

Magnard, A., Biolders, C., & Vanclooster M. (2018). 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 du Luxembourg – Application au bassin-versant de la Haute-Sûre. Rapport final. 127 p.

https://agriculture.public.lu/de/actualites/2019/januar-2019/BASSINVERSANT_HAUTESURE_SWAT_2018_UCL_vfinale_web.html

ABREGE

La pédologie : une information indispensable à la modélisation hydrologique

Le sol est un milieu à l'interface entre le sous-sol, l'atmosphère et l'hydrosphère. A ce titre, il joue un rôle fondamental dans le cycle de l'eau. Il est l'un des facteurs déterminant dans le partage des précipitations entre les écoulements de surface et l'infiltration (Figure 1). Une fois dans le sol les propriétés hydrodynamiques du sol contrôlent (i) la part de l'eau qui est stockée et qui servira à la croissance de la végétation, (ii) la part de l'eau qui peut percoler vers le sous-sol pour recharger les aquifères superficiels ou profonds et (iii) la part de l'eau infiltrée qui contribue au débit des eaux de surface par écoulement de subsurface.

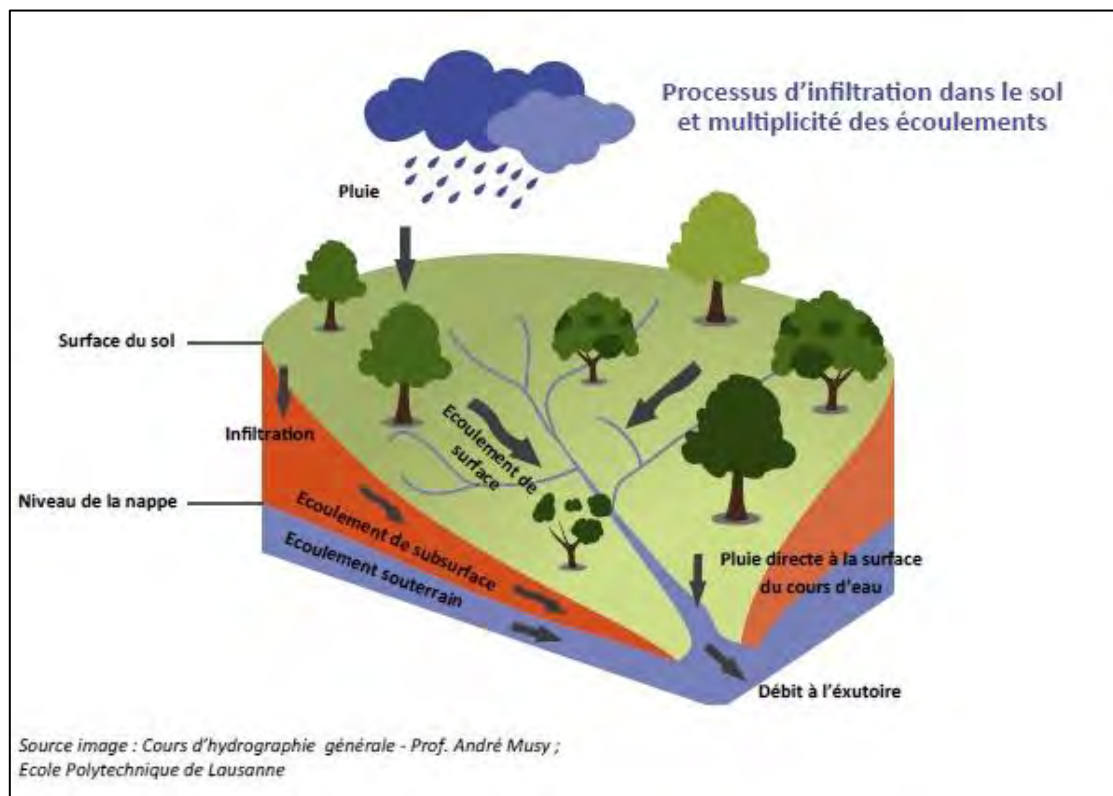


Figure 1 : Le cycle de l'eau dans le sol

Les principales propriétés hydrodynamiques du sol qui régissent le comportement de l'eau dans le sol sont la conductivité hydraulique et la courbe de rétention servant à estimer la réserve en eau utile. Ces propriétés peuvent être mesurées in situ à l'aide d'infiltromètre ou en laboratoire à partir d'échantillons. Néanmoins, ces mesures se révèlent problématiques dans le cas de sols caillouteux tels que ceux que l'on rencontre dans l'Oesling car la charge caillouteuse rend