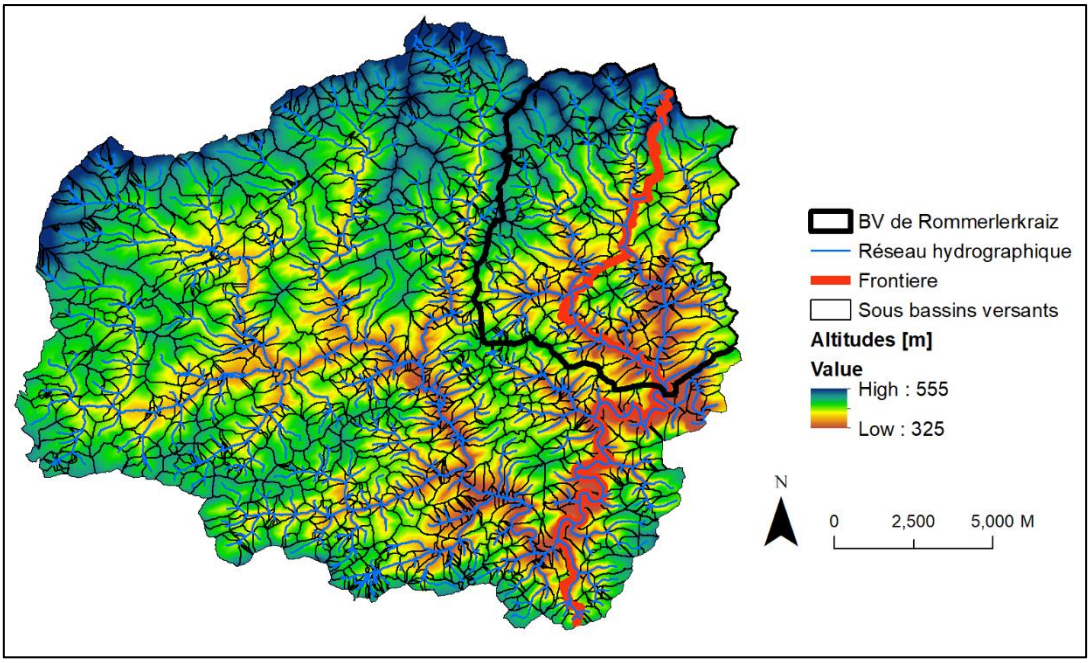


Figure 46 : Bassin versant et sous-bassins versants de la station de Bigonville

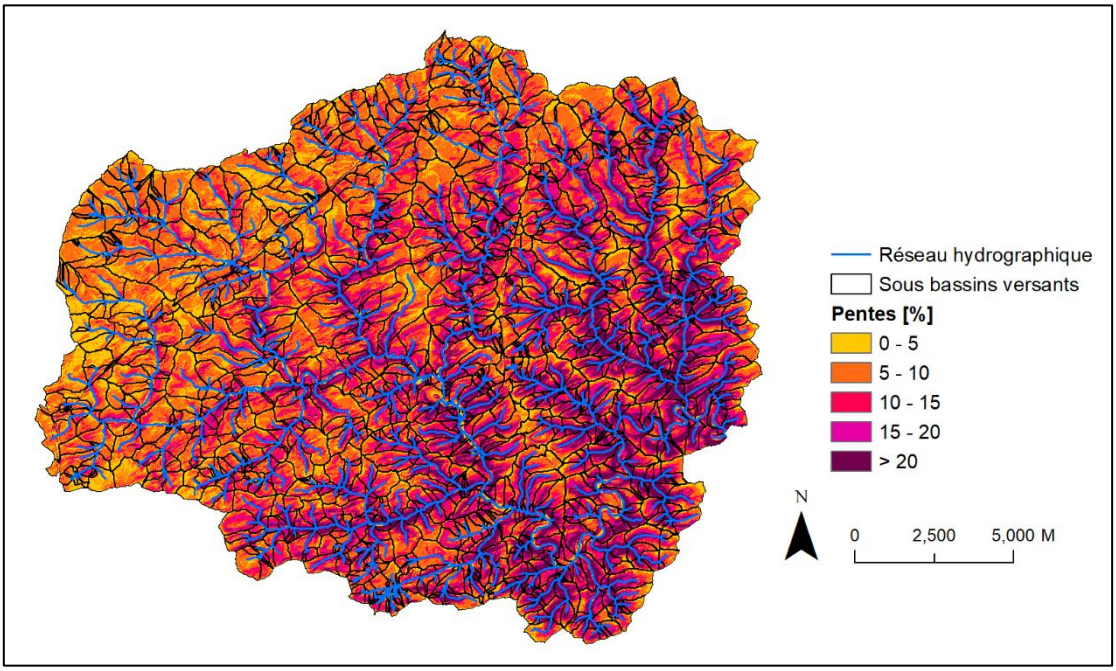


Figure 47 : Pente du bassin versant de la station de Bigonville

Le bassin versant est très peu urbanisé puisque moins de 3 % de la surface est artificialisée (Figure 48). Le bassin versant est fortement agricole (51 % de la surface) dont près de deux tiers occupés en permanence par des prairies sur la période 2015 à 2017. On retrouve comme pour les autres bassins versants une surface importante en forêt (41%) et environ 5% d'autres espaces naturels. L'information sur le type de sol provient de trois sources de données différentes (Figure 49).

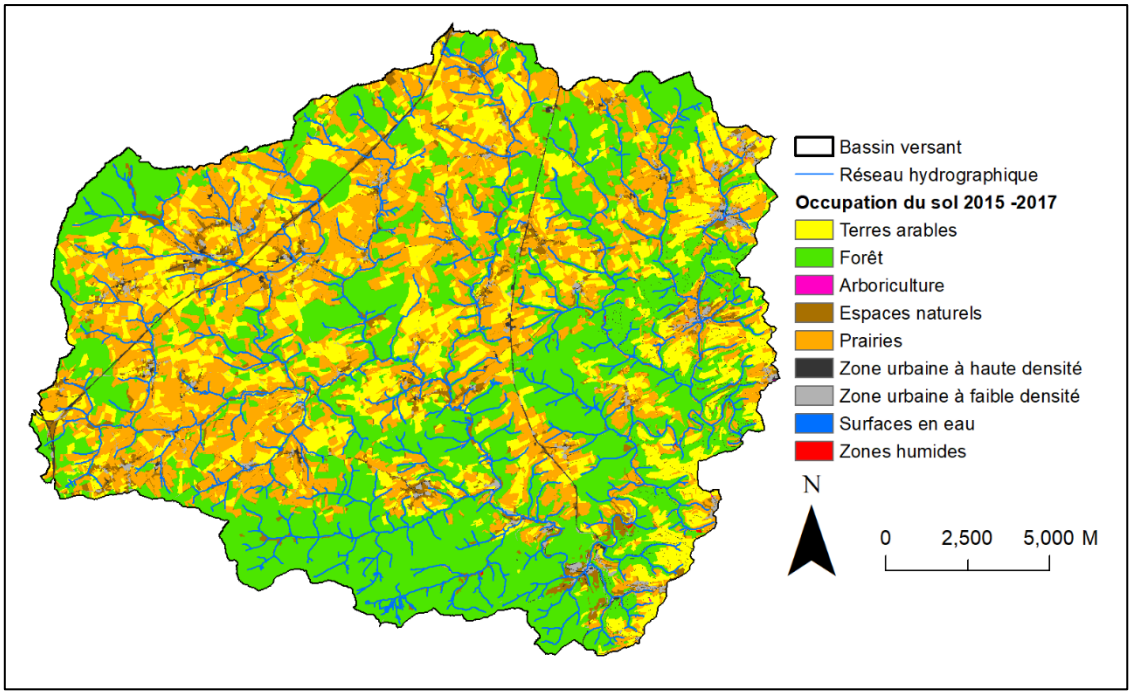


Figure 48 : Occupation du sol du bassin versant de la station de Bigonville

La carte numérique des sols de Wallonie couvre la plus grande partie, celle du bassin versant située en Wallonie, tandis que sur la partie luxembourgeoise l'essentiel de l'information provient de la carte de sols au 1 :25.000 à l'exception de la partie la plus au Nord provenant de la carte d'association de sols au 1 :100.000. Les sols sont essentiellement à texture argilo-limono-caillouteuse avec une charge principalement définie comme caillouteuse à très caillouteuse (Figure 49). On note la présence de sols peu caillouteux sur les parties les plus amont du bassin versant à l'Ouest et au Nord. Sur la partie wallonne, quelques inclusions de sols non caillouteux limoneux sont renseignées tandis que la partie couverte par la carte des associations de sols indique quelques inclusions d'argile légère. Il s'agit des inclusions que l'on retrouve sur le bassin versant de Rommelerkraiz. Sur les plateaux, on retrouve principalement des sols à drainage excessif à légèrement excessif avec une profondeur comprise entre 40 cm à plus de 80 cm. Les sols les plus profonds sont essentiellement renseignés sur la partie wallonne du bassin versant. Dans la vallée de la Sûre et sur la partie luxembourgeoise, la profondeur des sols est principalement définie comme variable ou entre 20 et 40 cm. Sur ce bassin versant également, les fonds de valons sont définis en classe de drainage de modéré à imparfait du côté luxembourgeois alors qu'ils sont principalement classés comme pauvre du côté wallon.

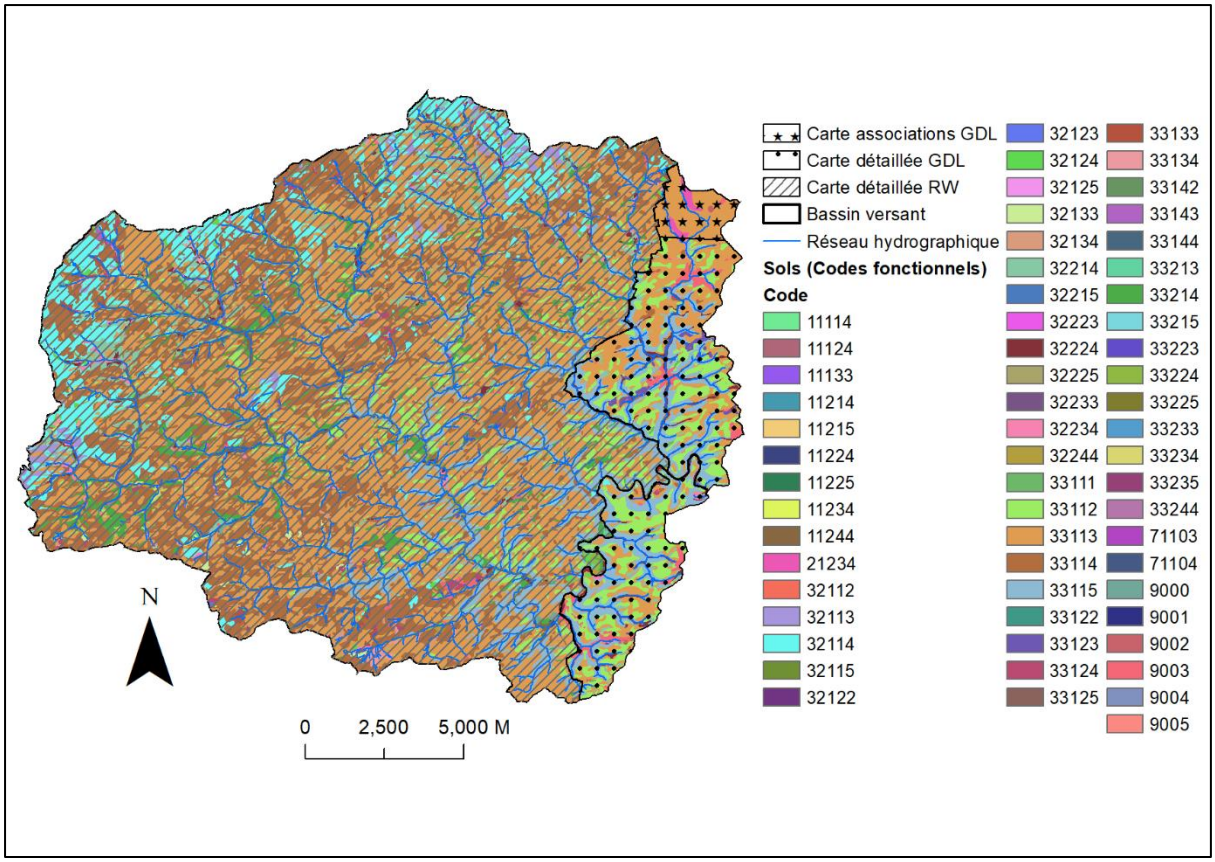


Figure 49 : Sols du bassin versant de la station de Bigonville

Le bassin versant de la station de Bigonville a été paramétré dans SWAT en suivant la même méthodologie que celle appliquée aux autres bassins versants. Les stations météorologiques qui ont été prises en compte sont les stations d'Amberloup, de Libramont, de Bigonville, de Harlange et de Holtz. Au total, 101229 HRUs ont été créées. Par comparaison, le nombre de HRUs sur le bassin versant de Rommelerkraiz (64, 69 km², 297 sous-bassins versants) est de 21386. Deux problèmes ont dès lors été rencontrés. Le premier concerne la taille de la base de données liée au modèle paramétré qui approche la taille de 2GB, c'est-à-dire la taille limite autorisée par ArcSWAT. Il en résulte qu'il faut être attentif lors de la manipulation du modèle et de sa paramétrisation à compresser régulièrement la base de données lors de l'ajout de toute nouvelle information car en cas de dépassement de la taille limite autorisée, certaines informations peuvent être perdues. La seconde limite concerne le temps de calcul dans ArcSWAT. Nous ne sommes pas parvenus à faire tourner le modèle mais nous estimons néanmoins le temps de calcul de l'ordre de 36h. A cela, il faut ajouter que la taille estimée du fichier « output.rch » qui stocke les résultats sera de l'ordre de 56GB. Il en résulte que le modèle, même si l'on parvient à le faire tourner, est très peu « maniable ».

Pour pallier à ces différents problèmes, il a été décidé de réduire le nombre de HRUs sur le bassin versant. Pour cela, différentes options sont possibles via le menu « HRU Definition » de la barre d'outils « HRU Analysis » d'ArcSWAT. Les deux premières options consistent à définir une HRU unique par sous-bassins versant et qui correspond soit à la HRU dominante, soit à la combinaison du type dominant d'occupation du sol, de sol et de classe de pente. Quelle que soit l'option choisie, cela aboutit à la création de 1515 HRUs. Une autre option est de maintenir un nombre multiple de HRUs (option « Multiple HRUS) par sous-bassin versant mais en ne conservant par sous-bassin versant que les occupations du sol, sols et classes de pente qui occupent une surface supérieure à un certain seuil à définir par l'utilisateur. Dans ce cas de figure, SWAT réattribue les surfaces occupées par les occupations du sol, sols et classes de pente ignorées aux occupations du sol, sols et classes de pente restantes proportionnellement à leurs proportions surfaciques. La dernière solution, quant à elle, consiste à fixer le nombre de HRUs désiré (option « Target Number of HRUS »). Nous n'avons à ce jour pas trouvé de documentation sur la manière dont ArcSWAT opère pour diminuer le nombre de HRUs. Néanmoins, au regard de la méthode exposée précédemment et de l'analyse des regroupements effectués, il est supposé qu'ArcSWAT opère de manière similaire à l'option « Multiple HRUs », c'est-à-dire par seuillage et réaffectation des différentes variables proportionnellement à la distribution surfacique des variables dominantes.

Plusieurs seuils ont été testés en utilisant l'option « Multiple HRUs ». Il s'avère qu'il est difficile de trouver une relation directe entre le seuil appliqué et le nombre de HRUs résultant et qui va conditionner la « maniabilité » du modèle. De plus le seuillage qui induit une perte d'information sur les plus petites unités d'occupation du sol, de sol et de classes de pente a un effet d'autant plus marqué sur les surfaces agricoles. En effet, comme les surfaces agricoles ont été identifiées sur base des successions culturales uniques de 2015 à 2017, les différentes rotations occupent de très faibles surfaces à l'échelle d'un sous-bassin versant qui sont réaffectées majoritairement à l'occupation du sol principale à savoir la forêt. Pour pallier à ces problèmes nous avons décidé de définir les HRUs sur base de l'option « Target Number of HRUs » de manière à pouvoir maitriser et choisir le nombre de HRUs. Les successions culturales ont été regroupées pour constituer des classes avec surfaces plus importantes de manière à ne pas être trop diluées lors de la définition des HRUs.

Sur base de la distribution des successions culturales, seules 4 classes ont été conservées :

- RRRX : les parcelles avec 3 prairies sur 3 ans
- LRRX : les parcelles avec deux prairies et une culture (céréale de printemps) sur 3 ans
- AARX : les parcelles avec une prairie et deux cultures (céréale d'hiver) sur 3 ans
- LLLX et AGRL : les parcelles avec 3 cultures (céréale de printemps) sur 3ans

Après simplification des successions culturales, le nombre de HRUs diminue mais est toujours important puisqu'il passe de 101229 à 92558. Afin d'évaluer l'impact du nombre de HRUs sur la qualité des résultats du modèle, plusieurs essais ont été effectués à savoir diviser le nombre de HRUs par 2, 3, 4 et définir une HRU unique par sous-bassin versant sur base de l'occupation du sol, du sol et de la classe de pente dominants. Le nombre de HRUs testé est respectivement de 46280, 30853, 23140 et 1515.

La Figure 50, la Figure 51, la Figure 52 et la Figure 53 présentent les débits mesurés à la station de Bigonville et les résultats issus des simulations pour respectivement un nombre de HRUs divisé par 2,3 et 4 par rapport au nombre de HRUs initial ainsi qu'une HRU inique par sous-bassin versan.t Ces figures montrent que la série temporelle de débits relevés à la station de Bigonville présentent la même dynamique que les débits observés aux autres stations du bassin versant d'Esch-sur-Sûre. Les débits sont néanmoins plus importants que pour les autres stations du fait de de la taille du bassin versant de Bigonville. Les différentes options de réduction du nombre de HRUs montrent des résultats quasiment identiques et satisfaisants (Figure 54). Les indicateurs de performance sont même pour la plupart très légèrement supérieurs pour la simulation avec une unique HRU par sous-bassin versant. Le set#1 est celui qui fournit les meilleurs résultats quel que soit la simulation et l'indicateur de performance considéré.

Lorsque l'on découpe la série temporelle selon les périodes de débits de base ou faibles pics et périodes de pics de plus forte intensité, on distingue 6 périodes identiques aux autres bassin versant (à l'exception d'un pic plus marqué pour le bassin versant de Rommelerkraiz) Pour chacune de ces périodes et pour chaque scénario de diminution du nombre de HRUs, le coefficient de Nash-Sutcliffe (NS) a été calculé (Tableau 18). On remarque que pour chaque set de paramètre, les NS sont quasiment identiques quel que soit le scénario de diminution du nombre de HRUs. Les périodes de pic P1 et P6 sont les mieux simulées par les 3 sets de paramètres ($0.77 < NS < 0.92$). La période de pic P2 est mal simulée par les 3 sets qui, comme pour le bassin versant de Rommelerkraiz, surestiment les débits avec en plus un léger décalage. Le meilleur résultat est obtenu avec le set#1 et une unique HRU par sous-bassin versant ($NS = 0.62$). La période de pic P4 est moins bien simulée mais les set#1 ($0.61<NS$ 0.63) et le set#3 ($0.66 < NS < 0.67$) présentent toutefois des résultats satisfaisants. La période débit de base P5 est simulée de manière très satisfaisante par les 3 sets de paramètres ($0.85 < NS < 0.90$). La période P5 de débits de base et de faibles pics est mal simulée par les 3 sets de paramètres car les débits sont surestimés ($0.28 < NS < 0.37$). AU final, les sets#1 et#3 ressortent comme les plus performants.

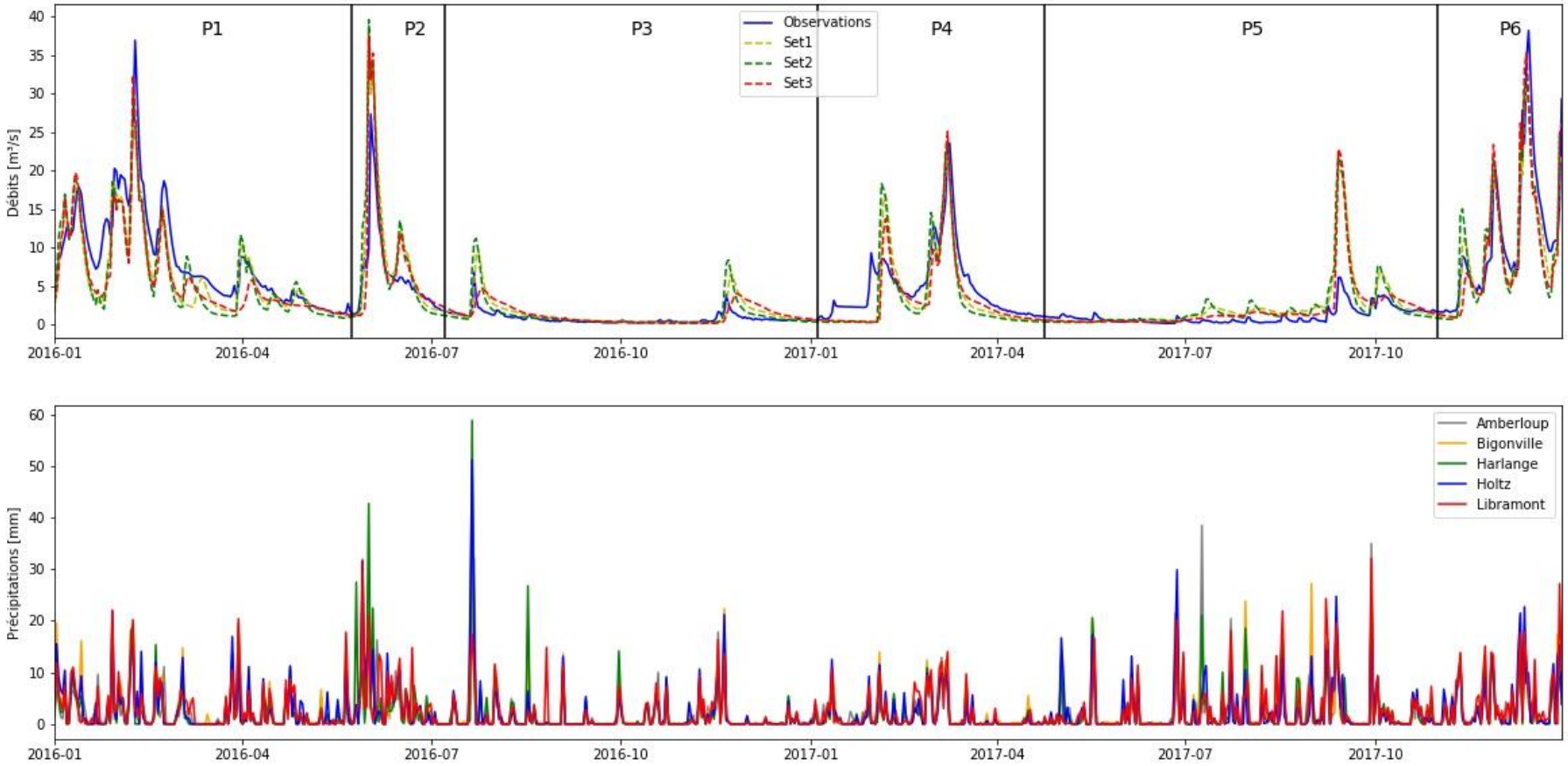


Figure 50 : Débits observés et simulés sur le bassin versant de la station de Bigonville sur base des sets de paramètres 1, 2 et 3 issus de la calibration et pour un nombre de HRUs divisé par 2 sur base de l'option « Target Number of HRUs » par rapport au nombre initial de HRUs.

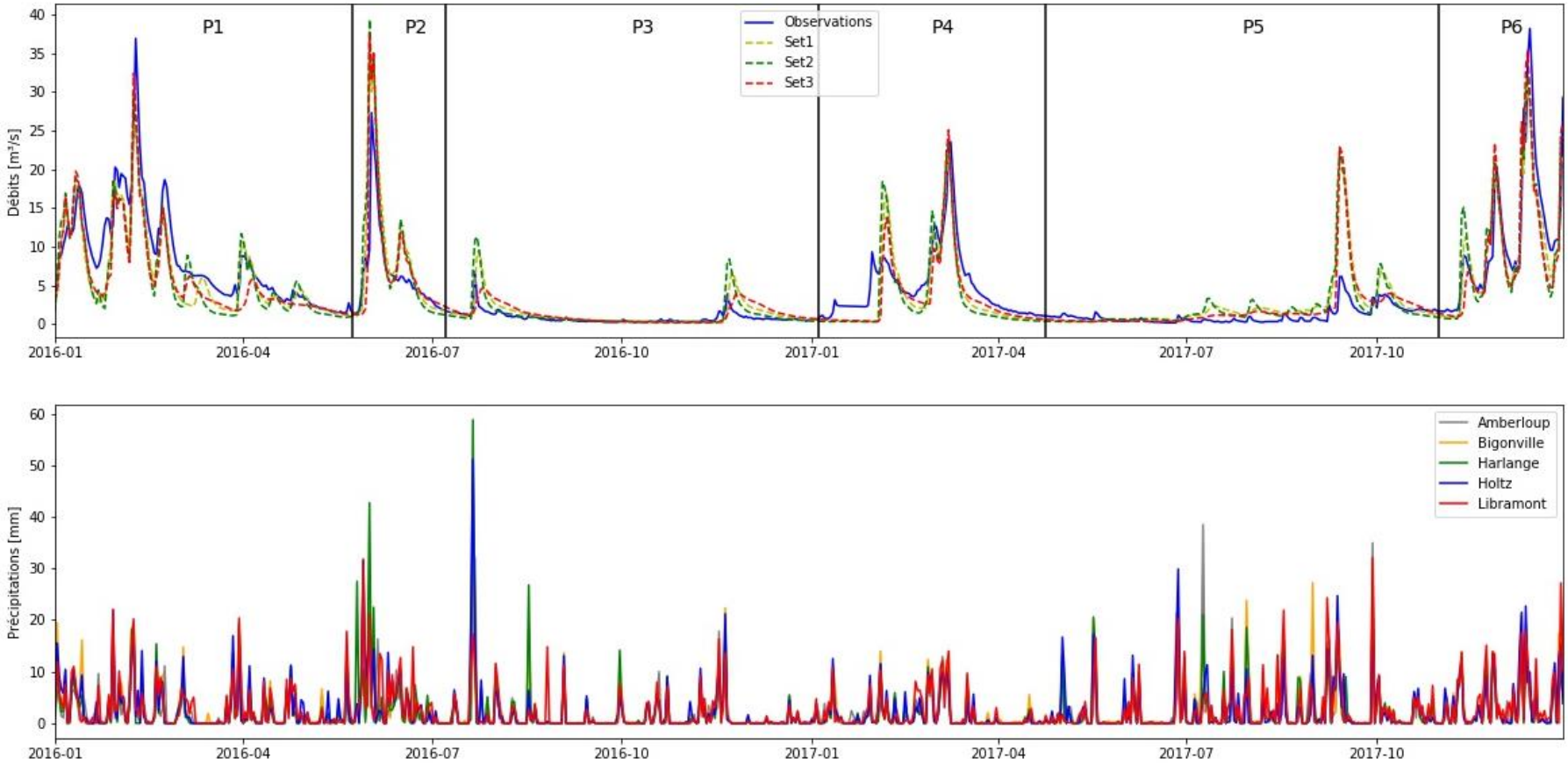


Figure 51 : Débits observés et simulés sur le bassin versant de la station de Bigonville sur base des sets de paramètres 1, 2 et 3 issus de la calibration et pour un nombre de HRUs divisé par 3 sur base de l'option « Target Number of HRUs » par rapport au nombre initial de HRUs.

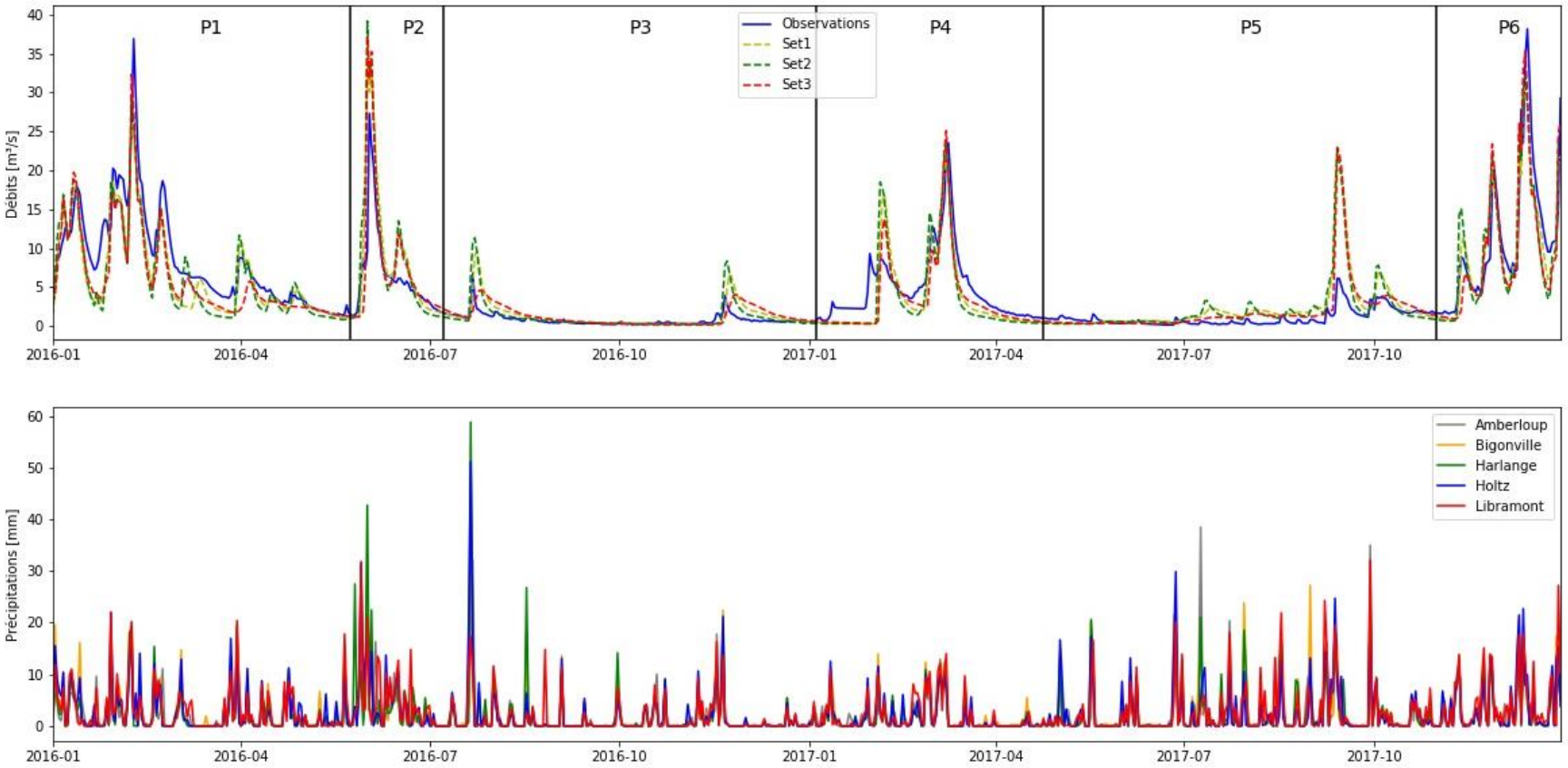


Figure 52 : Débits observés et simulés sur le bassin versant de la station de Bigonville sur base des sets de paramètres 1, 2 et 3 issus de la calibration et pour un nombre de HRUs divisé par 4 sur base de l'option « Target Number of HRUs » par rapport au nombre initial de HRUs.

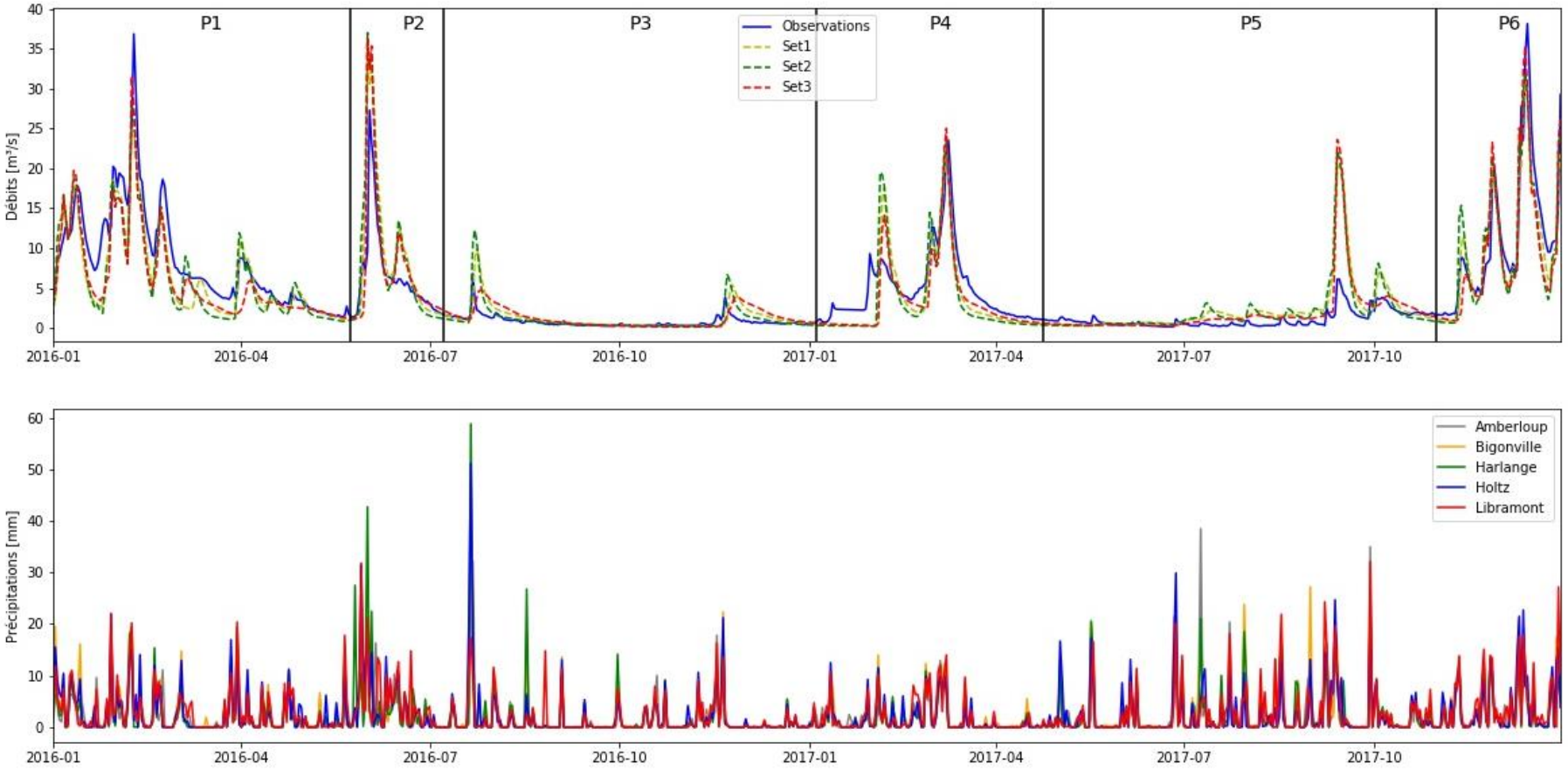


Figure 53 : Débits observées et simulés sur le bassin versant de la station de Bigonville sur base des sets de paramètres 1, 2 et 3 issus de la calibration en considérant une HRU unique par sous-bassin versant sur base de l'option « Dominant Land use, Soil, Scope ».

		D2 - n Hrus = 46280		
		Set#1	**Set#2**	**Set#3**
Validation *(Temps de calcul = 14h)*	R^2	0.76	0.72	0.76
	NS	0.75	0.69	0.74
	KGE	0.87	0.84	0.85
	bR^2	0.65	0.64	0.65
	MSE	8.0	10.0	8.3
	SSQR	0.23	0.33	0.60
	PBIAS	2.2	4.4	7.4

		D3 - n Hrus = 30853		
		Set#1	**Set#2**	**Set#3**
Validation *(Temps de calcul = 6h)*	R^2	0.76	0.72	0.76
	NS	0.75	0.69	0.74
	KGE	0.87	0.84	0.85
	bR^2	0.65	0.64	0.65
	MSE	8.0	10.0	8.3
	SSQR	0.23	0.33	0.60
	PBIAS	2.2	4.4	7.4

		D4 - n Hrus = 23140		
		Set#1	**Set#2**	**Set#3**
Validation *(Temps de calcul = 2h30)*	R^2	0.76	0.72	0.76
	NS	0.75	0.69	0.74
	KGE	0.87	0.84	0.85
	bR^2	0.65	0.64	0.65
	RMSE	8.0	10.0	8.3
	SSQR	0.23	0.33	0.60
	PBIAS	2.2	4.5	7.4

		D999 - n Hrus = 1515		
		Set#1	**Set#2**	**Set#3**
Validation *(Temps de calcul = 10 min)*	R^2	0.77	0.73	0.76
	NS	0.76	0.70	0.74
	KGE	0.87	0.84	0.85
	bR^2	0.66	0.65	0.66
	RMSE	7.8	9.7	8.3
	SSQR	0.27	0.37	0.57
	PBIAS	2.4	4.6	7.2

Figure 54: Indicateurs de performance obtenus lors de la validation pour les 3 sets de paramètres de calibration sur le bassin versant de la station de Bigonville pour les différentes options de diminution du nombre de HRUs (R^2 : coefficient de détermination, NS : Nash-Sutcliffe, KGE : Kling Gupta Efficiency, bR^2 : produit du coefficient de déterminantion et de la pente de la doite de régression entre données simulées et mesurées, MSE : erreur quadratique moyenne , SSQR : variance, PBIAS : estimation relative (%) de la surestimation (+) ou sous estimation (-) des volumes totaux prédits). D2, D3 et D4 : division du nombre de HRUs par respectivement 2, 3 et 4 sur base de l'option « Target Number of HRUs » par rapport au nombre initial de HRUs. D999 : une HRU unique par sous-bassin versant sur base de l'option « Dominant Land use, Soil, Scope ».

Tableau 18 : Coefficients Nash-Sutcliffe pour les simulations issues des sets de paramètres 1 à 3 pour les différentes périodes de pics et de débits de base observées sur le bassin versant de la station de Bigonville et pour les différents scénario de diminution du nombre de HRUs (Figure 50, Figure 51, Figure 52 et Figure 53).). D2, D3 et D4 : division du nombre de HRUs par respectivement 2, 3 et 4 sur base de l'option « Target Number of HRUs » par rapport au nombre initial de HRUs. D999 : une HRU unique par sous-bassin versant sur base de l'option « Dominant Land use, Soil, Scope ».

		Coefficient de Nash-Sutcliffe					
		Période 1 (01/01/16 - 24/05/16)	*Période 2 (25/05/16 - 08/07/16)*	*Période 3 (09/07/16 - 04/01/17)*	*Période 4 (05/01/17 - 24/04/17*	*Période 5 (24/04/17 - 31/10/17)*	*Période 6 (01/11/17 - 31/12/17)*
D2	Set#1	0.82	0.32	0.85	0.63	0.32	0.90
	Set#2	0.77	0.08	0.85	0.52	0.28	0.85
	Set#3	0.80	0.29	0.90	0.67	0.37	0.86
D3	Set#1	0.82	0.32	0.85	0.63	0.32	0.90
	Set#2	0.77	0.09	0.85	0.51	0.28	0.85
	Set#3	0.80	0.30	0.90	0.67	0.37	0.86
D4	Set#1	0.82	0.33	0.85	0.63	0.32	0.91
	Set#2	0.77	0.10	0.85	0.51	0.28	0.85
	Set#3	0.80	0.30	0.90	0.67	0.36	0.86
D999	Set#1	0.83	0.36	0.86	0.61	0.30	0.92
	Set#2	0.78	0.15	0.86	0.48	0.27	0.87
	Set#3	0.80	0.32	0.90	0.66	0.32	0.87

Ces résultats mettent en évidence que la diminution du nombre de HRUs n'entraine de pertes quant à la qualité des résultats du modèle. Cependant, aucune comparaison avec le scénario ayant le nombre intégral de HRU n'a pu être effectuée car nous n'avons pas réussi à faire tourner le modèle en raison de sa taille. Pour vérifier cette conclusion, nous avons effectué les mêmes scénarios de diminution du nombre de HRUs sur le bassin versant de Rommelerkraiz. Les résultats montrent la même tendance que pour le bassin versant de Bigonville puisque les indicateurs de qualité du modèle restent stables quel que soit le scénario de diminution du nombre de HRUs par rapport au scénario initial (Figure 55). La Figure 56 montre des résultats identiques pour les autres bassin versants où la qualité des indicateurs du modèle sont similaires lorsque l'on compare les simulations effectuées avec le nombre maximal de HRUs et celles effectuées avec une HRU unique par sous-bassin versant définie avec l'option « Dominant Land use, Soil, Slope ».

		D1 - n Hrus = 21386		
		Set#1	**Set#2**	**Set#3**
Validation	R^2	0.66	0.64	0.64
	NS	0.65	0.60	0.60
	KGE	0.78	0.77	0.76
	bR^2	0.49	0.49	0.49
	MSE	0.56	0.63	0.64
	SSQR	0.028	0.030	0.048
	PBIAS	8.2	10.8	13.0

		D2 - n Hrus = 10693		
		Set#1	**Set#2**	**Set#3**
Validation	R^2	0.66	0.64	0.64
	NS	0.65	0.60	0.60
	KGE	0.78	0.77	0.76
	bR^2	0.49	0.49	0.49
	MSE	0.56	0.64	0.64
	SSQR	0.027	0.029	0.049
	PBIAS	8.0	10.7	13.1

		D3 - n Hrus = 7126		
		Set#1	**Set#2**	**Set#3**
Validation	R^2	0.66	0.64	0.64
	NS	0.65	0.61	0.60
	KGE	0.78	0.77	0.76
	bR^2	0.49	0.49	0.49
	RMSE	0.56	0.63	0.64
	SSQR	0.027	0.028	0.049
	PBIAS	8.1	10.7	13.1

		D4 - n Hrus = 5347		
		Set#1	**Set#2**	**Set#3**
Validation	R^2	0.66	0.64	0.64
	NS	0.65	0.61	0.60
	KGE	0.78	0.77	0.76
	bR^2	0.49	0.49	0.49
	RMSE	0.56	0.63	0.64
	SSQR	0.027	0.028	0.048
	PBIAS	8.1	10.7	13.1

		D999 - n Hrus = 297		
		Set#1	**Set#2**	**Set#3**
Validation	R^2	0.67	0.65	0.64
	NS	0.66	0.63	0.61
	KGE	0.78	0.77	0.76
	bR^2	0.50	0.50	0.50
	RMSE	0.55	0.60	0.63
	SSQR	0.027	0.025	0.04
	PBIAS	8.6	11.3	13.3

Figure 55: Indicateurs de performance obtenus lors de la validation pour les 3 sets de paramètres de calibration sur le bassin versant de la station de Romerlerkraiz pour le scénario initial (D1) et les différentes options de diminution du nombre de HRUs. D2, D3 et D4 : division du nombre de HRUs par respectivement 2, 3 et 4 sur base de l'option « Target Number of HRUs » par rapport au nombre initial de HRUs. D999 : une HRU unique par sous-bassin versant sur base de l'option « Dominant Land use, Soil, Scope ».

		Bavigne - n Hrus = 7763		
		Set#1	**Set#2**	**Set#3**
Validation	R^2	0.77	0.76	0.73
	NS	0.77	0.75	0.71
	KGE	0.84	0.87	0.85
	bR^2	0.63	0.64	0.61
	MSE	0.093	0.100	0.120
	SSQR	0.011	0.006	0.006
	PBIAS	-5.9	-2.3	-2.6

		Bavigne - n Hrus = 135		
		Set#1	**Set#2**	**Set#3**
Validation	R^2	0.80	0.80	0.74
	NS	0.80	0.79	0.73
	KGE	0.86	0.88	0.86
	bR^2	0.65	0.68	0.63
	MSE	0.082	0.084	0.110
	SSQR	0.014	0.001	0.009
	PBIAS	-4.6	-0.5	-2.0

		Grondmillen - n Hrus = 5750		
		Set#1	**Set#2**	**Set#3**
Validation	R^2	0.72	0.70	0.73
	NS	0.71	0.69	0.72
	KGE	0.81	0.83	0.85
	bR^2	0.55	0.56	0.61
	RMSE	0.031	0.033	0.030
	SSQR	0.003	0.001	0.001
	PBIAS	-6.0	-2.6	-2.5

		Grondmillen - n Hrus = 73		
		Set#1	**Set#2**	**Set#3**
Validation	R^2	0.74	0.72	0.72
	NS	0.73	0.71	0.70
	KGE	0.83	0.84	0.84
	bR^2	0.58	0.58	0.60
	RMSE	0.029	0.031	0.032
	SSQR	0.003	0.002	0.001
	PBIAS	-5.9	-1.8	-4.1

		Schéimelz. - n Hrus = 5952		
		Set#1	**Set#2**	**Set#3**
Validation	R^2	0.80	0.77	0.79
	NS	0.80	0.77	0.79
	KGE	0.84	0.84	0.82
	bR^2	0.63	0.63	0.63
	RMSE	0.027	0.031	0.029
	SSQR	0.004	0.002	0.004
	PBIAS	5.4	7.7	10.5

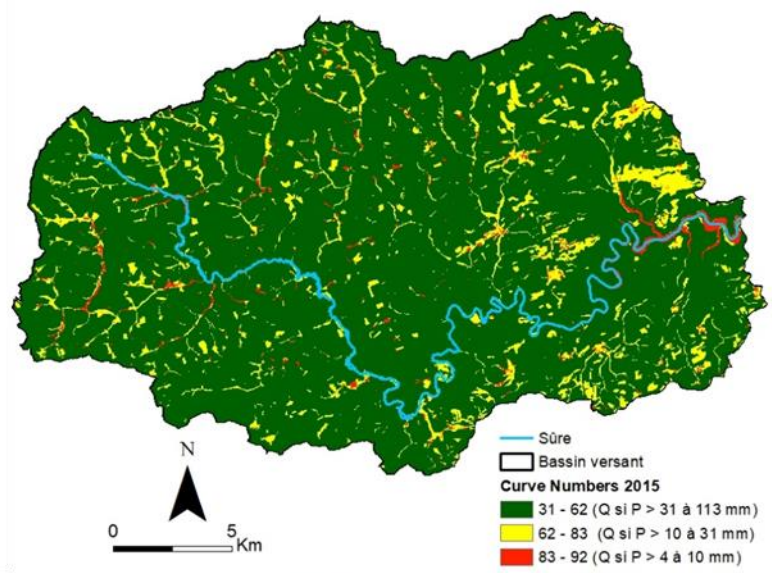
		Schéimelz. - n Hrus = 85		
		Set#1	**Set#2**	**Set#3**
Validation	R^2	0.81	0.79	0.78
	NS	0.81	0.78	0.78
	KGE	0.84	0.83	0.83
	bR^2	0.65	0.65	0.63
	RMSE	0.026	0.029	0.030
	SSQR	0.004	0.023	0.004
	PBIAS	7.6	10.1	9.3

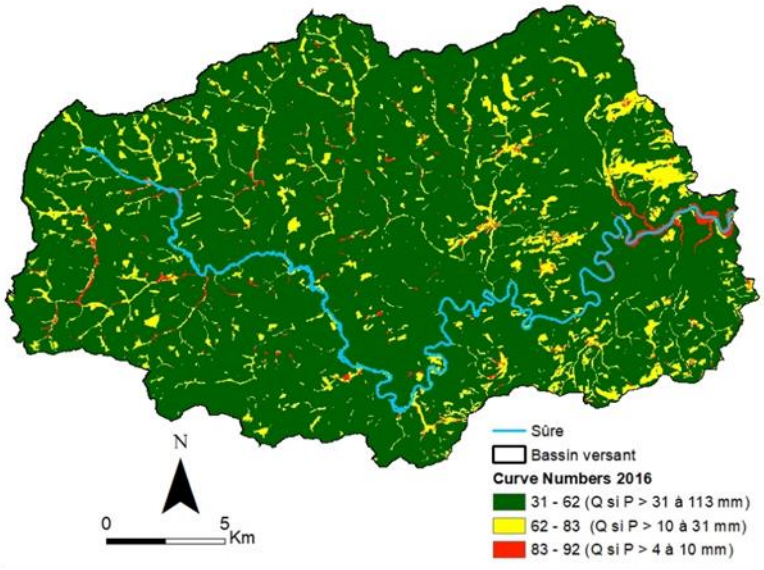
Figure 56: Indicateurs de performance obtenus lors de la validation pour les 3 sets de paramètres de calibration sur les bassin versants des stations de Bavigne, Grondmillen et Schéimelzerbesch pour le scénario initial (à gauche) et une HRU unique par sous-bassin versant définie avec l'option « Dominant Land use, Soil, Slope ». D2, D3 et D4 : division du nombre de HRUs par respectivement 2, 3 et 4 sur base de l'option « Target Number of HRUs » par rapport au nombre initial de HRUs. D999 : une HRU unique par sous-bassin versant sur base de l'option « Dominant Land use, Soil, Scope ».