parfois impossible l'enfoncement des infiltromètres et une prise d'échantillons correcte. Néanmoins, comme ces propriétés dépendent essentiellement des propriétés physiques du sol, il est possible d'estimer les propriétés hydrodynamiques du sol via des fonctions empiriques de pédotransfert. Parmi les propriétés du sol d'importance, on recense la texture, la charge caillouteuse et la densité du sol qui affectent notamment la porosité du sol en termes de répartition spatiale et de diamètre. La quantité de matière organique présente dans le sol est également un élément important qui influence la structure du sol et la porosité des horizons superficiels. La profondeur du sol est aussi une donnée essentielle pour déterminer la réserve en eau utile d'un sol. Il est donc clair que si l'on veut déterminer le comportement de l'eau à la surface du sol et dans le sol, il est nécessaire de disposer d'une information pédologique correcte sur ces différents paramètres et de leur variabilité en profondeur pour les différents horizons et profils de sols.

La prise en compte de l'information pédologique dans le modèle hydrologique SWAT

SWAT est un modèle continu dans le temps, développé par le département de l'agriculture des Etats-Unis (USDA) et fonctionnant à l'échelle d'un bassin versant. Il permet d'établir des bilans hydrologiques à l'échelle d'un bassin versant mais également de simuler les transferts de pesticides, de sédiments, de nutriments ou encore de modéliser la croissance des cultures. La manière dont le modèle prend en compte la composante hydrologique peut être schématisée selon la Figure 2.