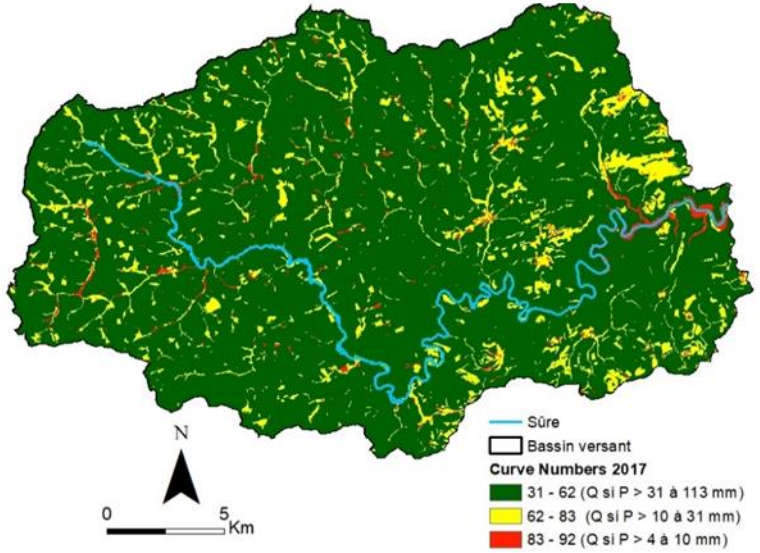
L'impact limité de la diminution du nombre de HRUs sur les résultats du modèle peut s'expliquer par le fait que les principaux paramètres qui déterminent les écoulements sur le bassin versant sont peu variables au sein du bassin versant à l'image des Curve Number (Figure 57) qui déterminent la proportion de la part des précipitations qui ruissellent et qui s'infiltrent. D'une année à l'autre, l'essentiel des Curve Number (89% de la surface), déterminés sur base de l'occupation du sol et du groupe hydrologique du sol, indiquent que des pluies d'au moins 31 mm par jour sont nécessaires pour initier du ruissellement pour des conditions d'humidité moyenne. Ceci montre donc que les écoulements sont très peu sensibles à l'occupation du sol. En deçà de ce seuil, les précipitations sont infiltrées. Seuls 1,3% de la surface sont plus réactifs en termes de ruissellement puisque le seuil pour l'initiation du ruissellement y est de 4 à 10 mm/jour (CN de 83 à 92). Il s'agit des cultures sarclées sur sols de groupes hydrologiques C ou D ou des prairies et céréales sur sols de groupe hydrologique D. Les 10 % de surface restantes nécessitent des pluies d'au moins 10 mm / jour pour initier du ruissellement (CN de 62 à 83). Les regroupements des principales occupations du sol à l'échelle du sous-bassin versant lors de la diminution du nombre de HRUS conduisent donc à des bilans ruissellement / infiltration quasiment identiques comparativement aux situations sans regroupement d'occupation du sol.

Une fois dans le sol, les paramètres variables qui influencent la vitesse d'écoulement sont principalement la conductivité hydraulique à saturation et la réserve en eau utile. La Figure 58 montre la variabilité de la conductivité à saturation calibrée pour chaque horizon sur le bassin versant de la Sûre. La variabilité de ce paramètre est d'autant moins importante que l'on s'enfonce dans le profil de sol. Si l'on calcule la moyenne de l'écart type de ce paramètre par sous-bassin versant selon les différents bassins versants, on remarque que les conductivités hydrauliques à saturation des horizons les plus profonds (Horizon 2 et Horizon 3) ont une variabilité très faible de l'ordre de 2.1 à 3.6 mm/h (Tableau 19). L'horizon 1 est celui qui présente la variabilité la plus élevée qui est comprise entre 7.8 et 9.6 mm/h selon le bassin versant considéré. La Figure 59 montre la variabilité spatiale de la réserve en eau utile (RU) par horizon sur le bassin versant. Il s'agit de la RU calibrée par le set#1 (52 % de la valeur renseignée lors de la paramétrisation). On remarque que les RU les plus importantes se trouvent du côté wallon du bassin versant de la Sûre, là où les sols les plus profonds ont été renseignés. Le Tableau 20 montre que ce paramètre présente en moyenne une très faible variabilité au sein d'un sous-bassin versant et cela quel que soit le bassin versant considéré.

Cette analyse confirme que les paramètres variables à l'échelle du bassin versant et qui influencent les écoulements (CN, Ksat et RU) ont une variabilité très faible à l'échelle des sous-bassins versant. Il en résulte que la diminution du nombre de HRUs par regroupement et redistribution des occupations du sol et des sols a un impact quasiment nul sur les résultats du modèle. L'annexe 19 montre le bilan annuel des principaux types d'écoulement par sous bassins versant sur le BV de Bigonville.







	% de la surface du BV	
	CN < 62	***CN > 83***
2015	89.6	1.3
2016	89.3	1.3
2017	89.0	1.3

Figure 57: Variabilité spatiale des valeurs des coefficients CNs pour 2015, 2016 et 2017 pour le BV de la Sûre

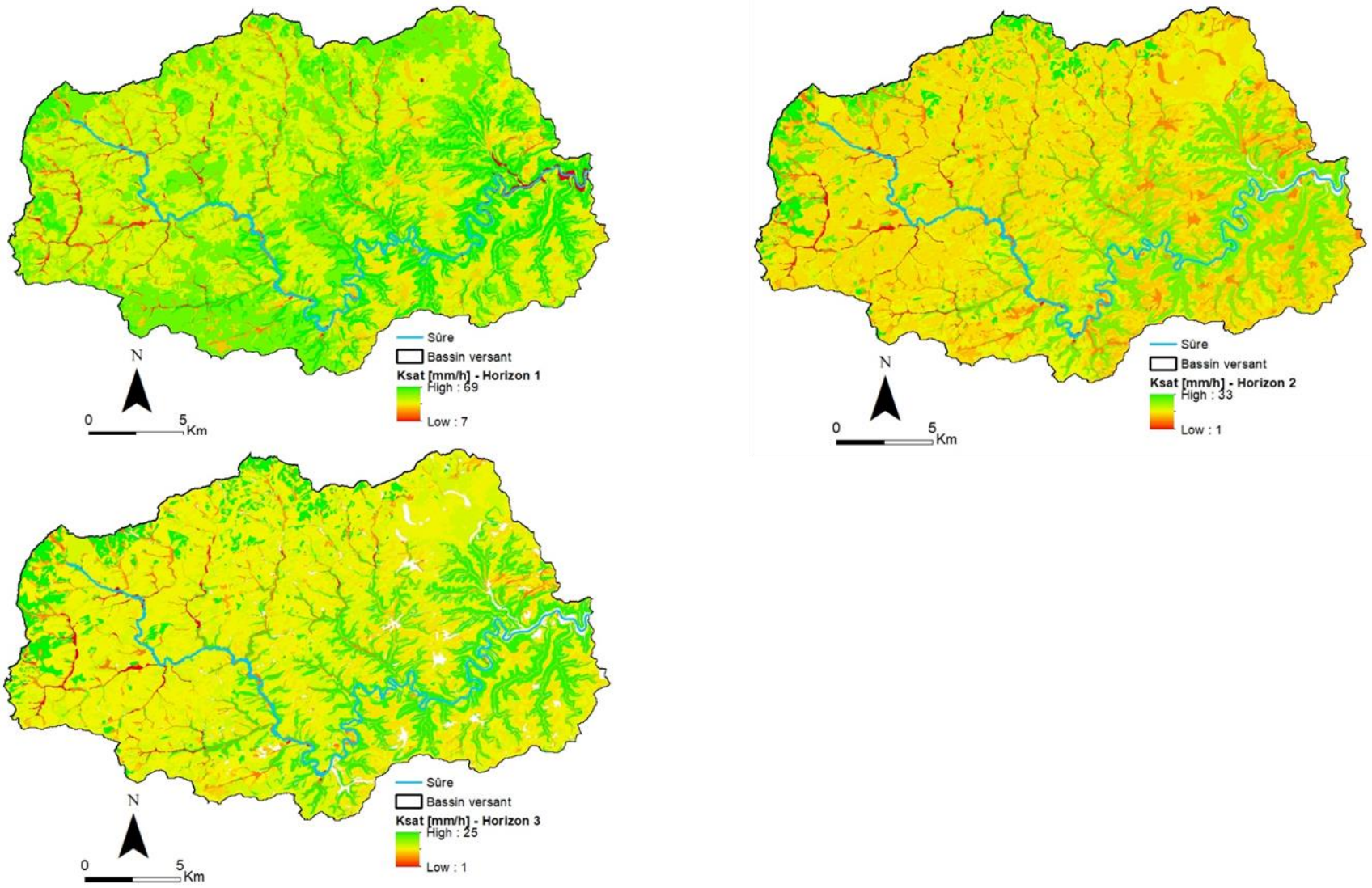


Figure 58: Variabilité spatiale de la conductivité hydraulique à saturation (Ksat, [mm/h) des 3 horizons définis pour les sols du BV de la Sûre

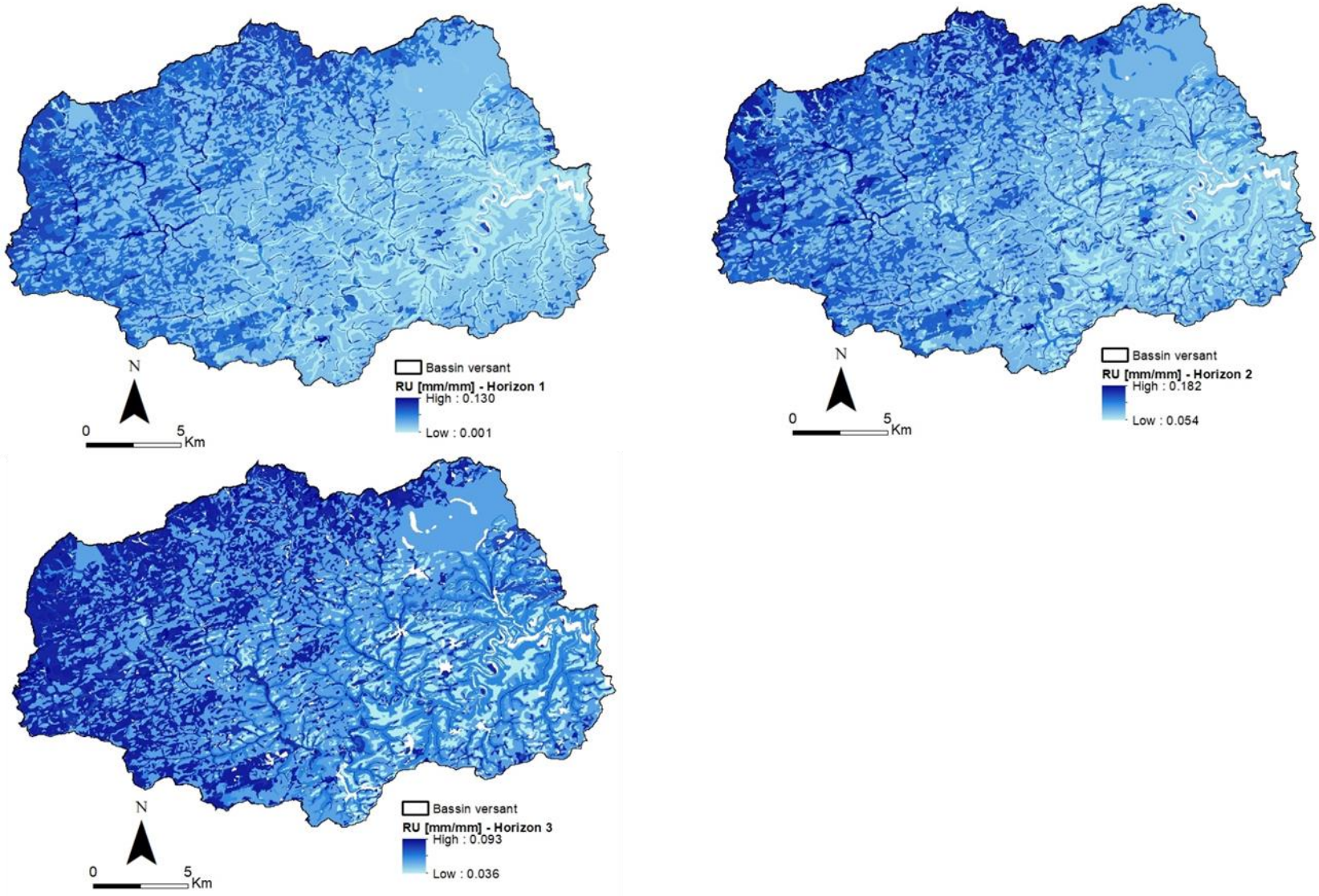


Figure 59: Variabilité spatiale de la réserve en eau utile (RU, [mm/mm]) des 3 horizons définis pour les sols du BV de la Sûre

Tableau 19 : Moyenne de l'écart type de la conductivité hydraulique (Ksat, [mm/h]) calculée sur les sous-bassins versants des différents bassins versants

	Moyenne de l'écart-type du Ksat [mm/h] sur les sous-bassins versants		
Bassin versant	***Horizon 1***	***Horizon 2***	***Horizon 3***
Bavigne	7.8 ± 3.0	2.7 ± 1.7	2.2 ± 1.3
Bigonville	8.8 ± 4.0	3.0 ± 1.7	2.2 ± 1.1
Grondmillen	9.6 ± 2.9	3.6 ± 1.3	2.5 ± 1.0
Rommelerkraiz	8.8 ± 3.5	3.1 ± 1.6	2.4 ± 1.1
Schéimelzerbesch	8.6 ± 3.1	3.0 ± 1.4	2.1 ± 1.0

Tableau 20 : Moyenne de l'écart type de la réserve en eau utile (RU, [mm/mm]) calculée sur les sous-bassins versants des différents bassins versants

	Moyenne de l'écart-type de la RU [mm/mm] sur les sous-bassins versants		
Bassin versant	***Horizon 1***	***Horizon 2***	***Horizon 3***
Bavigne	0.003 ± 0.003	0.003 ± 0.002	0.004 ± 0.003
Bigonville	0.005 ± 0.002	0.005 ± 0.004	0.006 ± 0.002
Grondmillen	0.004 ± 0.001	0.004 ± 0.001	0.006 ± 0.002
Rommelerkraiz	0.004 ± 0.002	0.005 ± 0.005	0.006 ± 0.003
Schéimelzerbesch	0.004 ± 0.001	0.004 ± 0.001	0.006 ± 0.001

La station de Bigonville disposant de données de débit depuis 1996, nous avons également effectué une validation sur une plus longue série temporelle sur ce bassin versant. Les données météorologiques étant limitées du côté wallon par la station d'Amberloup mise en place en mars 2007, la simulation a été effectué du 01/01/2008 à 31/12/2017 soit sur 10 ans. Il est à noter que du côté luxembourgeois, les données météorologiques sont différentes que lors des simulations précédentes car certaines stations n'étaient pas non plus en place en 2008. Les stations suivantes ont donc été considérées : Esch-sur-Sûre, Eschdorf, Arsdorf et Schimpach. L'occupation du sol prise en compte pour les surfaces en culture est la rotation 2015-2017 qui se répète sur la durée de la simulation (2008-2017). En dehors des surfaces agricoles, l'occupation du sol est invariable. La période 2008 à 2011 a été dédiée au préchauffage du modèle et les débits simulés couvrent donc la période 2012 à 2017. Les simulations ont été effectuées sur base d'une HRU unique par sous-bassin versant. Les 3 sets de paramètres issus de la calibration fournissent des résultats satisfaisants (Figure 60 et Tableau 21) et relativement équivalents à ceux obtenus en validant simplement sur les années 2016 et 2017. Les indicateurs sont toutefois légèrement moins bons et les Sets #1 et #3 montrent de meilleurs résultats que le Set#2.

Tableau 21 : Indicateurs de performance obtenus lors de la validation des différents sets de paramètres sur le bassin versant de la station de Bigonville pour la période 2012-2017 (R^2 : coefficient de détermination, NS : Nash-Sutcliffe, KGE : Kling Gupta Efficiency, bR^2 : produit du coefficient de déterminantion et de la pente de la doite de régression entre données simulées et mesurées, MSE : erreur quadratique moyenne , SSQR : variance, PBIAS : estimation relative (%) de la surestimation (+) ou sous estimation (-) des volumes totaux prédits)

		Set#1	Set#2	Set#3
Validation	R^2	0.74	0.72	0.74
	NS	0.71	0.65	0.70
	KGE	0.85	0.80	0.83
	bR^2	0.67	0.67	0.68
	MSE	9.6	12.0	9.9
	SSQR	0.99	1.5	0.75
	PBIAS	2.8	5.9	7.5

La série temporelle des débits a été découpé en 13 périodes permettant de distinguer les situations au printemps-été d'une part et en automne-hiver d'autre part (Tableau 22). Les coefficients de Nash-Sutcliffe calculés pour chacune de ces périodes mettent en évidence le fait que les débits sur la période automne-hiver sont simulés de manière très satisfaisantes quelle que soit l'année considéré ainsi que le set de paramètres considéré. Le Set#1 présente néanmoins des résultats légèrement supérieurs dans la totalité des cas. Les débits au printemps-été sont moins bien simulés en particulier pour les années 2012, 2014 et 2015. Les résultats sont plus satisfaisants pour les années 2016 et 2017 pour lesquelles le modèle a été calibré sur le bassin de Schéimelzerbesch. Dans tous les cas les meilleurs résultats pour la période printemps-été sont obtenus avec le set de paramètre #3. Les moins bons résultats semblent être liés à une surestimation systématique des pics de débit ainsi que du débit de base.

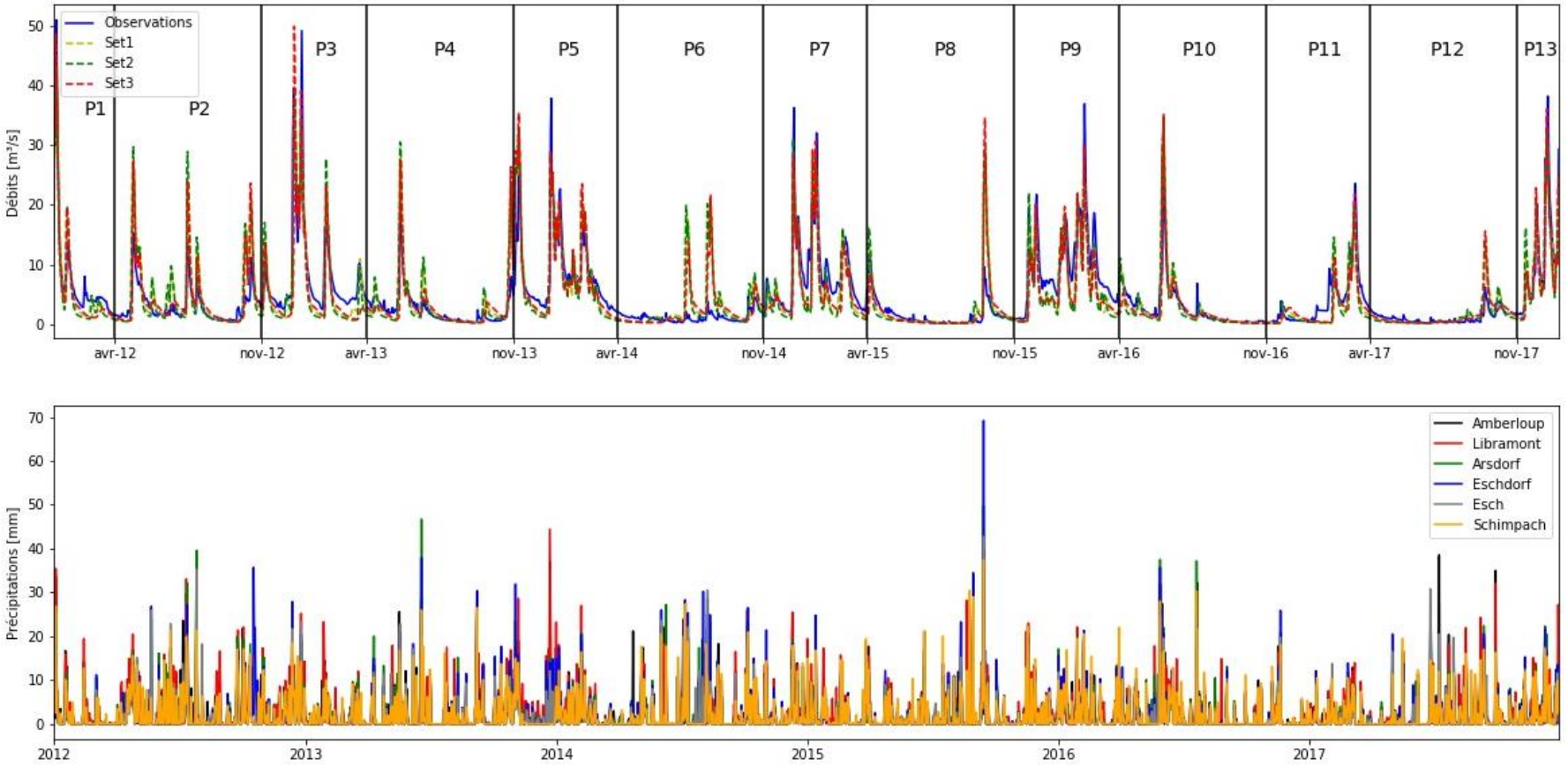


Figure 60 : Débits observés et simulés sur le bassin versant de la station de Bigonville pour la période 2012-2017 sur base des sets de paramètres 1, 2 et 3 issus de la calibration

Tableau 22 : Coefficients Nash-Sutcliffe pour les simulations issues des sets de paramètres 1 à 3 pour les différentes périodes de pics et de débits de base observées sur le bassin versant de la station de Bigonville pour la période 2012-2017 (Figure 60).

Coefficient Nash-Sutcliffe			
Période	*Set#1*	*Set#2*	*Set#3*
Période 1 (01/2012 - 03/2012)	0.94	0.91	0.90
Période 2 (04/2012 - 10/2012)	-0.33	-0.71	0.10
Période 3 (11/2012 - 03/2013)	0.78	0.72	0.72
Période 4 (04/2013 - 10/2013)	0.48	0.35	0.56
Période 5 (11/2013 - 03/2014)	0.82	0.76	0.76
Période 6 (04/2014 - 10/2014)	-0.47	-0.58	0.02
Période 7 (11/2014 - 03/2015)	0.78	0.74	0.76
Période 8 (04/2015 - 10/2015)	0.29	0.20	0.00
Période 9 (11/2015 - 03/2016)	0.78	0.75	0.75
Période 10 (04/2016 - 10/2016)	0.74	0.66	0.74
Période 11 (11/2016 - 03/2017)	0.71	0.67	0.69
Période 12 (04/2017 -10/2017)	0.84	0.83	0.84
Période 13 (11/2017 -12/2017)	0.91	0.87	0.88

7. Conclusions et perspectives

La calibration et la validation du modèle SWAT sur le bassin versant transfrontalier de la Sûre a nécessité un premier travail d'uniformisation des données wallonnes et luxembourgeoises au niveau de la topographie, du réseau hydrographique, de l'occupation du sol, des données météorologiques et des données pédologiques. Les différentes hypothèses émises sont reprises dans le rapport et les annexes. Après homogénéisation des données et regroupement, il subsiste toutefois des différences notamment au niveau des données pédologiques quant à la classe de drainage des sols. Il conviendrait notamment de revoir les caractéristiques des fonds de vallons limoneux 'L' du côté luxembourgeois qui ont été assimilés à un GDp1 et dont la classe de drainage devrait être dégradée de drainage modéré à imparfait à drainage assez pauvre ou pauvre.

Le modèle SWAT qui a été calibré sur le bassin versant de la station de Schéimelzerbesch et validé sur les bassins versants de Grondmillen, Bavigne, Rommelerkraiz et Bigonville fournit des résultats très satisfaisants pour la simulation des débits de 2016 à 2017. Plusieurs sets de paramètres permettent d'atteindre ces résultats. Le Set#1 permet d'obtenir d'une manière générale les meilleurs résultats avec des coefficients de Nash-Sutcliffe supérieurs à 0.70 et qui atteignent même 0.80 à l'exception du bassin versant de Rommelerkräiz. (NS = 0.65). Pour ce dernier, les moins bons résultats sont en particulier liés à un pic de débit (janvier 2017) mal reproduit par le modèle, lié probablement à une sous-estimation de la température du sol. Néanmoins, d'une manière générale, les périodes de pics (automne-hiver) sont mieux prédites que les périodes de débit de base (printemps-été) sur les différents bassins versants.

Le set de paramètre le plus performant (Set#1*)* fait intervenir 11 variables (Tableau 9). Les paramètres les moins sensibles sont liés aux phénomènes de surface comme la température de fonte de la neige où le CN après récolte. Ceci s'explique notamment par le fait que les écoulements de surface sont assez marginaux du fait de CNs en moyenne relativement faibles en raison de l'occupation du sol et des groupes hydrologiques de sol peu ruisselants. La très grande majorité des sols, soit 89%, sont en effet classés en groupe hydrologique A ce qui induit qu'environ 5 % seulement des précipitations annuelles génèrent du ruissellement de surface. Le seuil de profondeur de l'eau dans l'aquifère peu profond nécessaire pour que le flux de retour se produise et la densité apparente du sol sont également des paramètres moins sensibles. Les paramètres les plus sensibles sont ceux qui caractérisent les écoulements souterrains. La surestimation des valeurs initiales de conductivité hydraulique à saturation montre qu'il existe des fortes différences entre des valeurs de perméabilité ponctuelles (mesurées sur des cylindres de Kopecky ou via un infiltromètre double anneau) et une valeur moyenne par regroupement de sol. La calibration de ce paramètre a permis de réduire le volume et la vitesse de l'écoulement hypodermique (lateral subsurface flow) plus en accord avec les travaux du LIST sur le fonctionnement hydrologique du bassin du Weierbach. De manière générale, il est important de disposer d'une information pédologique fiable pour aboutir à une modélisation correcte.

Il a également été démontré que l'agrégation des HRUs jusqu'à son stade maximal, c'est-à-dire une HRU unique par sous-bassin versant sur base de l'occupation du sol dominante, du sol dominant et de la classe de pente dominante, n'a pas d'impact sur la qualité des résultats. En effet, d'une manière générale, quel que soit le niveau d'agrégation, les phénomènes d'écoulement de surface restent faibles en raison de la faible variabilité des CNs. La conductivité hydraulique à saturation et la capacité de rétention en eau des sols sont également peu variables à l'échelle des sous-bassin versants. Une hypothèse a été faite pour les paramètres régissant les écoulements de l'aquifère peu profond en les jugeant constants spatialement. Néanmoins si l'agrégation des HRUs à son niveau maximal permet de gagner du temps au niveau des simulations, elle ne permet plus de différencier la gestion des parcelles agricole dans une perspective de mise au point d'un outil d'aide à la décision au niveau parcellaire pour l'amélioration de la qualité de l'eau du barrage de la Sûre.

La simulation effectuée sur une plus longue période (2012-2017) sur la station de Bigonville montre des résultats satisfaisants mais plus nuancés. Elle met en évidence le contraste entre les bons résultats obtenus pour les périodes automnales à hivernales et les moins bons résultats pour les périodes printanières à estivales. Pour cette dernière, les simulations conduisent à une surestimation de certains pics de débits ainsi que du débit de base. Les résultats montrent aussi que le set#1 est celui qui prédit le mieux les débits sur la période automne-hiver alors que le set#3 est le meilleur pour la période printemps-été bien que les résultats obtenus ne soient pas très satisfaisants. Des améliorations devraient donc encore être possibles, mais cela nécessite de procéder à d'autres simulations sur les mêmes bassins versants au fur et à mesure de l'acquisition de nouvelles données de débit. Il conviendrait également d'investiguer les situations où les pics sont très largement sous-estimés ou surestimés pour en dégager les raisons (erreurs de mesure de débits, particularités pédologiques ou géologiques, parcelles drainées, présences d'aménagements hydrauliques, …). En fonction des causes identifiées, le modèle pourrait être amélioré en calibrant éventuellement des paramètres supplémentaires ou en tenant compte de la variabilité spatiale de paramètres très sensibles considérés jusqu'à présent comme constants à l'image du temps de transfert de l'eau pour la recharge de l'aquifère peu profond depuis le bas du profil du sol (GW_DELAY), de la profondeur initiale de l'eau dans l'aquifère (SHALLST) ou de la constante de récession du débit de base (ALPHA_BF). La révision de la profondeur des sols qui a été limitée à 97 cm au maximum pourrait aussi avoir un impact sur les résultats du modèle

Les modèles calibrés fournissent des résultats globalement corrects d'un point de vue qualitatif et quantitatif et montrent que les écoulements sont essentiellement souterrains. Il s'agit de la contribution de l'aquifère peu profond avec un temps de transfert modéré lié à la présence du schiste sous-jacent. Les écoulements hypodermiques (subsurface lateral flow) représentent une part non négligeable des écoulements tandis que le ruissellement de surface est très faible sur le bassin versant.

Les modèles peuvent dès à présent dès à présent être utilisés pour des simulations de transferts de polluants. La confrontation des résultats aux observations, couplée à un travail de calibration sur de plus longues séries temporelles au fur et à mesure de l'acquisition de nouvelles données, doit permettre d'aboutir à un outil d'aide à la décision pour l'amélioration de la qualité des eaux du barrage de la Sûre. En attendant, les résultats obtenus permettent de dresser par bassin versant une cartographie des écoulements préférentiels utile pour la gestion des transferts de polluants (Annexes 15 à 19). Ces cartes mettent notamment en évidence la très faible proportion du ruissellement de surface sur le bassin versant de la Sûre et la prédominance de la contribution de l'aquifère peu profond. L'annexe 20 décrit les délivrables fournis sous forme informatique en plus du présent rapport

8. Bibliographie

Arnold J.G., Kiniry J.R., Srinivasan R., Williams J.R, Haney E.B., Neitsch S.L (2012)., Soil and Water Assessment Tool: - Input/Output File documentation – Version 2012, URL : https://swat.tamu.edu/media/69296/SWAT-IO-Documentation-2012.pdf

Billo Bah, Degré A, Marx S (2016) Convention de recherche relative à la révision des cartes thématiques sur les zones à risque d'érosion et de ruissellement au Grand-Duché de Luxembourg à partir de la carte des sols, 48 p. + annexes

Demarcin P, Sohier C., Mokadem A.I., Dautrebande S. Degre A. (2011) Essai de cartographie des classes d'infiltrabilité des sols de Wallonie. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* v-15 119-128p.

Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., & Arnold, J. G. (2007). The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. Transactions of the ASABE, 50(4), 1211-1250.

Jackisch, C., Angermann, L., Allroggen, N., Sprenger, M., Blume, T., Tronicke, J., & Zehe, E. (2017). Form and function in hillslope hydrology: in situ imaging and characterization of flow-relevant structures. *Hydrology and Earth System Sciences*.*21, 3749-3775*

Lang, M., Wellens, J., Tychon, B. (2011). ArcSWAT manuel d'utilisateur - Cas du bassin versant du Kou (Burkina Faso).URL : http://www.ge-eau.org/Documents/ArcSWAT_manuel.pdf 70p.

Martínez-Carreras, N., Hissler, C., Gourdol, L., Klaus, J., Juilleret, J., Iffly, J. F., & Pfister, L. (2016). Storage controls on the generation of double peak hydrographs in a forested headwater catchment. *Journal of Hydrology*, *543*, 255-269.

Neitsch, S.L.; Arnold, J.G.; Kiniry, J.R.; Williams, J.R. (2011). Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. Texas Water Resources Institute. URL : http : / /hdl.handle.net /1969 .1 /128050.

Nau J. (2015) Contribution à la caractérisation physique et physico-chimique des sols cultivés du grand-duché de Luxembourg : application à la région naturelle de l'Oesling. Travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master bioingénieur en sciences et technologies de l'environnement 75p. Gembloux Belgique.

Qi J., Li S., Li. Q., Xing Z., Bourque, C, & Meng, F.-R. (2016). A New Soil-Temperature Module for SWAT Application in Atlantic Region with Seasonal Snow Cover. Journal of Hydrology. 538.

Scaini, A., Hissler, C., Fenicia, F., Juilleret, J., Iffly, J. F., Pfister, L., & Beven, K. (2018). Hillslope response to sprinkling and natural rainfall using velocity and celerity estimates in a slate-bedrock catchment. *Journal of Hydrology*, *558*, 366-379.

Stevens, A., & van Wesemael, B. (2014). Mapping topsoil carbon content in Grand-Duchy of Luxembourg.

Wrede, S., Fenicia, F., Martínez-Carreras, N., Juilleret, J., Hissler, C., Krein, A., Savenije, H. H. G., Uhlenbrook, S., Kavetski, D., and Pfister, L. (2015)Towards more systematic perceptual model development: a case study using 3 Luxembourgish catchments, *Hydrol. Proc.,* 29, 2731–2750.

Annexe 1 : Regroupements des codes cultures du RPG du Grand-Duché de Luxembourg

GDL CODE	Description	Classe
3	Arboriculture fruitière	ORCD
10	Maïs grain	CSIL
11	Blé hiver	AGRC
12	Orge hiver	AGRC
13	Seigle hiver	AGRC
14	Avoine	AGRL
15	Triticale hiver	AGRC
16	Céréales	AGRL
17	Maïs ensilage	CSIL
18	Céréales hiver	AGRC
21	Colza d'hiver	CANA
22	Oléagineux	AGRL
23	Colza de printemps	AGRL
24	Blé panifiable hiver	AGRC
25	Orge hiver	AGRC
26	Orge printemps	AGRL
27	Seigle hiver	AGRC
28	Navets	AGRR
31	Pois	AGRL
32	Féverole	AGRL
33	Triticale printemps	AGRL
34	Blé printemps	AGRL
35	Épeautre	AGRC
36	Orge printemps	AGRL
37	Seigle printemps	AGRL
38	Céréales printemps	AGRL
42	Chanvre	AGRR
43	Culture protéagineuse pour la production de graines	AGRL
48	Jardin	RNGE
57	Jachère	RNGE

Classe	Description
AGRC	Cultures d'hiver
CANA	Colza d'hiver
AGRL	Cultures de printemps
AGRR	Cultures sarclées
CSIL	Mais
POTA	Pomme de terre
FRST	Foret
ORCD	Arboriculture
RNGB	Prairie buissonnante
RNGE	Prairie herbeuse
URHD	Zone urbaine à forte densité
URLD	Zone urbaine à faible densité
WATR	Eau
WETN	Prairies humides

GDL CODE	Description	Classe
61	Pommes de terre	POTA
62	Jachère	RNGE
63	Betterave fourragère	AGRR
64	Graminées semences	AGRL
66	Légumineuses semences	AGRL
67	Pommes de terre plants	POTA
70	Plantes médicinales	AGRL
71	Légumineuses fourragères	AGRL
72	Plantes industrielles	AGRL
73	Raygrass	RNGE
74	Prairie temporaire	RNGE
75	Prairie permanente pâturée/fauchée	RNGE
76	Arboriculture fruitière	ORCD
77	Prairie permanente fauchée	RNGE
78	Pâture extensive	RNGE
81	Arboriculture fruitière	ORCD
82	Arboriculture fruitière	ORCD
83	Pépinière	ORCD
84	Sapins de Noël	ORCD
85	Maraîchage plein champ	AGRR
86	Maraîchage en serre	AGRL
87	Maïs ensilage	CSIL
88	Fleurs plein champ	AGRL
90	Pépinière	ORCD

GDL CODE	Description	Classe
93	Prairie permanente sans production	RNGE
94	Haies	RNGB
96	Forêt	FRST
100	Chanvre	AGRR
101	Terrain inculte	RNGE
103	Taillis à courte rotation	ORCD
114	Avoine hiver	AGRC
185	Maraîchage plein champ	AGRL
202	GPS autres	AGRL
203	Prairie temporaire	RNGE
204	Miscanthus	RNGE
205	Sudangras	AGRR
206	GPS autres	AGRC
300	Surfaces de protection de la nature	RNGE
301	Tournesol	AGRL
302	Soja	AGRL
303	Plantes graines-céréales	AGRC
304	Plantes graines-céréales	AGRC
305	GPS légumineuses-céréales	AGRL
306	GPS légumineuses-céréales	AGRL
307	Raygrass	RNGE
308	Légumineuses fourragères	AGRL
309	Plantes énergétiques	AGRL
310	Raisins de table	ORCD
311	Baies	ORCD

GDL CODE	Description	Classe
315	Changement de terre arable en prairie permanente (fauchée probablement)	RNGE
316	Légumes en plein champ	AGRL
318	Blé dur	AGRC
800	Vigne	ORCD

Annexe 2 : Regroupements des codes cultures du parcellaire SIGEC wallon

Code	Description	Classe
201	Maïs ensilage	CSIL
202	Maïs grain	CSIL
311	Froment d'hiver	AGRC
312	Froment de printemps	AGRL
321	Orge d'hiver	AGRC
322	Orge de printemps	AGRL
323	Orge de brasserie	AGRL
331	Seigle d'hiver	AGRC
332	Seigle de printemps	AGRL
341	Avoine d'hiver	AGRC
342	Avoine de printemps	AGRL
351	Triticale d'hiver	AGRC
352	Triticale de printemps	AGRL
36	Epeautre	AGRC
37	Sarrasin	AGRL
381	Sorgho	AGRR
382	Quinoa	AGRR
39	Céréales et légumineuses	AGRL
4111	Colza d'hiver	CANA
4112	Navette d'hiver (graines)	CANA
4121	Colza de printemps	AGRL
4122	Navette de printemps (graines)	AGRL
42	Tournesol	AGRL
43	Soja	AGRL
45	Lin oléagineux	AGRR
46	Autres oléagineux	AGRL
51	Pois protéagineux	AGRL
511	Pois protéagineux d'hiver	AGRC
512	Pois protéagineux de printemps	AGRL

Classe	Description
AGRC	Cultures d'hiver
CANA	Colza d'hiver
AGRL	Cultures de printemps
AGRR	Cultures sarclées
CSIL	Mais
POTA	Pomme de terre
FRST	Foret
ORCD	Arboriculture
RNGB	Prairie buissonnante
RNGE	Prairie herbeuse
URHD	Zone urbaine à forte densité
URLD	Zone urbaine à faible densité
WATR	Eau
WETN	Prairies humides

Code	Description	Classe
521	Fèves et Fèveroles d'hiver	AGRC
522	Fèves et Fèveroles de printemps	AGRL
53	Lupin doux	AGRL
54	Mélange protéagineux (culture principale) & céréales	AGRL
541	Mélange protéagineux d'hiver + céréales ou autres espèces	AGRC
542	Mélange protéagineux de printemps + céréales ou autres espèces	AGRL
55	Autres protéagineux	AGRL
6	Prairie et fourrage	RNGE
71	Betterave fourragère	AGRR
72	Trèfles	AGRL
73	Luzerne	AGRL
743	Autres fourrages	AGRL
7431	Ortie	AGRL
7433	Carotte	AGRR
80	Jachère	RNGE
81	Couvert naturel/spontané	RNGE
85	Autres couverts semés	AGRL
851	Couvert favorisant la faune	RNGE
872	Chanvre non textile (culture soumise à autorisation préalable au semis)	AGRR
881	Angélique	AGRL

Code	Description	Classe
883	Cultures forestières à rotation courte (taillis Ó très courte rotation)	ORCD
884	Miscanthus	RNGE
895	Boisement de terre agricole (art 31 du R. (CE) 1257/1999) dérogation	FRST
901	Pomme de terre (non hâtives)	POTA
902	Pomme de terre (plants)	POTA
903	Pomme de terre féculière	POTA
904	Pomme de terre (arrachage avant le 1er août)	POTA
905	Pomme de terre (primeur, arrachage avant le 20 juin)	POTA
91	Betterave sucrière	AGRR
9201	Noisetier	ORCD
9202	Noyer	ORCD
921	Lin textile	AGRR
922	Chanvre textile	AGRR
931	Pois récoltés à l'état frais, pois de conserverie	AGRL
9410	Haricots de conserverie	AGRL
951	Autres légumes	AGRR
9515	Endives (chicons)	AGRL
9516	Cultures fruitières annuelles - Fraises	AGRL
952	Cultures maraîchères sous verre	URLD
9520	Pépinières de plants fruitiers ou de plantes ornementales	ORCD

Code	Description	Classe
953	Plantes aromatiques	AGRL
9548	Choux - Légumes	AGRL
9560	Pépinières de plants forestiers	ORCD
957	Plantes médicinales	AGRL
96	Cultures horticoles non-comestibles	AGRL
962	Sapins de Noël	ORCD
966	Légume légumineuse	AGRL
9716	Vignes	ORCD
9717	Cultures fruitières annuelles - Framboises	ORCD
9741	Cultures fruitière pluriannuelles-basses tiges	ORCD
9742	Cultures fruitière pluriannuelles-hautes tiges	ORCD
9811	Chicorée à inuline	AGRR
9812	Chicorée à café	AGRR
9821	Tabac	AGRL
9822	Houblon	ORCD
99	Autres	AGRL

Annexe 3 : Regroupements des classes d'occupation de l'OBS 2009

Description	Classe
Tissu urbain dense	URHD
Zone semi-urbaine avec végétation importante	URLD
Zone semi-urbaine sans végétation importante	URLD
Urbanisation longiligne, Bandes urbanisées le long des routes	URLD
Place	URHD
Friche urbaine, Espace urbain ouvert sans verdure importante	URLD
Habitat disséminé en zone rurale, hameau	URLD
Industrie lourde	URHD
Zone d'activités Économiques, terrain militaire	URHD
Bâtiments et installations Ó destination socio-culturelle	URHD
Installations de distribution électrique	URHD
Installation de traitement des eaux usées	URHD
Installations de stockage d'hydrocarbures et de gaz	URHD
Constructions agricoles et horticoles, étables, serres	URLD
Routes importantes (>20m), voies rapides	URHD
Zones de stationnement	URHD
Infrastructure ferroviaire, gare	URHD
Zone portuaire	URHD
Aéroport ; terminal, hangar	URHD

Classe	Description
AGRC	Cultures d'hiver
CANA	Colza d'hiver
AGRL	Cultures de printemps
AGRR	Cultures sarclées
CSIL	Mais
POTA	Pomme de terre
FRST	Foret
ORCD	Arboriculture
RNGB	Espace naturel buissonnant
RNGE	Espace naturel herbeux
URHD	Zone urbaine à forte densité
URLD	Zone urbaine à faible densité
WATR	Eau
WETN	Prairies humides

Description	Classe
Aéroport; piste et taxiways	URHD
Zone d'extraction de matériaux	URLD
Remblais et décharges	URLD
Crassier	URLD
Friche industrielle	URLD
Chantier	URLD
Cimetière	URLD
Zones de verdure, parcs	URLD
Terrain de sport, espace récréatif, camping, golf etc.	URLD
Cité jardinière	URLD
Terres agricoles, cultures annuelles	AGRL
Pépinières, horticulture, arbres de Noël	ORCD
Vignoble en terrasse	ORCD
Autres vignoble	ORCD
Verger à hautes tiges	ORCD
Verger à basses tiges	ORCD
Prairie humide	WETN
Prairie mésophile	RNGE
Futaie feuillue à dominance de chêne	FRST
Futaie feuillue à dominance de hêtre	FRST
Futaie de feuillus divers	FRST
Futaie feuillue mélangée de chênes et de hêtres	FRST
Taillis de chêne	FRST
Peupleraie et autres monocultures feuillues	FRST
Forêt résineuse (épicéas, douglas, sapins)	FRST

Description	Classe
Forêt résineuse (pins, mélèzes et autres résineux)	FRST
Forêt résineuse mélangée	FRST
Culture forestière d'essences non définies	FRST
Autres surfaces forestières (coupes rases, chablis)	FRST
Pelouse silicicole	RNGE
Pelouse calcaire	RNGE
Pelouses pionnières (sur substrat rocheux ou graveleux)	RNGE
Landes, sols nus	RNGE
Surfaces rudéralisées et friches sur sols secs à frais	RNGE
Surfaces rudéralisées et friches sur sols humides	RNGE
Buissons, prébois sur sols secs	RNGB
Buissons, prébois sur sols frais	RNGB
Buissons, prébois sur sols humides	RNGB
Forêts, prébois sur éboulis	FRST
Plantations cubustives	FRST
Roche nue	URHD
Eboulis et graviers non colonisés	URHD
Roselière	WETN
Magnocariçaie	WETN
Bas marais	WETN
Cours d'eau naturel	WATR
Cours d'eau artificialisé	WATR
Cours d'eau artificiels	WATR
Plans d'eau anthropogène proche de l'état naturel	WATR
Plan d'eau artificiel	WATR
Bras mort	WATR