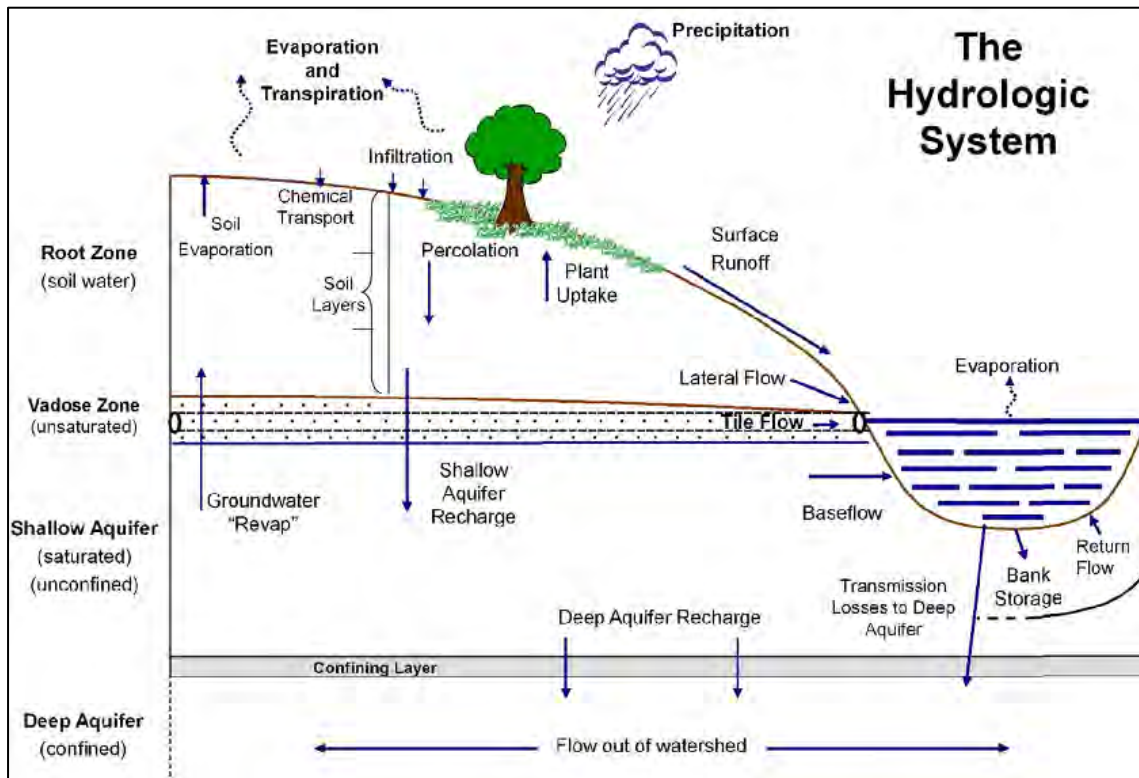


Figure 2 : Schéma du fonctionnement du cycle hydrologique dans le modèle SWAT¹

¹ A fully integrated SWAT-MODFLOW hydrologic model - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-the-hydrologic-cycle-and-SWAT-simulation-processes-Neitsch-et-al-2011_fig1_256874823 [accessed 12 Dec, 2018]

Application du modèle SWAT pour la modélisation du fonctionnement hydrologique du bassin versant de la Sûre et la reproduction des débits

Le modèle SWAT a été utilisé pour étudier le fonctionnement hydrologique du bassin versant du barrage d'Esch-sur-Sûre. Cette étude² a été réalisée par le laboratoire de Génie Rural de l'Earth and Life Institute rattaché à l'UCLouvain (Belgique). Le bassin versant de la Sûre à Esch-sur-Sûre se situe à cheval sur le GDL et la Wallonie (Figure 3). Sa surface est d'environ 425 km² dont la majeure partie, à savoir 63 %, se situe en Wallonie. Trois stations de mesures de hauteurs d'eau sont présentes sur la Sûre pour ce bassin versant à savoir : la première à Martelange, la seconde à Bigonville et enfin la dernière au barrage d'Esch-sur-Sûre. 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. Ces données ont été mises à disposition par l'AGE- Administration de la gestion de l'eau du Luxembourg. Du côté wallon, la 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 drainant des bassins versants de 15 km² à 428 km² disposent donc de données de débit mesurées pour la calibration et la validation du modèle SWAT (Figure 4). Le bassin versant de Schéimelzerbesch a été utilisé pour la calibration du modèle et les stations de Grondmillen, Bavigne, Rommelerkraiz et Bigonville ont servi à la validation du modèle. Dans le cadre de cette étude, 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.

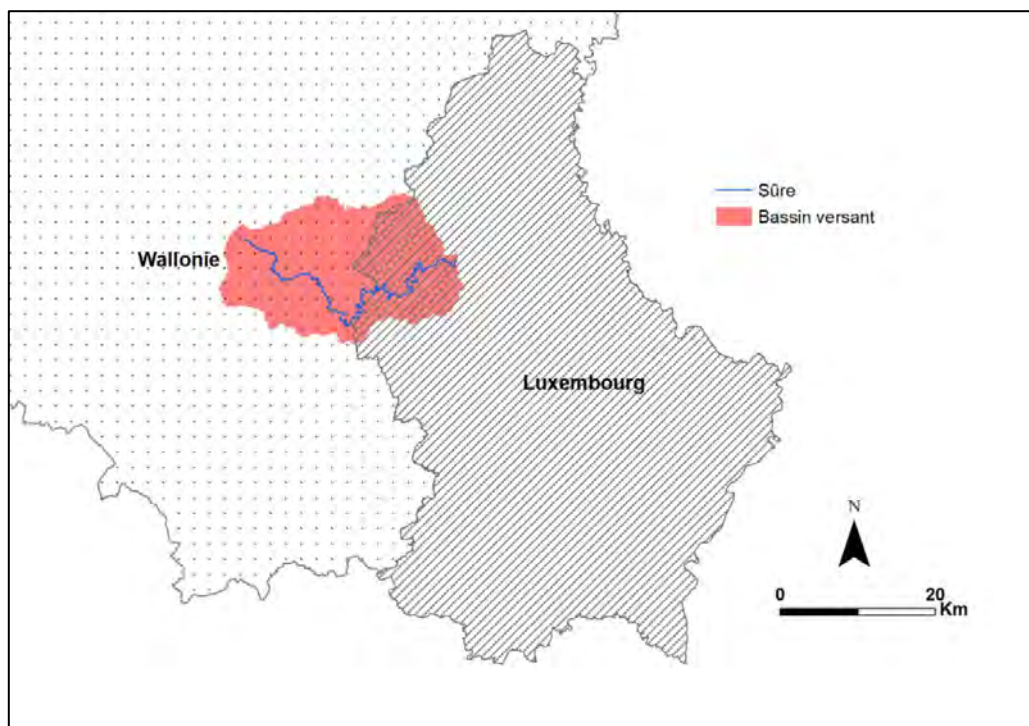


Figure 3 : Situation du bassin versant de la Sûre à Esch-sur-Sûre

² Maignard, A., Biolders, C., & Vanclooster M. (2018). 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 du Luxembourg – Application au bassin-versant de la Haute-Sûre. Rapport final. 127 p.

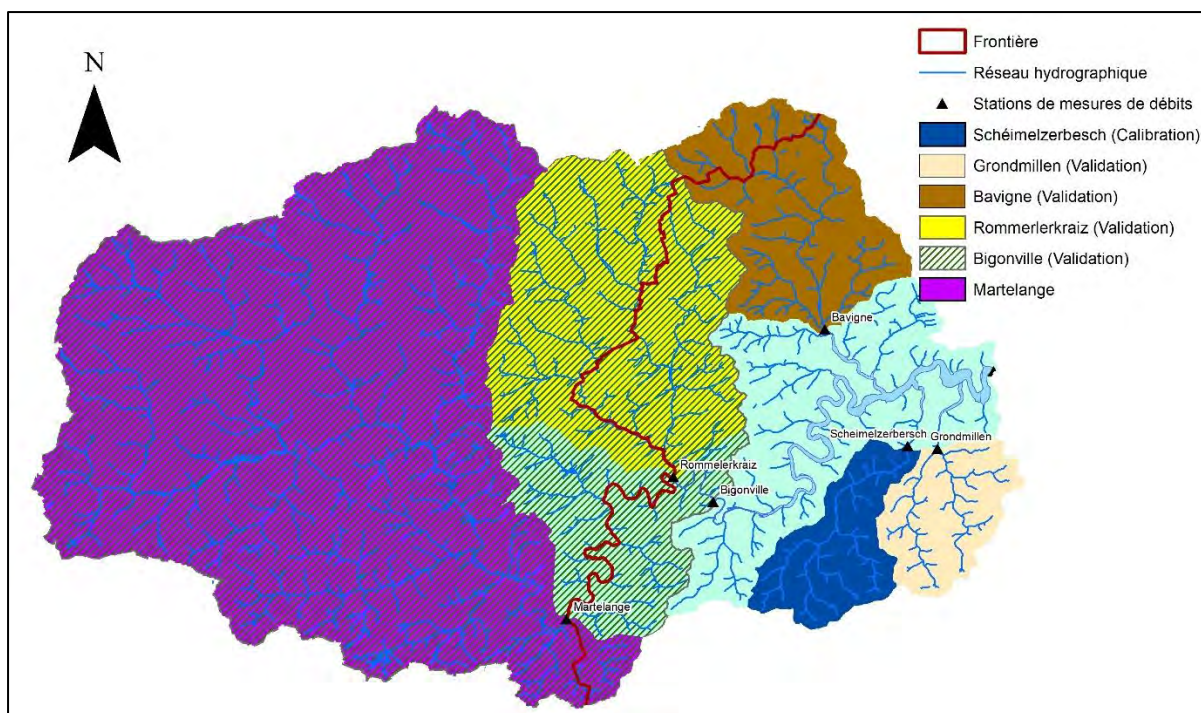


Figure 4 : Stations de mesures disposant de données de débits pouvant être exploitées dans le cadre du projet

Les modèles numériques de terrain wallon d'une résolution de 1 m³ et luxembourgeois d'une résolution de 5 m (BD-L-MNT5) ont été fusionnés à une résolution de 5 m (Figure 5). La reconstitution des pentes à partir du MNT fusionné montre que le relief est le plus marqué et les pentes les plus importantes du côté luxembourgeois du bassin versant (Figure 5 et Figure 6).