Description	Classe
Mardelle	WETN
Bassin, réservoir ayant un intérêt écologique	WATR
Bassin, réservoir à ciel ouvert sans intérêt écologique	WATR

Annexe 4 : Regroupements des écotopes de la couche LifeWatch

LCCS	Description	Classe
10	Crop	AGRL
30	Mixed crop cover (with majority of crops)	AGRL
40	Mixed crop cover (with minority of crops)	RNGE
60	Broadleaved deciduous forest	FRST
70	Needleleaved evergreen forest	FRST
80	Needleleaved deciduous forest	FRST
90	Mixed forest	FRST
100	Mixed herbaceous and tree cover (with majority of trees)	FRST
110	Mixed herbaceous and tree cover (with majority of herbaceous)	RNGB
120	Recently cleared areas with forest regrowth, also includes forest gaps and Christmas trees	FRST
130	Monospecific grassland	RNGE
135	Diversified grassland and shrubland	RNGB
150	Mixture of vegetation and bare soils	RNGE
180	Shrub and herbaceous flooded	WETN
190	Densely artificialized (>50% artificial surface)	URHD
195	Sparsely artificialized (>25% artificial surface)	URLD
200	Bare soil	RNGE
210	Water	WATR

Classe	Description
AGRC	Cultures d'hiver
CANA	Colza d'hiver
AGRL	Cultures de printemps
AGRR	Cultures sarclées
CSIL	Mais
POTA	Pomme de terre
FRST	Foret
ORCD	Arboriculture
RNGB	Espace naturel buissonnant
RNGE	Espace naturel herbeux
URHD	Zone urbaine à forte densité
URLD	Zone urbaine à faible densité
WATR	Eau
WETN	Prairies humides

Annexe 5 : Méthode pour créer la carte des successions culturales 2015 à 2017 et d'occupation du sol

1) Création des cartes des successions culturales
    a. Joindre respectivement aux parcellaires agricoles luxembourgeois et wallon 2015 à 2017 les tables de reclassification « Lookup_table_for_Crop_GDL_SWAT_codes.txt », « Lookup_table_for_Crop_RW_SWAT_codes » selon les champs contenant les libellés des cultures ». Les tables de reclassification se trouvent dans le dossier *SWAT_Input\LU*
    b. Joindre ensuite la table « Lookup_table_SWAT_partial_codes.txt » selon le champ » en utilisant le champ « SWAT_NAME PARTIAL RECLASSIFICATION »
    c. Exporter les parcellaires agricoles wallon luxembourgeois 2015, 2016 et 2017 qui contiennent maintenant pour chaque culture la classe SWAT ainsi que le code associé.
    d. Convertir chacune des couches en raster sur base du code de la classe d'occupation SWAT « RECLASSIFICATION PARTIAL » avec une taille de pixel de 5 m et en snappant sur le MNT hydrologique
    e. Utiliser la fonction « Mosaic To new Raster » pour combiner pour chaque année culturale les rasters wallon et luxembourgeois crées au point d) en donnant la priorité aux données wallonnes
    f. Créer un masque à partir du grid du parcellaire agricole 2017 de la Wallonie et du GDL
    g. Extraire avec ce masque les grids des parcellaires agricoles 2015 et 2016 pour obtenir les cartes de cultures de 2015 et 2016 selon les limites du parcellaire 2017
    h. Convertir le parcellaire 2017 en shapefile de type 'Points'
    i. Extraire pour chaque point les cultures en 2015-2016 et 2017 à partir de la fonction « Extract Multi Values to Points ».
    j. Ajouter à la table d'attribut du résultat un champ pour concaténer les codes cultures (2015-2016-2017)
    k. Joindre la table de reclassification intitulée « Lookup_table_crop_rotation_reclassification.xlxs » qui attribue à chaque succession culturale un code unique.
    l. Créer un nouveau grid à partir du champs « Numero »

2) Création d'une carte d'occupation du sol intégrant les successions culturales 2015 à 2017

    a. Reclasser les cartes d'occupation du sol de L'OBS 20009 et de LifeWatch avec les tables (« Lookup_table_for_OBS09_SWAT_codes.txt », « Lookup_table_for_Lifewatch_SWAT_codes.txt » et « Lookup_table_SWAT_partial_codes.txt ») en suivant la méthode exposée au point 1a à 1d.
    b. Créer la carte d'occupation du sol intégrant les successions culturales en utilisant la fonction « Mosaic to New Raster » et en attribuant la priorité aux informations sur les successions culturales par rapport aux informations de la carte d'occupation du sol de LifeWatch reclassée et de celle de l'OBS 2009. Cela permet d'aboutir à la couche « LU_2015_2017_PARTIAL_SWAT_classification_BV_SE.tif » qui se trouve dans le dossier *SWAT_Input\U* accompagné d'une table de reclassification à utiliser dans ArcSWAT (Lookup_table_LU.csv).

Annexe 6 : Méthode de recalage du réseau hydrographique sur le réseau d'écoulement du MNT hydrologique et correction des discontinuités

La méthode de recalage du réseau hydrographique sur le réseau d'écoulement du MNT hydrologique et de correction des discontinuités est la suivante :

1. Convertir en polyline le réseau hydrographique fusionné et qui a servi à graver le MNT (*Hydro_moyen_RW_GDL_BV_SE.tif* dans *SWAT_Input\BVs_&_MNTs\Reseau_hydro_BV*)
2. Clipper le résultat sur le BV de la Sûre
3. Extraire les extrémités (BOTH_ENDS) de chaque polyline avec la fonction « Feature to Vertices » d'ArcGIS
4. Faire un « Zonal Statistics as Table » de l'altitude fournie par le MNT hydrologique en utilisant le champ « FID » des extrémités des polylines du réseau hydrographique
5. Faire un « Join » sur basse des champs « FID » de la table issue du résultat du « Zonal Statistics as Table » avec la table de la couche extrémités des polylines du réseau hydrographique. On obtient donc l'altitude pour chaque extrémité de chaque tronçon du réseau hydrographique.
6. Dans la table d'attribut de la couche extrémités des polylines, faire un « Summarize » par ORI_FID pour déterminer la valeur maximum d'altitude parmi les extrémités qui ont le même « ORI_FID ». Ceci permet de déterminer le point amont parmi les deux extrémités
7. Joindre le résultat selon le champ « ORI_FID » à la table d'attribut des extrémités des polylines du réseau hydrographique
8. Ajouter un champ numérique double nommé « différence » et calculer la différence d'altitude. Si elle est égale à 0, il s'agit des extrémités les plus en amont de chaque segment du réseau hydro.
9. Sélectionner ces entités en veillant à exclure celles qui ont une altitude maximum de 0 qui ne sont pas correctes
10. Snapper les shapefiles de points résultant sur le flow accumulation dans un rayon de 15 m de manière à les caler sur les valeurs d'accumulation de flux les plus élevées dans l'environnement immédiat
11. Reclasser la couche de direction de flux issu du MNT hydrologique de manière à ce que les valeurs de directions de flux soient cohérentes avec les directions de flux définis dans Whitebox GAT
12. Importer la nouvelle couche de Flow Direction dans Whitebox GAT ainsi que les extrémités de amonts des cours d'eau snappés sur le Flow accumulation dans un rayon de 15 m
13. Utiliser la fonction « Trace Downslope Flowpath ». Le raster résultant est le réseau hydro recalé et sans discontinuité. Il peut ensuite être converti en shapefile (*Reseau_hydro_SWAT.tif* dans *SWAT_Input\BVs_&_MNTs\Reseau_hydro_BV\SWAT_network*)

Annexe 7 : Méthode de délimitation des sous-bassins versants et de segmentation des cours d'eau dans un format correct pour ArcSWAT

La méthode de délimitation des sous-bassins versants et de segmentation des cours d'eau dans un format correct pour ArcSWAT se base sur les outils ArcHydro et notamment la Toolbox « Terrain Preprocessing ». Les étapes à suivre sont les suivantes :

1. Utiliser l'outil « Stream segmentation » pour segmenter le réseau hydrographique créé lors du recalage du réseau hydrographique sur le réseau d'écoulement du MNT hydrologique et de la correction des discontinuités (Annexe 6)
2. Utiliser l'outil « Catchment grid » pour délimiter les sous-bassins versants
3. Utiliser l'outil « Catchment polygon processing » pour convertir le grid des sous-bassins versants en une couche de polygones
4. Utiliser l'outil « Drainage line processing » pour obtenir une couche polyline du réseau hydrographique segmenté.
5. Joindre la table de la couche issue du « Drainage line processing » à la table des sous-bassins versants créés avec l'outil « Catchment polygon processing ». La jointure se fait via le champ « GRID_ID »
6. Exporter les couches vectorielles créées aux étapes 3 et 4 sous forme de deux nouveaux shapefiles qui seront utilisés dans SWAT
7. Comme les champs « FROM NODE » et « TO NODE » ne sont pas corrects dans le réseau hydrographique segmenté sous forme de polyline, il faut les modifier. Il faut considérer le « HydroID » comme nœud départ (et comme numéro de BV) et le champ « NextDownID » comme nœud d'arrivé. Comme les HydroID sont numérotés à la suite des ArcID et que SWAT veut des BV numérotés à partir de 1, il faut soustraire le nombre d'ArcID à HydroID. Attention l'exutoire doit avoir 0 comme valeur de champ NextDownID. La couche vectorielle qui reprend les différents segments du réseau hydrographique doit comporter une table d'attributs qui reprend les champs suivants :
    - ARCID : numérotation des segments (à partir de 1) ;
    - GRID CODE : identifiant du BV qui contient le segment ;
    - FROM NODE : identique à GRID CODE ;
    - TO NODE : identifiant du BV en aval du BV qui contient le segment ;
    - Subbasin : identique à GRID CODE ;
    - SubbasinR : identique à TO NODE.
8. Pour les sous-bassins versant, il faut renseigner dans le champ « Subbasin » la différence entre les champs « HydroID » et « ArcID ». Au final le Feature class de type « Polygon » contenant les sous-bassins versants définis doit reprendre dans sa table d'attributs les champs suivants :
    - GRID CODE : identifiant du BV ;
    - Subbasin : identique à GRID CODE.

Pour plus d'information sur le format des données, il est conseillé de consulter la section 3.2 « Optional ArcSWAT spatial datasets » du manuel d'utilisation d'aide d'ArcSWAT.

Annexe 8 : Paramètres utilisés pour renseigner les successions culturales observés sur la carte d'occupation du sol 2015-2017 dans la table « crop » de la mdb SWAT2012

Lorsqu'un paramètre n'est pas renseigné ou lorsque pour un paramètre la valeur « - » est renseignée, cela signifie que la valeur par défaut est conservée.

PLANT : Code numérique de SWAT pour l'occupation du sol renseignée, *DAY_S* et *MONTH_S* : Jour et mois du semis, *DAY_R* et *MONTH_R* : Jour et mois de la récolte, *CN (A, B , C, D)* : Curve Number pour un sol de groupe hydrologique A, B, C ou D, *LAI* : Leaf Area Index initial, *Bio_INIT* : Biomasse sèche initiale (kg/ha), *PHU_PLT* : nombre total d'unités thermiques ou de degrés-jours nécessaires pour amener la plante à maturité.

Culture principale RW	Culture principale GDL	Code SWAT	CODE	PLANT	DAY_S	MONTH_S	DAY_R	MONTH_R	CN_A	CN_B	CN_C	CN_D	LAI	Bio_INIT	PHU_PLT
Epeautre	Blé d'hiver	WWHT	A	28	5	10	5	8	62	73	81	84	-	-	-
Colza d'hiver	Colza d'hiver	CANA	C	76	21	8	16	7	62	77	83	87	-	-	-
Orge de printemps	Orge de printemps	BARL	L	31	21	3	21	7	62	73	81	84	-	-	-
Betterave	Betterave	SGBT	S	69	21	3	16	10	67	77	83	87	-	-	-
Maïs	Maïs	CSIL	M	20	1	5	1	10	67	77	83	87	-	-	-
Pomme de terre	Pomme de terre	POTA	P	70	21	4	16	9	67	77	83	87	-	-	-
Forêt		FRST	F	6	0	0	0	0	36	60	73	79	4	800	3500
Arboriculture / Vigne		ORCD	O	4	0	0	0	0	45	66	77	83	3.2	400	-
Prairie buissonnante		RNGB	B	16	0	0	0	0	39	61	74	80	1.6	150	-
Prairie herbeuse		RNGE	R	15	1	0	0	7	49	69	79	84	2	100	-
Zone urbaine à forte densité		URHD	H	0	0	0	0	0	31	59	72	79	-	-	-
Zone urbaine à faible densité		URLD	D	0	0	0	0	0	31	59	72	79	-	-	-
Surfaces en eau		WATR	E	18	0	0	0	0	92	92	92	92	-	-	-
Prairie humide		WETN	W	11	0	0	0	0	49	69	79	84	3.2	100	-
								CN Sol nu	77	86	91	94			

Annexe 9 : Code utilisé pour intégrer les informations pédologiques dans la table « usersoils » de la mdb SWAT2012

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Wed Jun 14 14:53:39 2017

@author: a.maugnard.admin
"""

datasoil="C:\\Asta\\Work\\SWAT\\BV47\\Sols\\Data_sols_BV_47.xlsx"
db_soil = "C:\\Asta\\Work\\SWAT\\BV47\\Sols\\usersoils_BV47_49.dbf"

## On importe les modules nécessaires au fonctionnement du script
import arcpy
import numpy as np
from xlrd import open_workbook

## On ouvre le tableur excel qui reprend les proprietes des differents sols
wb=open_workbook(datasoil)
print (wb.sheet_names())
sheets=wb.sheet_names()
sh = wb.sheet_by_name(sheets[3])

## Definition des sigles pedos dans la zone, du soil name et du nombre de type de s
ol
sigles= sh.col_values(1)
soil_name=sh.col_values(0)
nombre_sols=np.size(sigles)-2

## Definiton du nombre d'horizons
Nombre_horizons=sh.col_values(4)

## Definiton du groupe hydrologique
Gp_hydro=sh.col_values(5)

## Definition de la texture
Texture=sh.col_values(3)

## Profondeurs horizon 1 en cm
prof_h1=sh.col_values(9)

## Profondeurs horizon 2 en cm
prof_h2=sh.col_values(23)

## Profondeurs horizon 3 en cm
prof_h3=sh.col_values(38)

## BD horizon 1
bd_h1=sh.col_values(18)

## BD horizon 2
bd_h2=sh.col_values(33)

## BD horizon 3
bd_h3=sh.col_values(47)

## AWC horizon 1
awc_h1=sh.col_values(21)

## AWC horizon 2
```

```
awc_h2=sh.col_values(36)

## AWC horizon 3
awc_h3=sh.col_values(51)

## TOC horizon 1
toc_h1=sh.col_values(16)

## TOC horizon 2
toc_h2=sh.col_values(31)

## TOC horizon 3
toc_h3=sh.col_values(46)

## Clay horizon 1
clay_h1=sh.col_values(13)

## Clay horizon 2
clay_h2=sh.col_values(28)

## Clay horizon 3
clay_h3=sh.col_values(43)

## Silt horizon 1
silt_h1=sh.col_values(12)

## Silt horizon 2
silt_h2=sh.col_values(27)

## Silt horizon 3
silt_h3=sh.col_values(42)

## Sand horizon 1
sand_h1=sh.col_values(11)

## Sand horizon 2
sand_h2=sh.col_values(26)

## Sand horizon 3
sand_h3=sh.col_values(41)

## Rock horizon 1 - % weigth
        rock_h1=sh.col_values(14)

        ## Rock horizon 2
        rock_h2=sh.col_values(29)

        ## Rock horizon 3
        rock_h3=sh.col_values(44)

        ## Saturated hydraulic conductivity horizon 1
        ks_h1=sh.col_values(7)

        ## Saturated hydraulic conductivity horizon 2
        ks_h2=sh.col_values(25)

        ## Saturated hydraulic conductivity horizon 3
        ks_h3=sh.col_values(40)

        ##K_USLE
        k_USLE=sh.col_values(6)

        row_value=("OID","MUID","SEQN", "SNAM","S5ID","SNAM","CMPPCT","NLAYERS","HYD
    RGRP","SOL_ZMX", "ANION_EXCL", "SOL_CRK", "TEXTURE", "SOL_Z1", "SOL_BD1", "SOL_AWC1
    ","SOL_K1", "SOL_CBN1", "CLAY1", "SILT1", "SAND1", "ROCK1", "SOL_ALBEDO1", "USLE_K1
    ", "SOL_EC1","SOL_Z2", "SOL_BD2", "SOL_AWC2","SOL_K2", "SOL_CBN2", "CLAY2", "SILT2"
```

```
    , "SAND2", "ROCK2", "SOL_ALBEDO2", "USLE_K2", "SOL_EC2","SOL_Z3", "SOL_BD3", "SOL_A
    WC3","SOL_K3", "SOL_CBN3", "CLAY3", "SILT3", "SAND3", "ROCK3", "SOL_ALBEDO3", "USLE
    _K3", "SOL_EC3")
121.
122.        row_values=[]
123.
124.        for row in range(1,nombre_sols+1):
125.            OID=201+row
126.            MUID=str(int(sigles[row+1]))
127.            SEQN=0
128.            SNAM=str((soil_name[row+1]))
129.            S5ID=0
130.            CMPCCT=0
131.            NLAYERS= int(Nombre_horizons[row+1])
132.            HYDRGRP=str(Gp_hydro[row+1])
133.            ANION_EXCL=0.5
134.            SOL_CRK=0.5
135.            TEXTURE=str(Texture[row+1])
136.            SOL_Z1=int(prof_h1[row+1]*10)
137.            SOL_BD1=bd_h1[row+1]
138.            SOL_AWC1=round(awc_h1[row+1],3)
139.            SOL_CBN1=toc_h1[row+1]
140.            CLAY1=clay_h1[row+1]
141.            SILT1=silt_h1[row+1]
142.            SAND1=sand_h1[row+1]
143.            ROCK1=rock_h1[row+1]
144.            SOL_ALBEDO1=0.01
145.            USLE_K1 = round(k_USLE[row+1],2)
146.            SOL_EC1 = 0
147.            SOL_K1=ks_h1[row+1]
148.            if NLAYERS==1:
149.                SOL_Z1=int(prof_h1[row+1]*10)
150.                SOL_ZMX=SOL_Z1
151.                row_value=(OID,MUID,SEQN,SNAM,S5ID,CMPCCT, NLAYERS, HYDRGRP, SOL_ZMX
    , ANION_EXCL, SOL_CRK, TEXTURE, SOL_Z1, SOL_BD1, SOL_AWC1, SOL_K1, SOL_CBN1, CLAY1,
     SILT1, SAND1, ROCK1, SOL_ALBEDO1,USLE_K1, SOL_EC1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
    0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
    ,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
    0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)
152.                row_values.append(row_value)
153.            if NLAYERS ==2:
154.                SOL_ZMX=int(prof_h2[row+1]*10)
155.                SOL_Z2=int(prof_h2[row+1]*10)
156.                SOL_BD2=bd_h2[row+1]
157.                SOL_AWC2=round(awc_h2[row+1],3)
158.                SOL_CBN2=toc_h2[row+1]
159.                CLAY2=clay_h2[row+1]
160.                SILT2=silt_h2[row+1]
161.                SAND2=sand_h2[row+1]
162.                ROCK2=rock_h2[row+1]
163.                SOL_ALBEDO2=0.01
164.                USLE_K2 = round(k_USLE[row+1],2)
165.                SOL_EC2 = 0
166.                SOL_K2=ks_h2[row+1]
167.                row_value=(OID,MUID,SEQN,SNAM,S5ID,CMPCCT, NLAYERS, HYDRGRP, SOL_ZMX
    , ANION_EXCL, SOL_CRK, TEXTURE, SOL_Z1, SOL_BD1, SOL_AWC1, SOL_K1, SOL_CBN1, CLAY1,
     SILT1, SAND1, ROCK1, SOL_ALBEDO1,USLE_K1, SOL_EC1,SOL_Z2, SOL_BD2, SOL_AWC2,SOL_K2
    , SOL_CBN2, CLAY2, SILT2, SAND2, ROCK2, SOL_ALBEDO2, USLE_K2, SOL_EC2,0,0,0,0,0,0,0
    ,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
    0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
    ,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)
168.                row_values.append(row_value)
169.            if NLAYERS==3:
170.                SOL_ZMX=int(prof_h3[row+1]*10)
171.                SOL_Z2=int(prof_h2[row+1]*10)
172.                SOL_BD2=bd_h2[row+1]
```

```
                SOL_AWC2=round(awc_h2[row+1],3)
                SOL_CBN2=toc_h2[row+1]
                CLAY2=clay_h2[row+1]
                SILT2=silt_h2[row+1]
                SAND2=sand_h2[row+1]
                ROCK2=rock_h2[row+1]
                SOL_ALBEDO2=0.01
                USLE_K2 = round(k_USLE[row+1],2)
                SOL_EC2 = 0
                SOL_K2=ks_h2[row+1]
                SOL_Z3=int(prof_h3[row+1]*10)
                SOL_BD3=bd_h3[row+1]
                SOL_AWC3=round(awc_h3[row+1],3)
                SOL_CBN3=toc_h3[row+1]
                CLAY3=clay_h3[row+1]
                SILT3=silt_h3[row+1]
                SAND3=sand_h3[row+1]
                ROCK3=rock_h3[row+1]
                SOL_ALBEDO3=0.01
                USLE_K3 = round(k_USLE[row+1],2)
                SOL_EC3 = 0
                SOL_K3=ks_h3[row+1]
                row_value=(OID,MUID,SEQN,SNAM,S5ID,CMPCCT, NLAYERS, HYDRGRP, SOL_ZMX
    , ANION_EXCL, SOL_CRK, TEXTURE, SOL_Z1, SOL_BD1, SOL_AWC1, SOL_K1, SOL_CBN1, CLAY1,
     SILT1, SAND1, ROCK1, SOL_ALBEDO1,USLE_K1, SOL_EC1,SOL_Z2, SOL_BD2, SOL_AWC2,SOL_K2
    , SOL_CBN2, CLAY2, SILT2, SAND2, ROCK2, SOL_ALBEDO2, USLE_K2, SOL_EC2,SOL_Z3, SOL_B
    D3, SOL_AWC3,SOL_K3, SOL_CBN3, CLAY3, SILT3, SAND3, ROCK3, SOL_ALBEDO3, USLE_K3, SO
    L_EC3,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
    ,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
    0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)
                row_values.append(row_value)