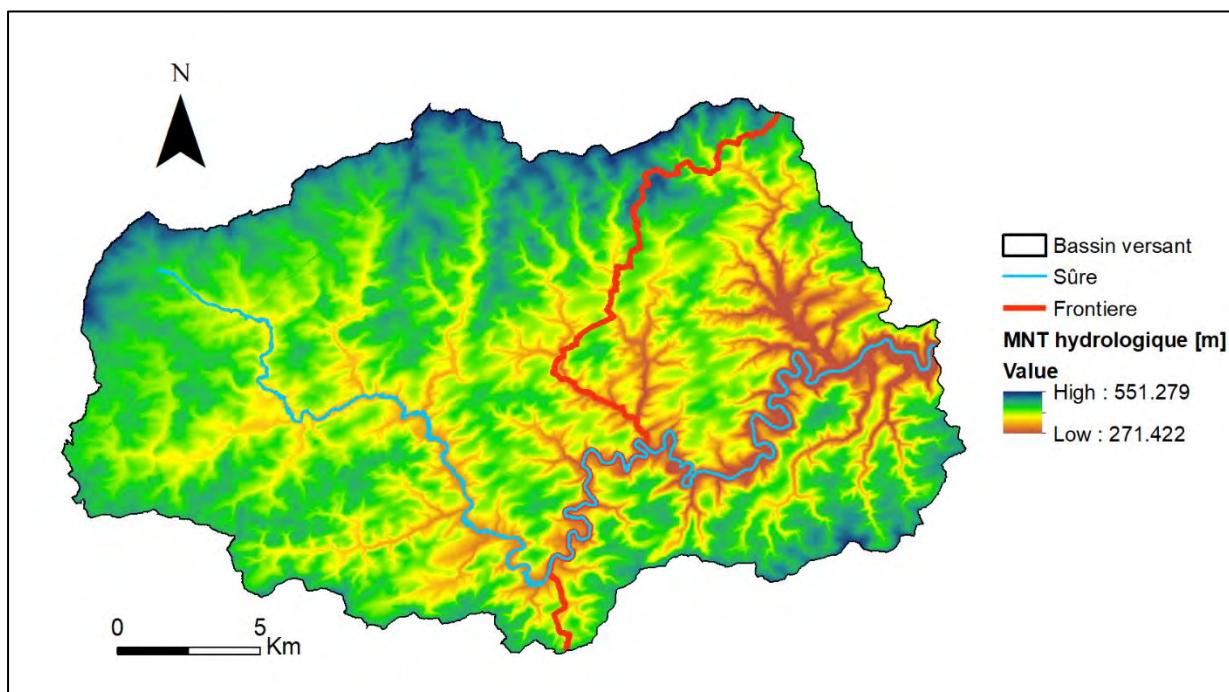


Figure 5 : Création d'un MNT hydrologique pour le bassin versant de la Sûre à Esch-sur-Sûre

³ <http://geoportail.wallonie.be/catalogue/6029e738-f828-438b-b10a-85e67f77af92.html>