        ## On ouvre la table qui reprend les proprietes du sol dans ArcSWAT

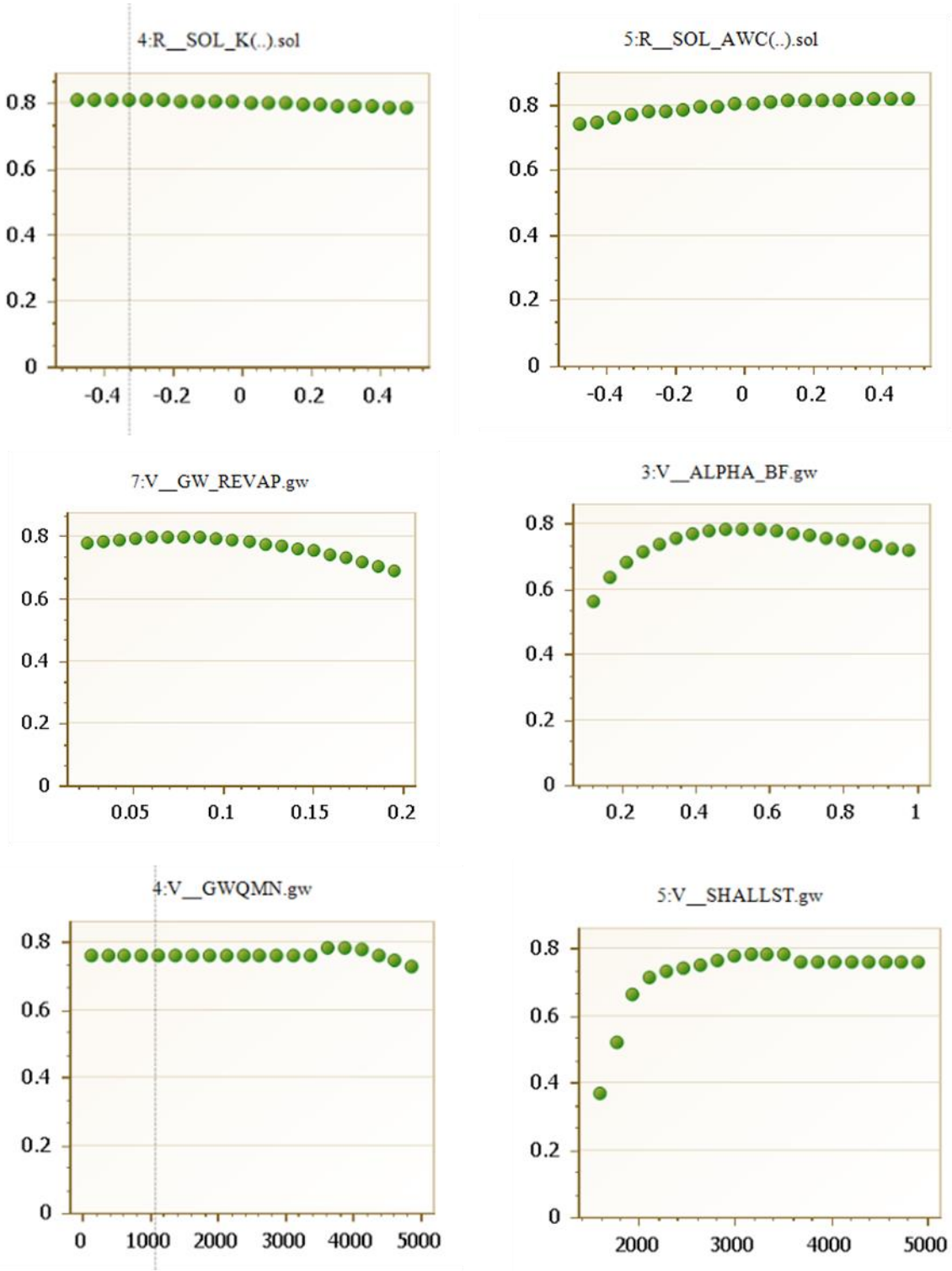
        fc=db_soil
        fields=['*']
        # Open an InsertCursor
        cursor = arcpy.da.InsertCursor(fc,fields)

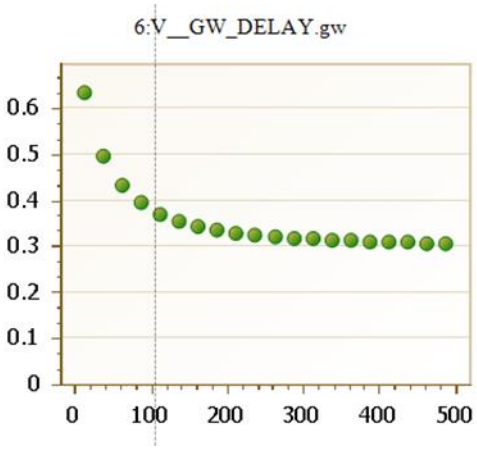
        # Insert new rows that include the county name and a x,y coordinate
        #  pair that represents the county center
        for row in row_values:
            cursor.insertRow(row)

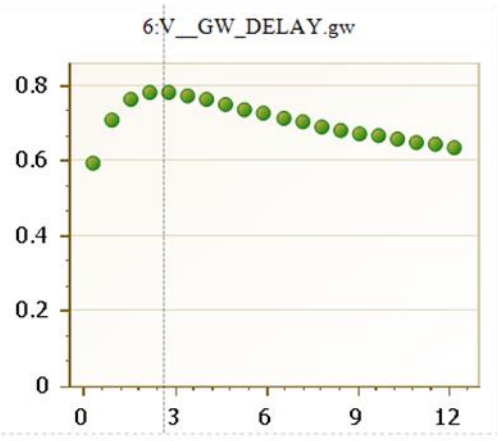
        # Delete cursor object
        del cursor
```

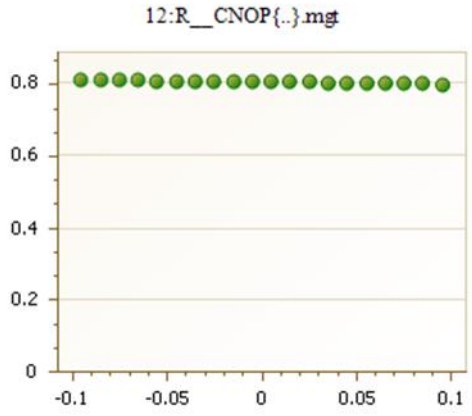
Annexe 10 : Sensibilité du modèle aux paramètres du Set#1

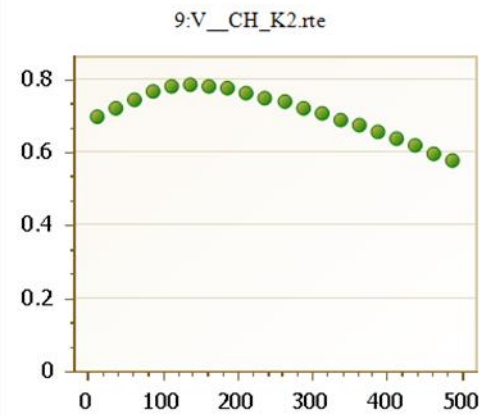
Les figures suivantes montrent la variation du coefficient de Nash-Sutcliffe lorsque l'on fait varier un à la fois les paramètres du set#1 après calibration (R = variation relative, V = valeur absolue).

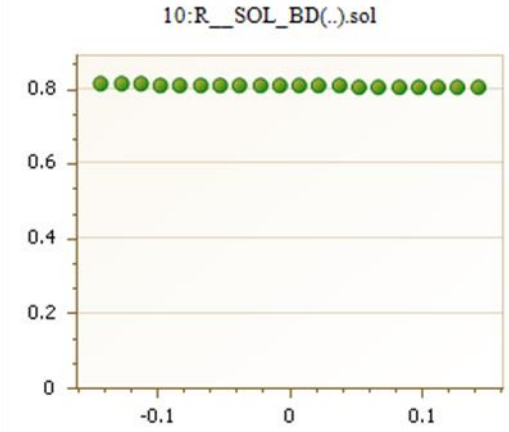


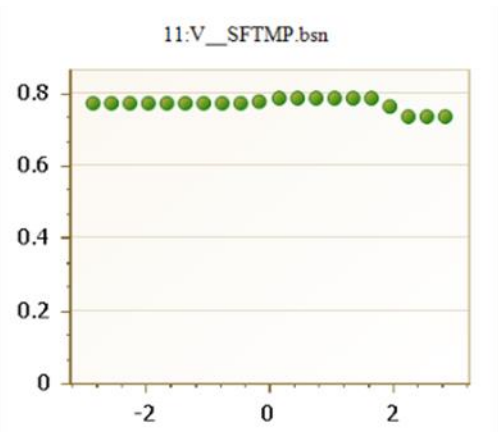

6:V__GW_DELAY.gw
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
0
100
200
300
400
500


6:V__GW_DELAY.gw
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0
3
6
9
12


12:R__CNOP{..}.mgt
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-0.1
-0.05
0
0.05
0.1

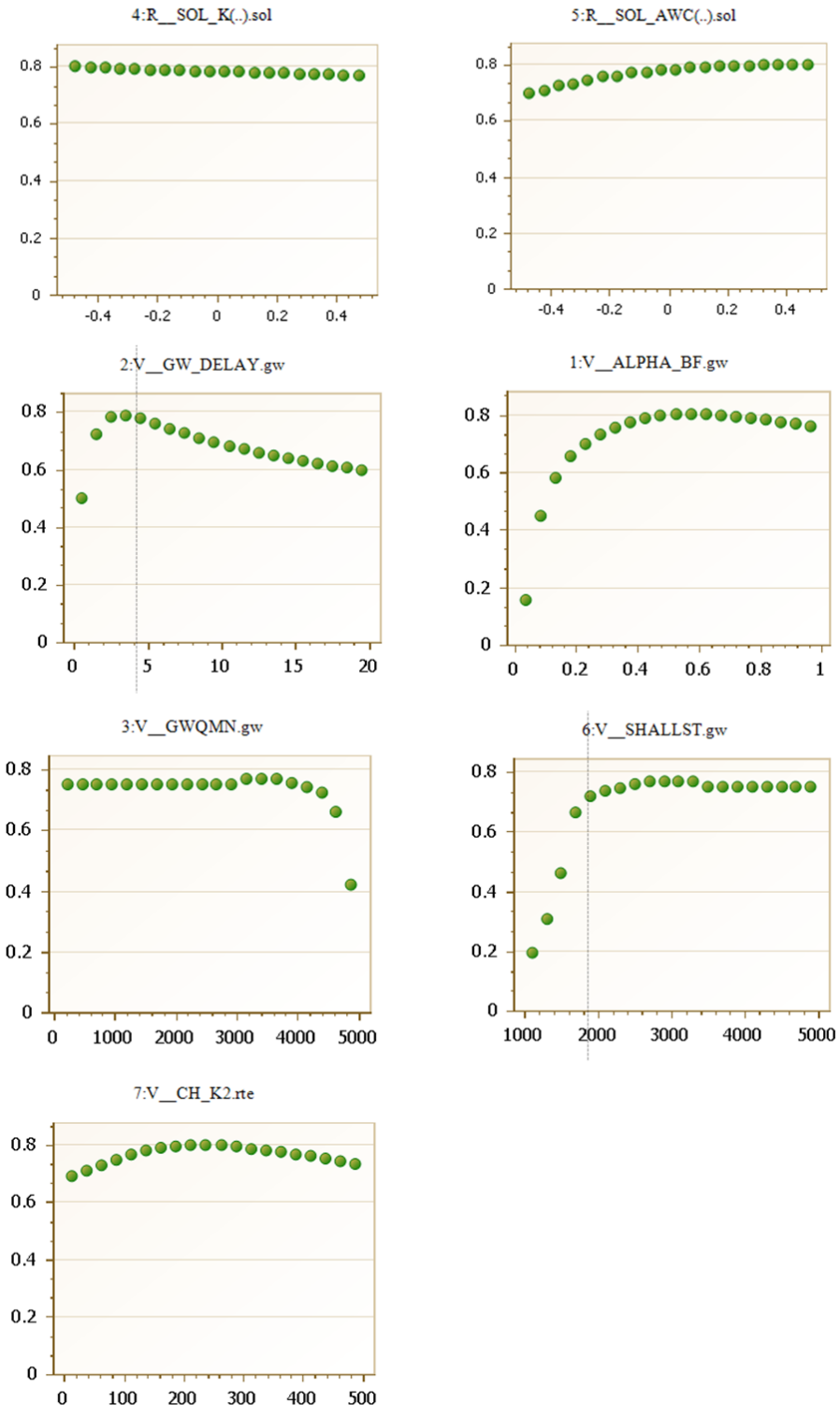

9:V__CH_K2.rte
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0
100
200
300
400
500


10:R__SOL_BD(..).sol
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-0.1
0
0.1


11:V__SFTMP.bsn
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-2
0
2

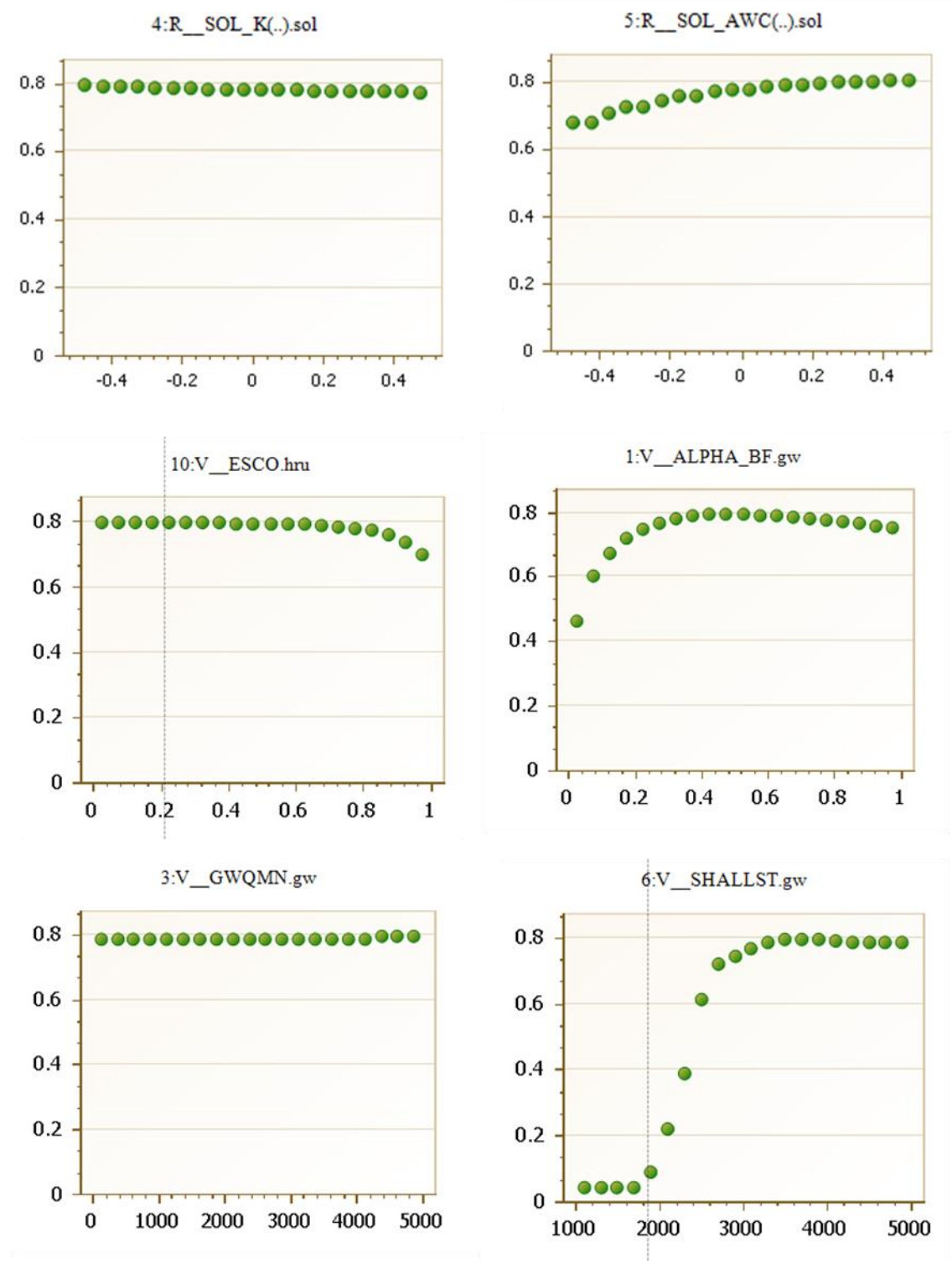
Annexe 11 : Sensibilité du modèle aux paramètres du Set#2

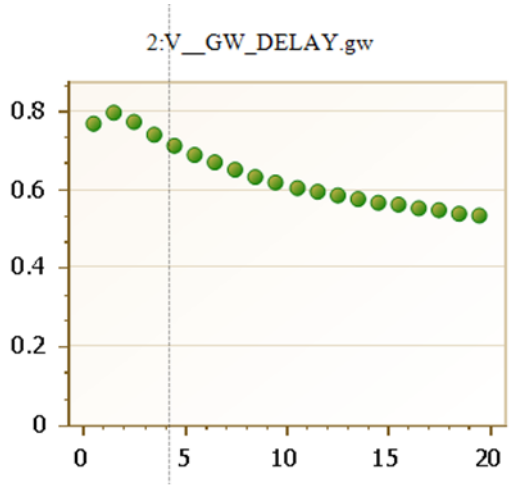
Les figures suivantes montrent la variation du coefficient de Nash-Sutcliffe lorsque l'on fait varier un à la fois les paramètres du set#2 après calibration (R = variation relative, V = valeur absolue).

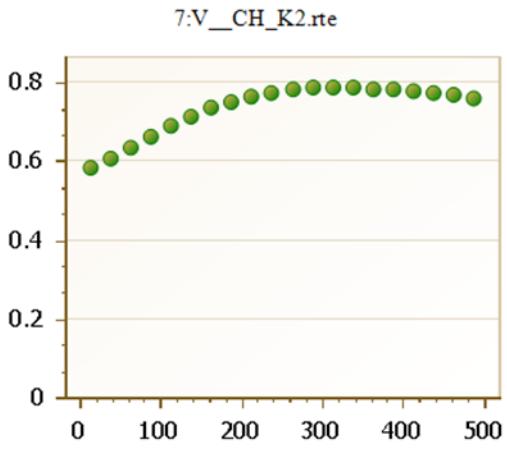


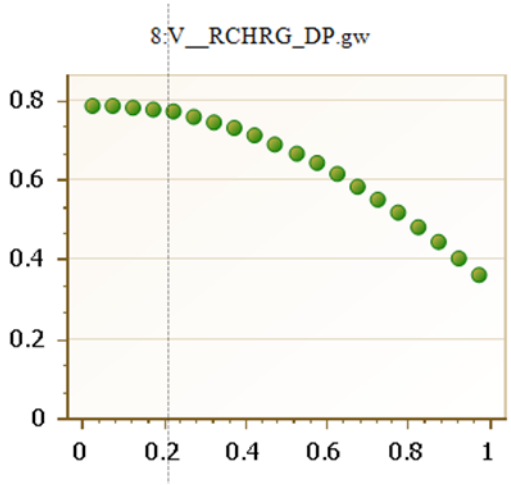
Annexe 12 : Sensibilité du modèle aux paramètres du Set#3

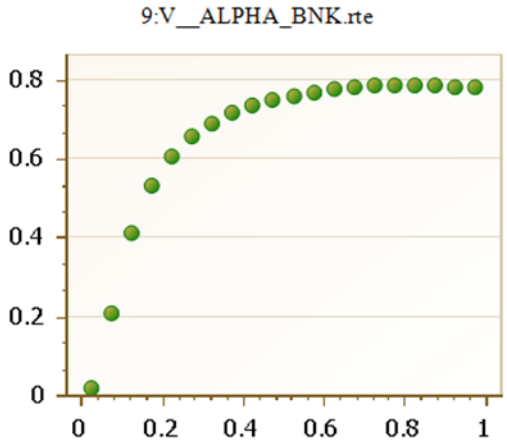
Les figures suivantes montrent la variation du coefficient de Nash-Sutcliffe lorsque l'on fait varier un à la fois les paramètres du set#3 dans une certaine gamme de valeurs, les autres paramètres restants constants et fixés à leurs valeurs calibrée (R = variation relative, V = valeur absolue).




2:V__GW_DELAY.gw
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0
5
10
15
20

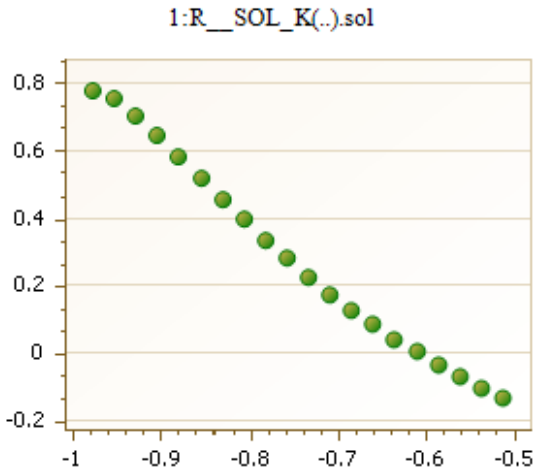

7:V__CH_K2.rte
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0
100
200
300
400
500


8:V__RCHRG_DP.gw
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1


9:V__ALPHA_BNK.rte
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1

Annexe 13 : Sensibilité du modèle à la conductivité hydraulique à saturation avant calibration

La figure suivante montre la variation du coefficient de Nash-Sutcliffe lorsque l'on fait varier de manière relative la conductivité à saturation par rapport à sa valeur initiale renseignée lors de la paramétrisation. La sensibilité est très importante et est liée à la surestimation de ce paramètre.

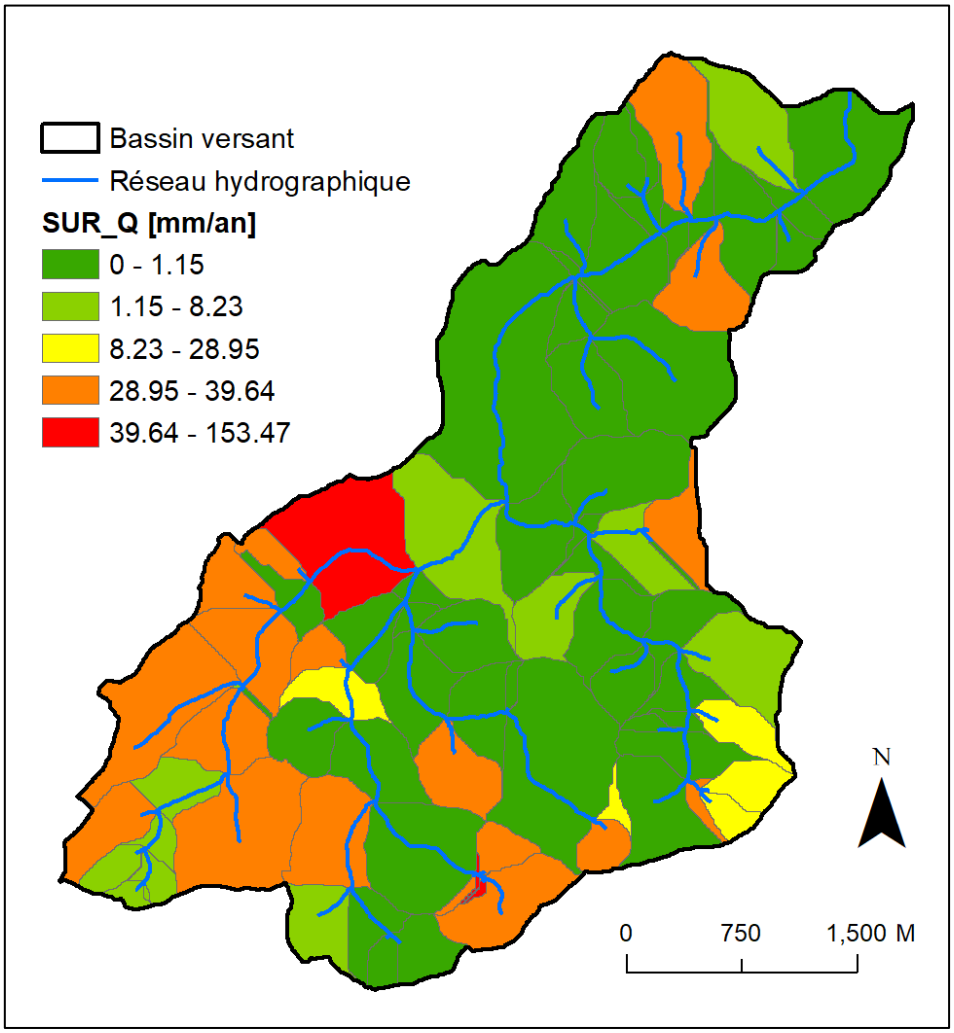


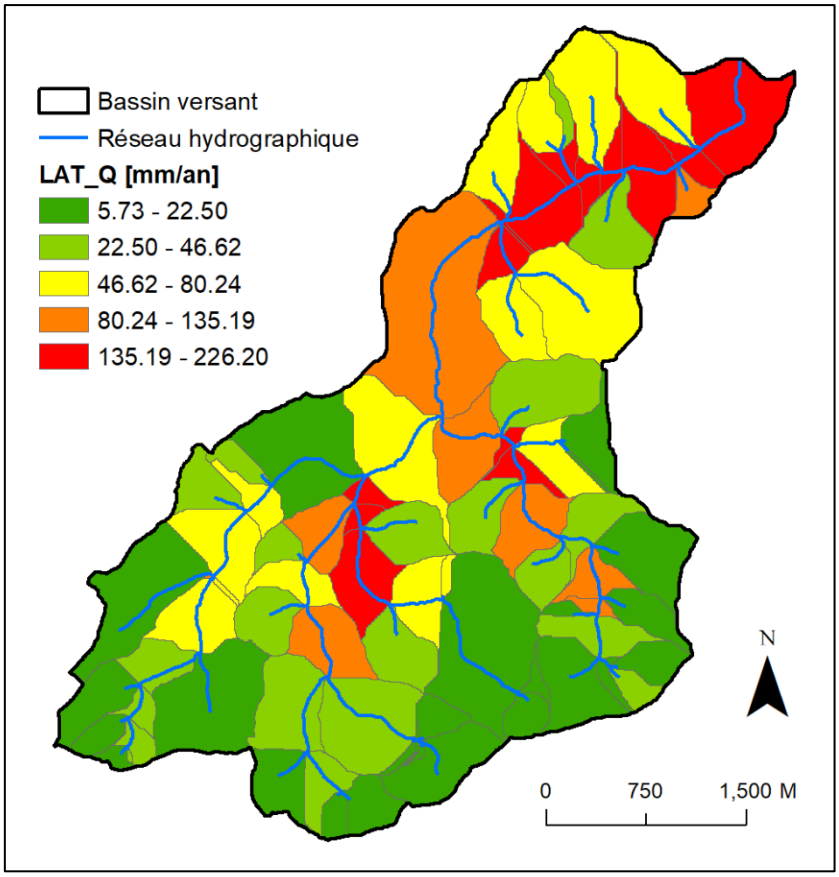
Annexe 14 : Flux observés sur le bassin versant de Schéimelzerbesch pour les 6 périodes définies de 2016 à 2017

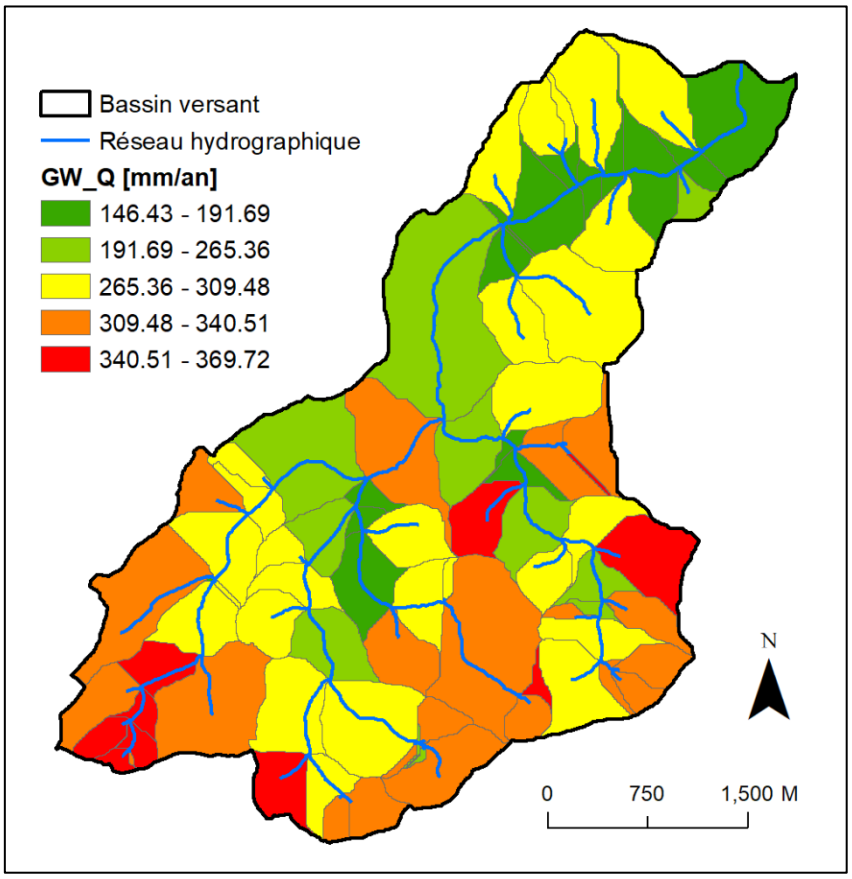
	Flux [mm]					
	Période 1 (01/01/16 - 24/05/16)	*Période 2 (25/05/16 - 08/07/16)*	*Période 3 (09/07/16 - 04/01/17)*	*Période 4 (05/01/17 - 24/04/17*	*Période 5 (24/04/17 - 31/10/17)*	*Période 6 (01/11/17 - 31/12/17)*
Précipitations	377.20	196.50	240.40	157.70	400.20	229.90
Evapotranspiration potentielle	249.91	142.31	430.45	203.18	648.16	26.07
Ruissellement de surface	6.84	6.89	4.29	4.75	5.41	10.69
Flux latéraux	40.03	20.45	17.58	15.04	27.35	27.40
Contribution de l'aquifère peu profond	192.90	89.28	23.18	70.96	37.22	143.92

Annexe 15 : Bilan annuel des principaux types d'écoulement par sous bassins versant sur le BV de Schéimelzerbesch

La quantité moyenne annuelle des principaux types d'écoulements par sous-bassin versant a été calculée sur base des résultats des débits simulés pour la période 2016-2017 avec le set de paramètre #1 et pour une HRU unique par sous-bassin versant. **SURF_Q** = Ruissellement de surface [mm/an], **LAT_Q** = Ecoulements latéraux hypodermiques [mm/an], **GW_Q** = Contribution de l'aquifère peu profond [mm/an]. Pour chaque type d'écoulement les valeurs de flux ont été regroupés en 5 classes par la méthode « Natural Breaks (Jenks) » d'ArcGIS qui minimise la variance au sein de chaque classe et maximise la variance entre les classes.

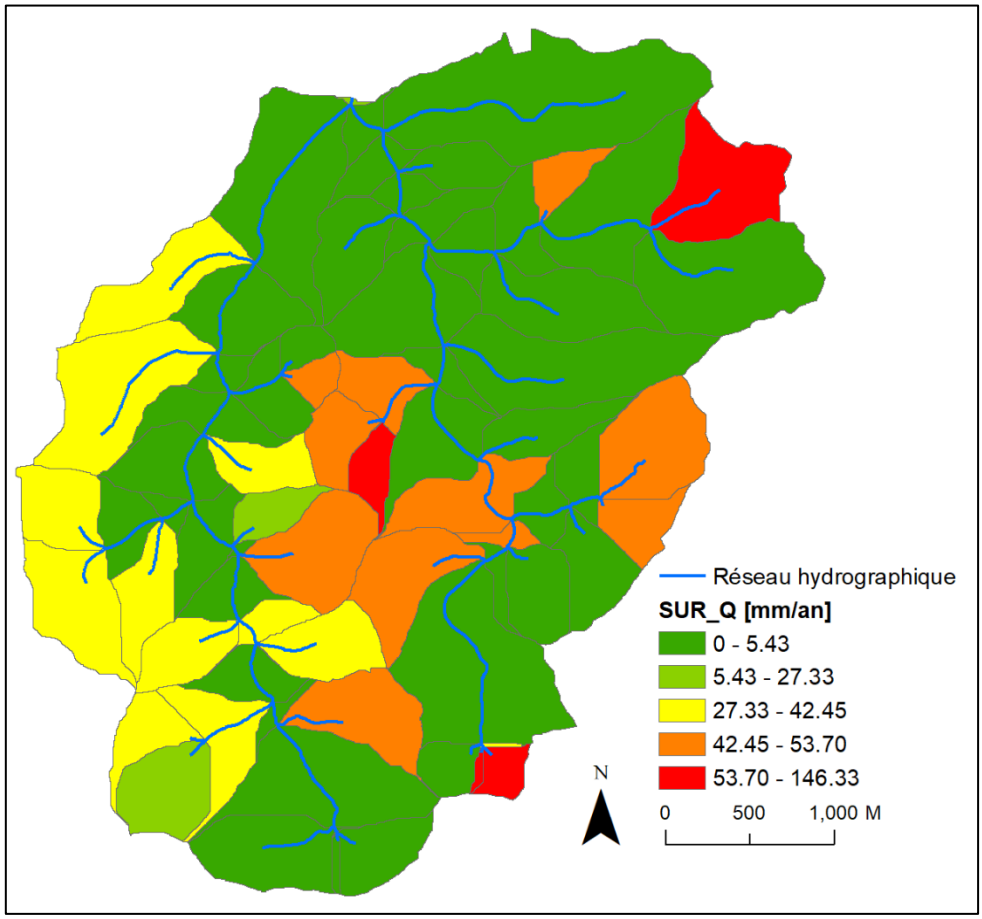


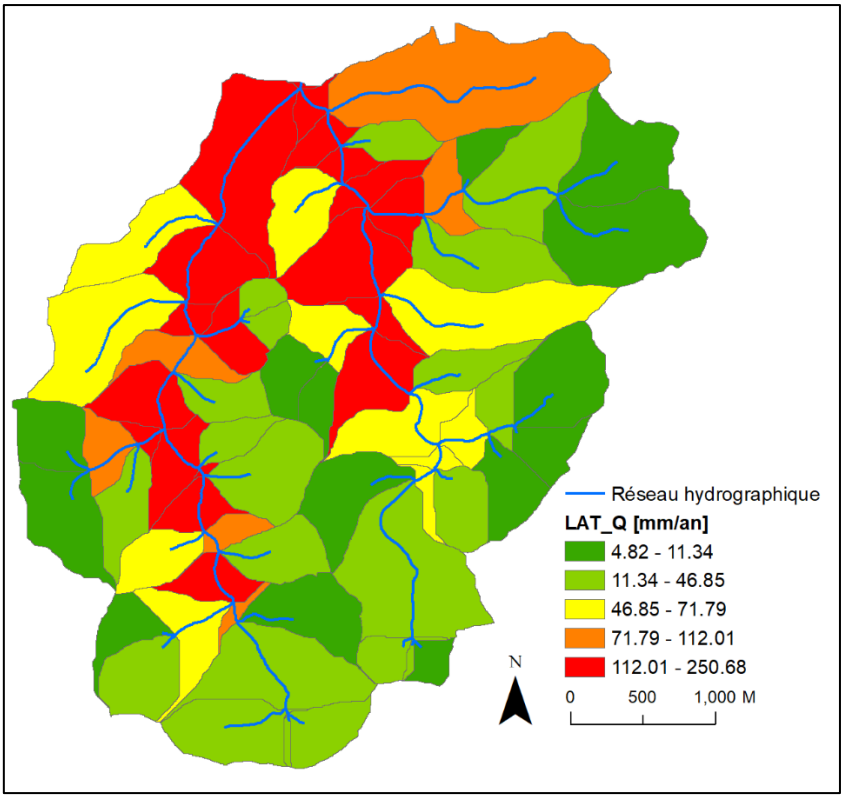

Bassin versant
Réseau hydrographique
LAT_Q [mm/an]
5.73 - 22.50
22.50 - 46.62
46.62 - 80.24
80.24 - 135.19
135.19 - 226.20
N
0
750
1,500 M

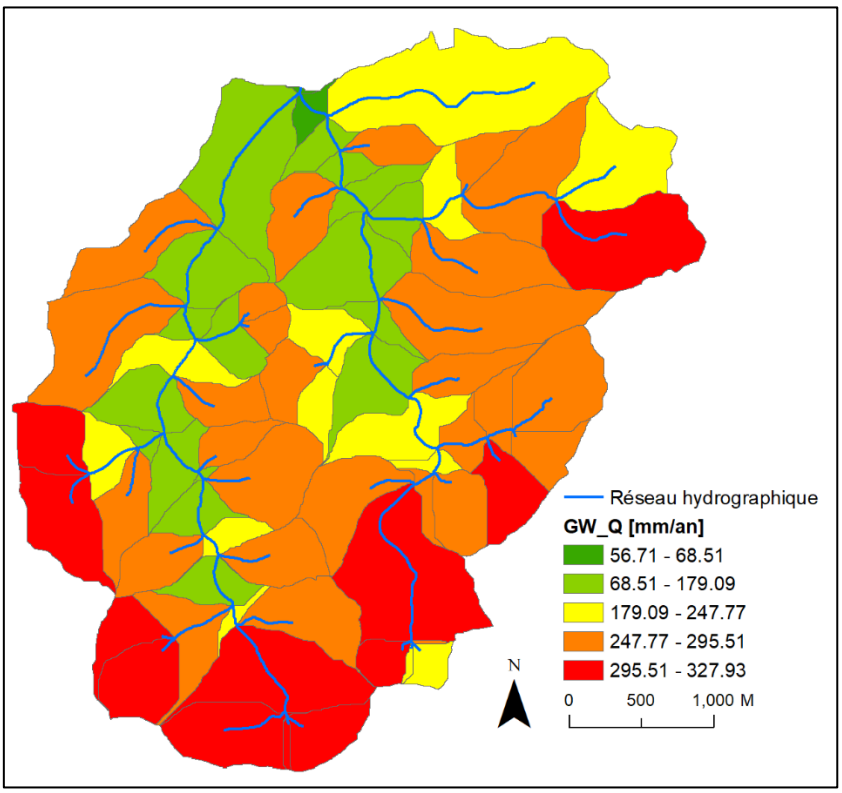

Bassin versant
Réseau hydrographique
GW_Q [mm/an]
146.43 - 191.69
191.69 - 265.36
265.36 - 309.48
309.48 - 340.51
340.51 - 369.72
N
0
750
1,500 M

Annexe 16 : Bilan annuel des principaux types d'écoulement par sous bassins versant sur le BV de Grondmillen

La quantité moyenne annuelle des principaux types d'écoulements par sous-bassin versant a été calculée sur base des résultats des débits simulés pour la période 2016-2017 avec le set de paramètre #1 et pour une HRU unique par sous-bassin versant. **SURF_Q** = Ruissellement de surface [mm/an], **LAT_Q** = Ecoulements latéraux hypodermiques [mm/an], **GW_Q** = Contribution de l'aquifère peu profond [mm/an]. Pour chaque type d'écoulement les valeurs de flux ont été regroupés en 5 classes par la méthode « Natural Breaks (Jenks) » d'ArcGIS qui minimise la variance au sein de chaque classe et maximise la variance entre les classes.