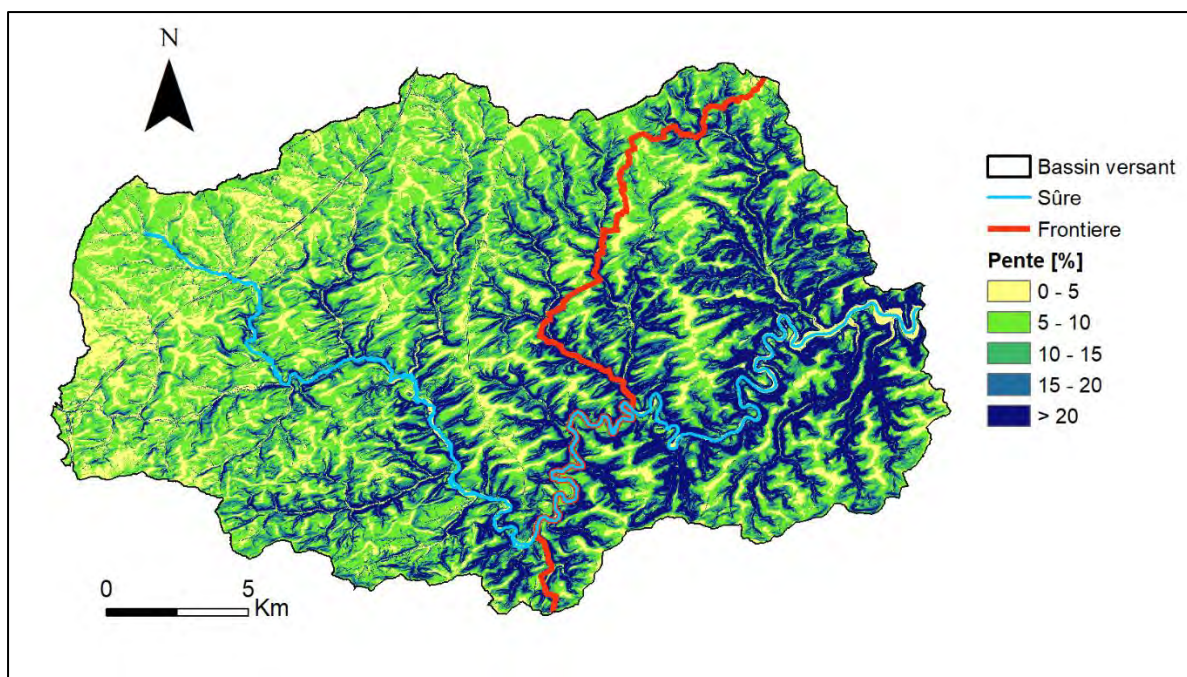


Figure 6 : Carte des pentes dérivée du MNT hydrologique pour le bassin versant de la Sûre à Esch-sur-Sûre

L'occupation du sol dans les zones cultivées sur la période 2015 à 2017 a été définie sur base du parcellaire agricole wallon et luxembourgeois en tenant compte des successions culturales. En dehors des zones agricoles, les données d'occupation du sol LifeWatch⁴ et de l'OBS 2007 ont été utilisées. Les cultures et occupations du sol présentant des similitudes quant à leur calendrier cultural et leur impact hydrologique et érosif ont été regroupées de manière à réduire le nombre de classes d'occupation du sol. 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. Suite à ce travail d'homogénéisation et de regroupement, la Figure 7 montre que l'occupation du sol de 2015 à 2017 est essentiellement forestière (46 %) et 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.

⁴ <http://lifewatch.be/> (consulté le 04/09/2018)

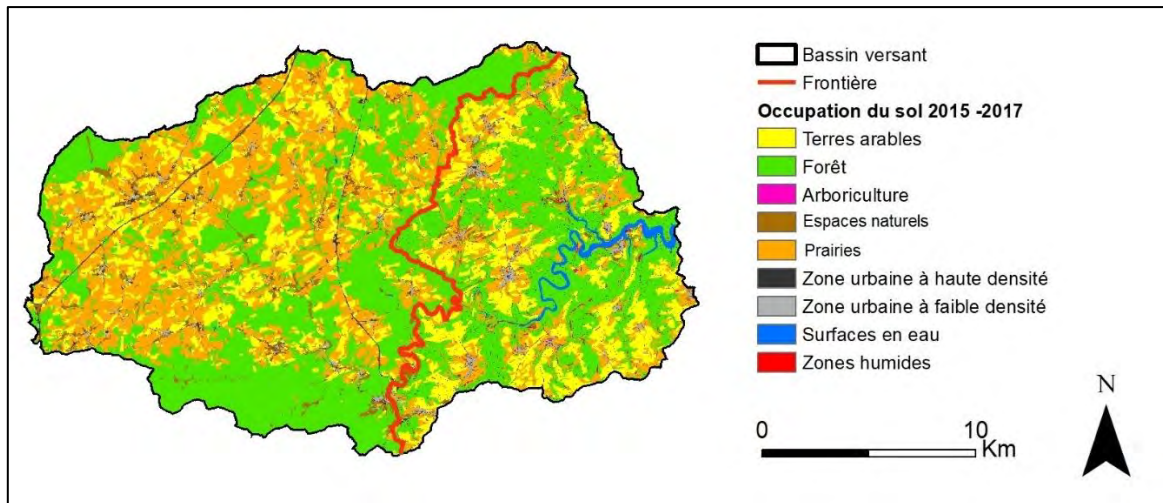


Figure 7 : Carte combinée de l'occupation du sol de 2015 à 2017 après regroupement en grandes classes d'occupation du sol pour le bassin versant de la Sûre à Esch-sur-Sûre.