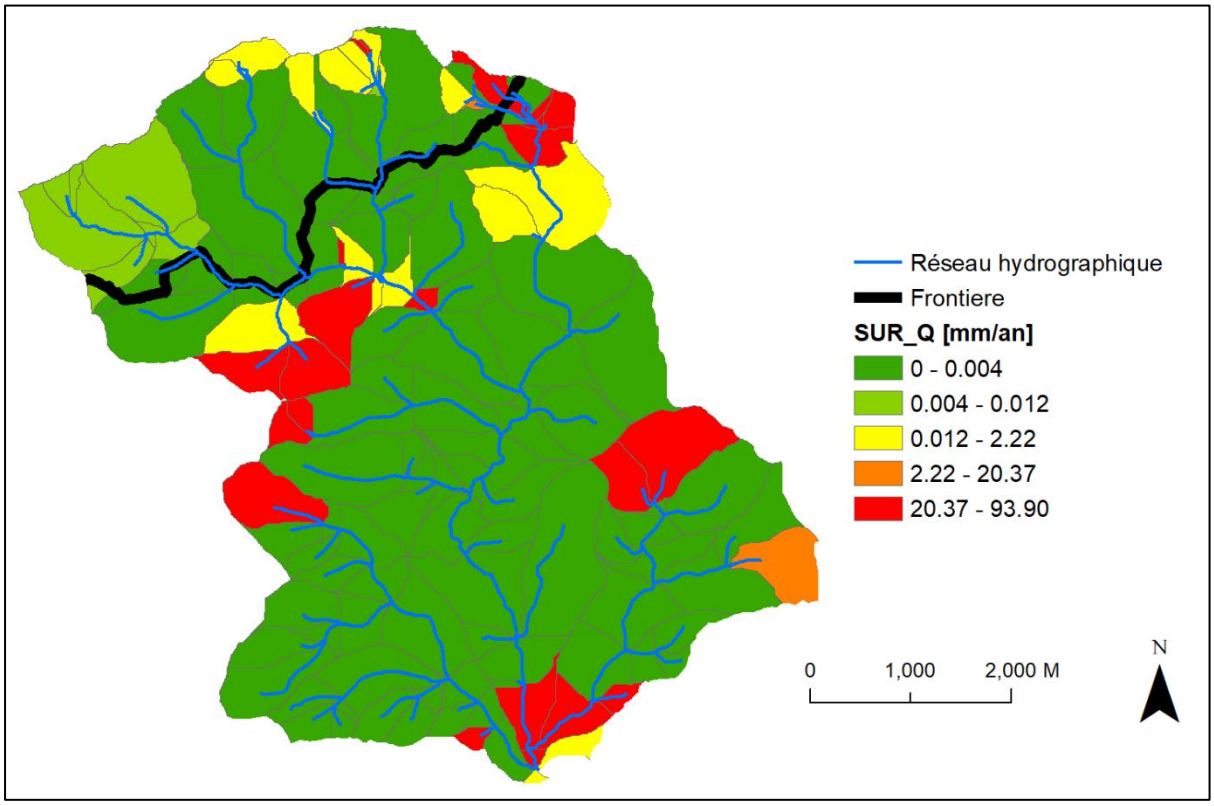


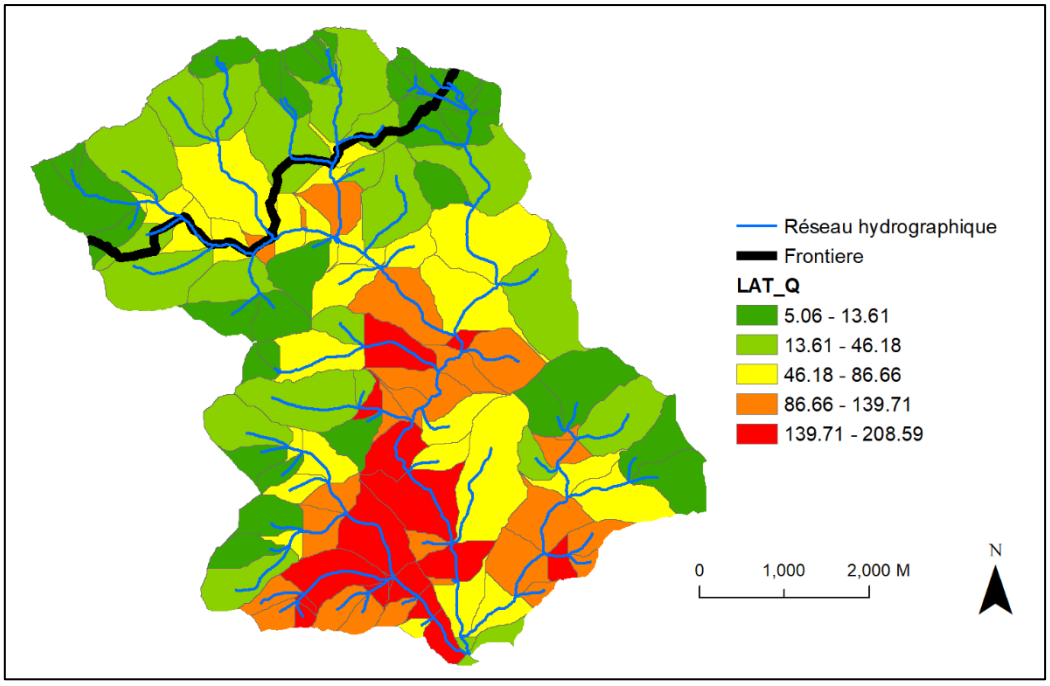

Réseau hydrographique
LAT_Q [mm/an]
4.82 - 11.34
11.34 - 46.85
46.85 - 71.79
71.79 - 112.01
112.01 - 250.68
N
0
500
1,000 M

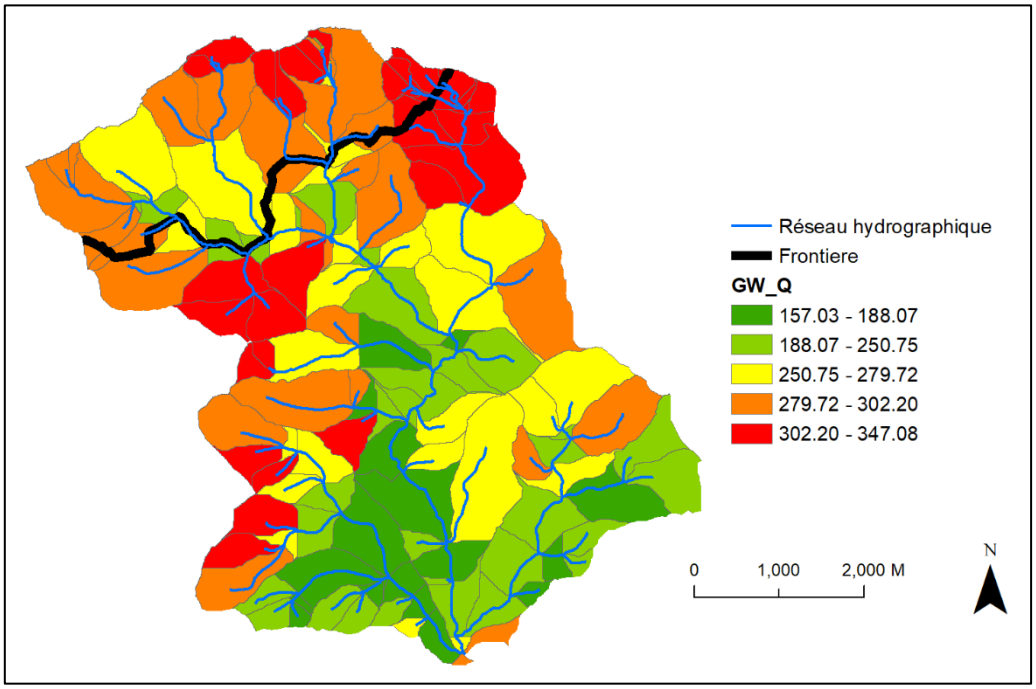

Réseau hydrographique
GW_Q [mm/an]
56.71 - 68.51
68.51 - 179.09
179.09 - 247.77
247.77 - 295.51
295.51 - 327.93
N
0
500
1,000 M

Annexe 17 : Bilan annuel des principaux types d'écoulement par sous bassins versant sur le BV de Bavigne

La quantité moyenne annuelle des principaux types d'écoulements par sous-bassin versant a été calculée sur base des résultats des débits simulés pour la période 2016-2017 avec le set de paramètre #1 et pour une HRU unique par sous-bassin versant. **SURF_Q** = Ruissellement de surface [mm/an], **LAT_Q** = Ecoulements latéraux hypodermiques [mm/an], **GW_Q** = Contribution de l'aquifère peu profond [mm/an]. Pour chaque type d'écoulement les valeurs de flux ont été regroupés en 5 classes par la méthode « Natural Breaks (Jenks) » d'ArcGIS qui minimise la variance au sein de chaque classe et maximise la variance entre les classes.

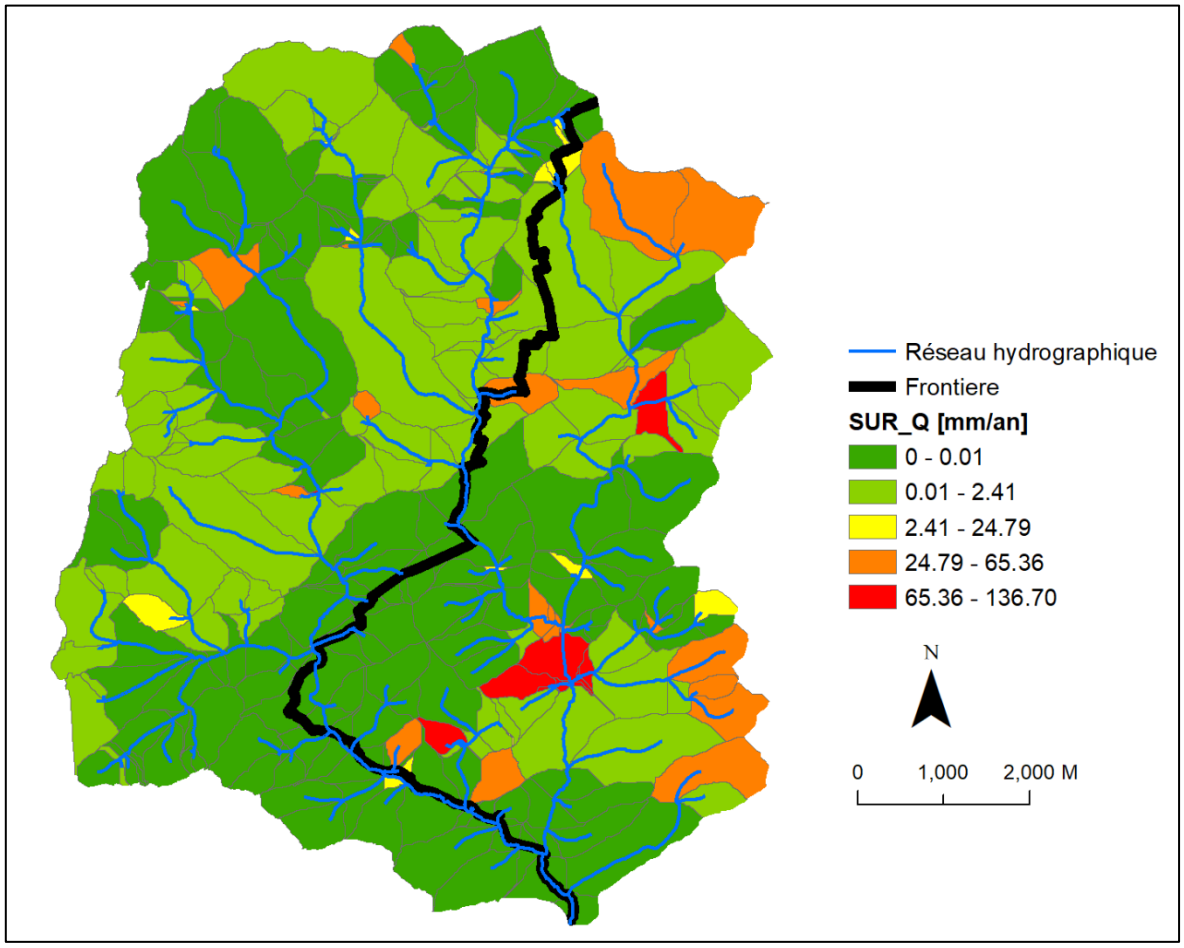


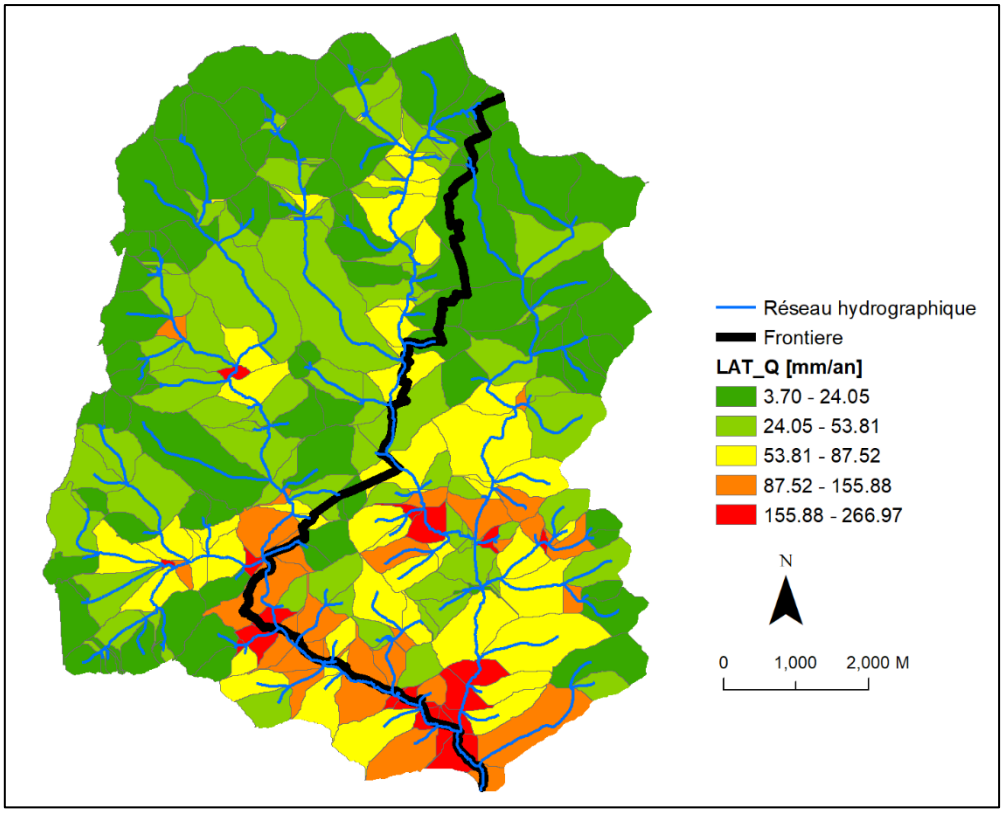

Réseau hydrographique
Frontiere
LAT_Q
5.06 - 13.61
13.61 - 46.18
46.18 - 86.66
86.66 - 139.71
139.71 - 208.59
0
1,000
2,000 M
N

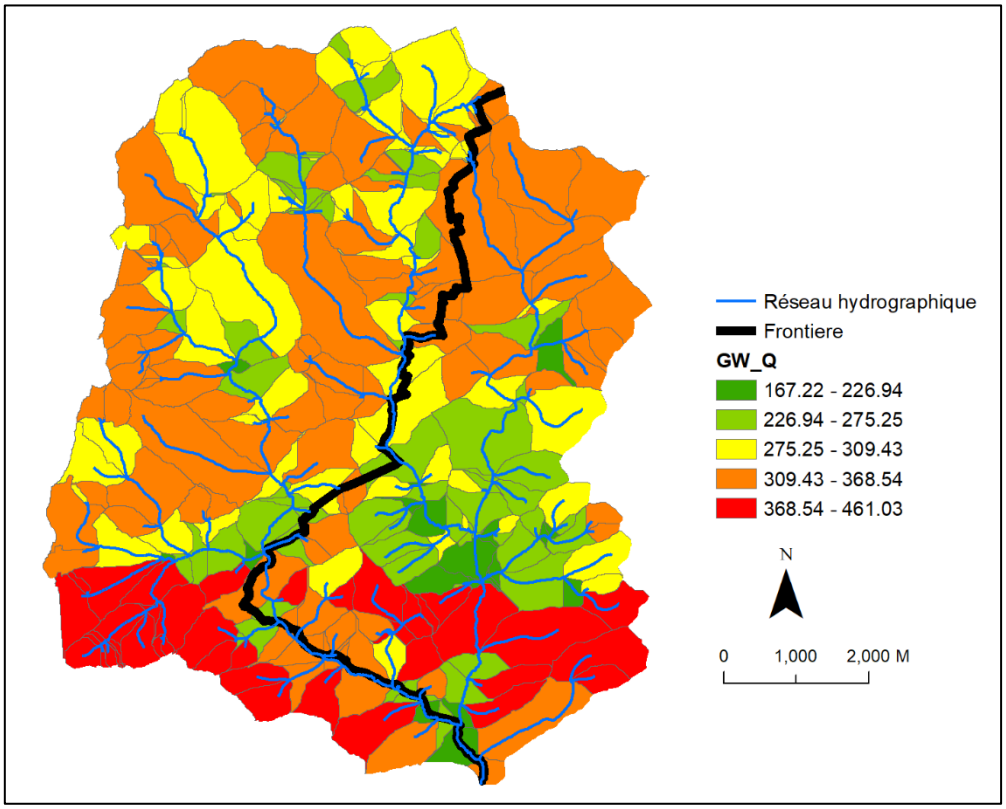

Réseau hydrographique
Frontiere
GW_Q
157.03 - 188.07
188.07 - 250.75
250.75 - 279.72
279.72 - 302.20
302.20 - 347.08
0
1,000
2,000 M
N

Annexe 18 : Bilan annuel des principaux types d'écoulement par sous bassins versant sur le BV de Rommelerkraiz

La quantité moyenne annuelle des principaux types d'écoulements par sous-bassin versant a été calculée sur base des résultats des débits simulés pour la période 2016-2017 avec le set de paramètre #1 et pour une HRU unique par sous-bassin versant. **SURF_Q** = Ruissellement de surface [mm/an], **LAT_Q** = Ecoulements latéraux hypodermiques [mm/an], **GW_Q** = Contribution de l'aquifère peu profond [mm/an]. Pour chaque type d'écoulement les valeurs de flux ont été regroupés en 5 classes par la méthode « Natural Breaks (Jenks) » d'ArcGIS qui minimise la variance au sein de chaque classe et maximise la variance entre les classes.

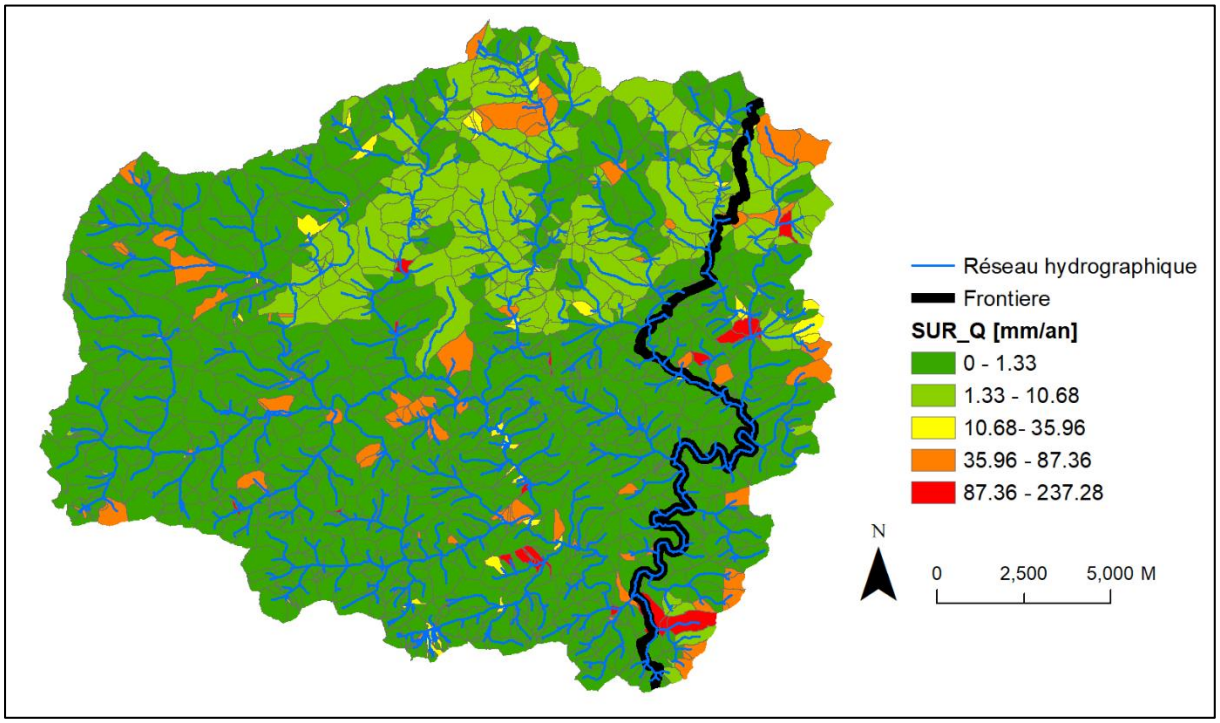


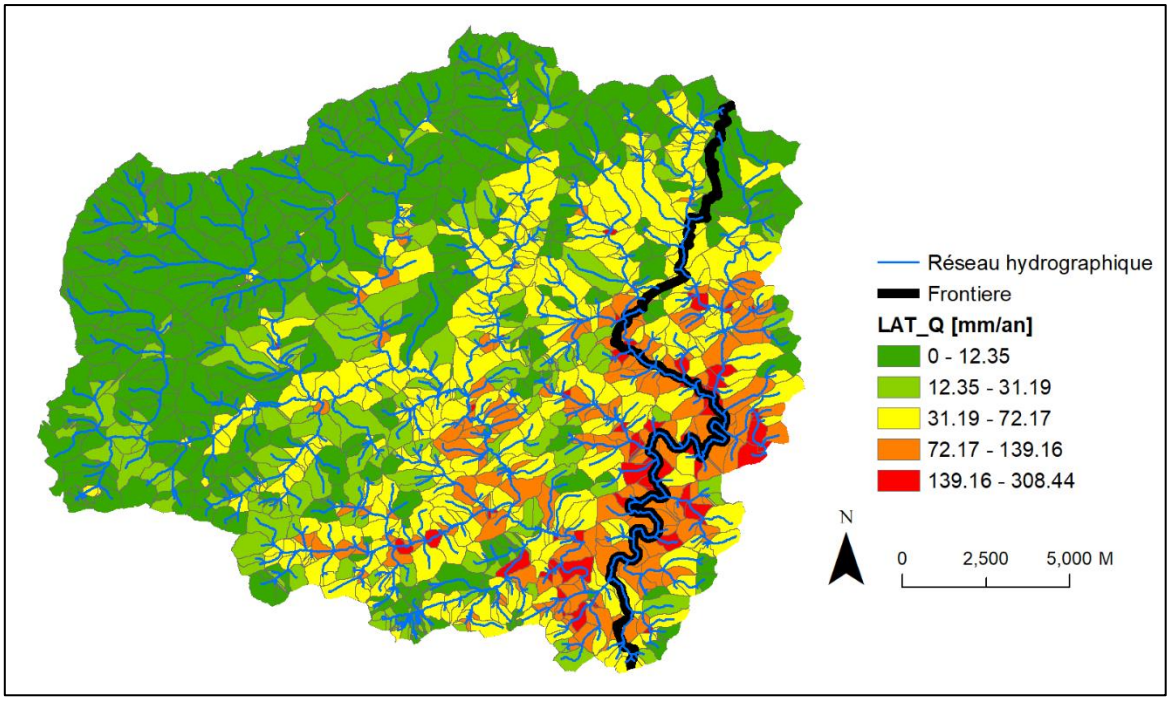

Réseau hydrographique
Frontiere
LAT_Q [mm/an]
3.70 - 24.05
24.05 - 53.81
53.81 - 87.52
87.52 - 155.88
155.88 - 266.97
N
0
1,000
2,000 M

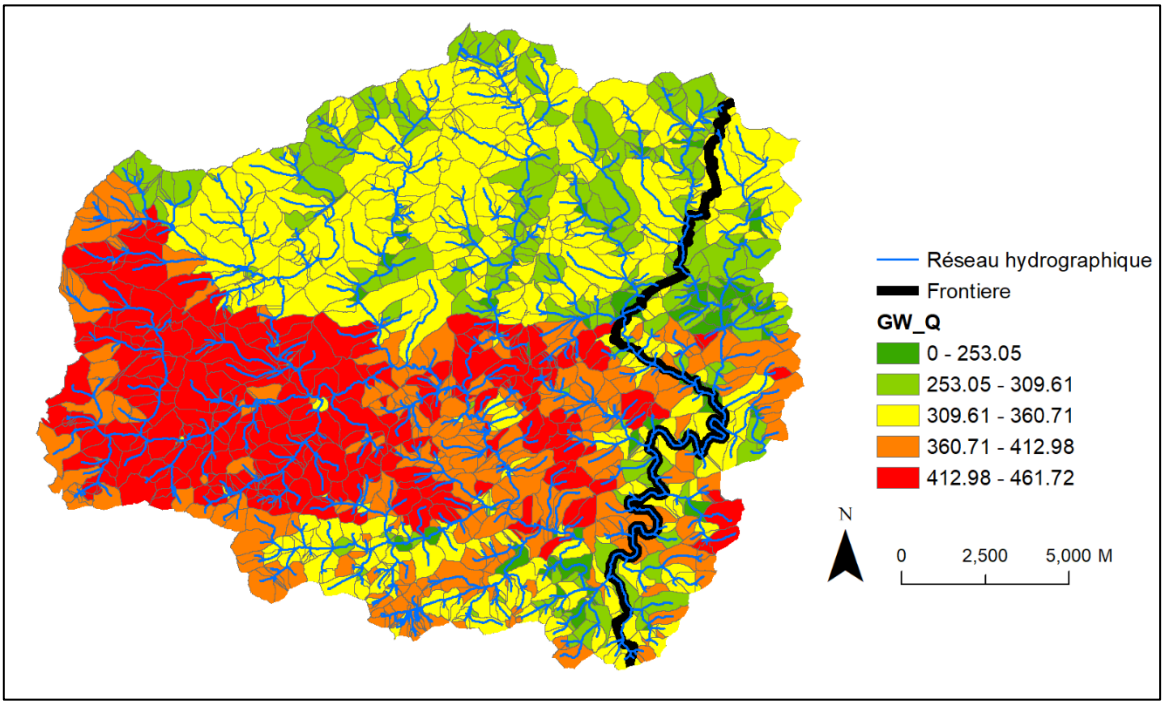

Réseau hydrographique
Frontiere
GW_Q
167.22 - 226.94
226.94 - 275.25
275.25 - 309.43
309.43 - 368.54
368.54 - 461.03
N
0
1,000
2,000 M

Annexe 19 : Bilan annuel des principaux types d'écoulement par sous bassins versant sur le BV de Bigonville

La quantité moyenne annuelle des principaux types d'écoulements par sous-bassin versant a été calculée sur base des résultats des débits simulés pour la période 2016-2017 avec le set de paramètre #1 et pour une HRU unique par sous-bassin versant. **SURF_Q** = Ruissellement de surface [mm/an], **LAT_Q** = Ecoulements latéraux hypodermiques [mm/an], **GW_Q** = Contribution de l'aquifère peu profond [mm/an]. Pour chaque type d'écoulement les valeurs de flux ont été regroupés en 5 classes par la méthode « Natural Breaks (Jenks) » d'ArcGIS qui minimise la variance au sein de chaque classe et maximise la variance entre les classes.



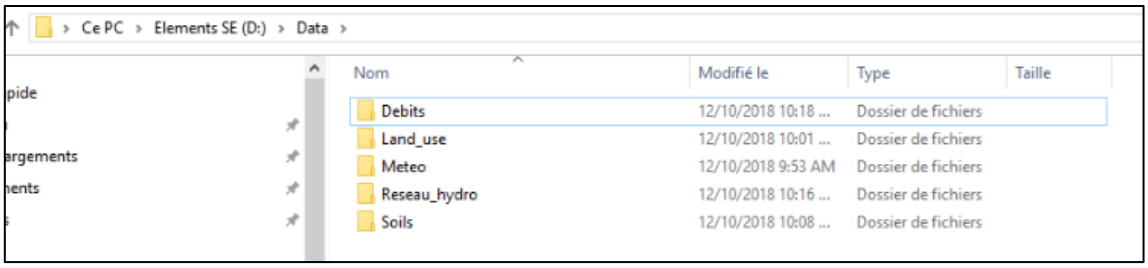

Réseau hydrographique
Frontiere
LAT_Q [mm/an]
0 - 12.35
12.35 - 31.19
31.19 - 72.17
72.17 - 139.16
139.16 - 308.44
N
0
2,500
5,000 M


Réseau hydrographique
Frontiere
GW_Q
0 - 253.05
253.05 - 309.61
309.61 - 360.71
360.71 - 412.98
412.98 - 461.72
N
0
2,500
5,000 M

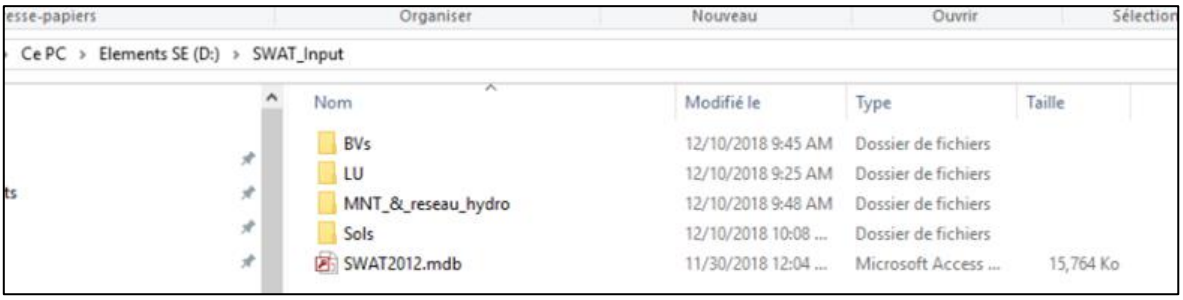
Annexe 20 : Liste délivrables

Outre le présent rapport, les différents délivrables suivants ont été fournis sur un disque dur :

- dans le répertoire **Data** : les données d'occupation du sol, culturales, pédologiques, météorologiques, de débits et les réseaux hydrographiques pour la partie wallonne et luxembourgeoise du BV de la Sûre



- dans le répertoire **SWAT_Input** : les données d'occupation du sol, pédologiques, topographiques, hydrologiques et la base de données SWAT2012.mdb reprenant les informations nécessaires formatées pour faire tourner les modèles sur les sous-bassin versants de la Sûre



- dans le répertoire **SWAT_parametrized_models&CUP_Projects** : les modèles SWAT paramétrés pour chacun des sous bassins versant suivants :
    - Bigonville : BV17 avec la paramétrisation intégrale, le nombre de HRUS divisé par 2 (D2), par 3 (D3), par 4 (D4) et une HRU unique par sous-bassin versant (D999) mais également la simulation 2008 à 2017 avec une HRU unique (D999_2008_2017) ;
    - Bavigne : BV46 avec la paramétrisation intégrale et le scénario avec une HRU unique par sous-bassin versant (D999) ;
    - Grondmillen : BV47 avec la paramétrisation intégrale et le scénario avec une HRU unique par sous-bassin versant (D999) ;
    - Rommelerkraiz : BV48 avec la paramétrisation intégrale, le nombre de HRUS divisé par 2 (D2), par 3 (D3), par 4 (D4) et une HRU unique par sous-bassin versant (D999) ;
    - Schéimelzerbesch : BV49 avec la paramétrisation intégrale et le scénario avec une HRU unique par sous-bassin versant (D999) ;