Concernant la 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 ont été utilisées. 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 8). 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, dont 2 sont dominantes.

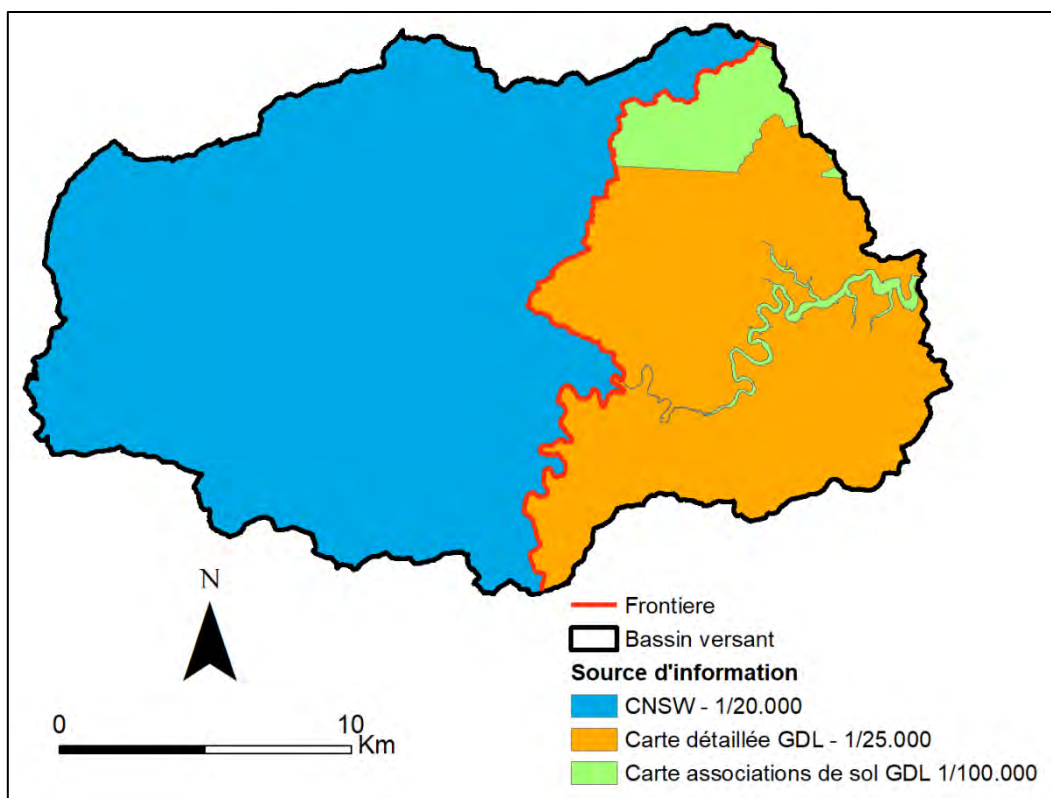


Figure 8 : Représentation cartographique des sources d'information pédologiques utilisées sur la zone d'étude

Les légendes de la carte des sols numérique de la Wallonie et de la carte détaillée des sols du GDL sont conçus sur base de légendes similaires ce qui a permis (i) de faire correspondre entre eux les sigles pédologiques de chaque région et (ii) de regrouper les sols dont les descriptions sont relativement proches après avoir éliminé certaines phases ou variantes de développement de profil. Ce travail d'homogénéisation effectué par le service de pédologie de l'ASTA a permis d'aboutir à 142 sols ou séries pédologiques sur la zone d'étude. Cela reste toutefois 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 10. 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 1 et au Tableau 2. Ceci a permis d'aboutir à la carte des sols fonctionnels présentée à la Figure 9.

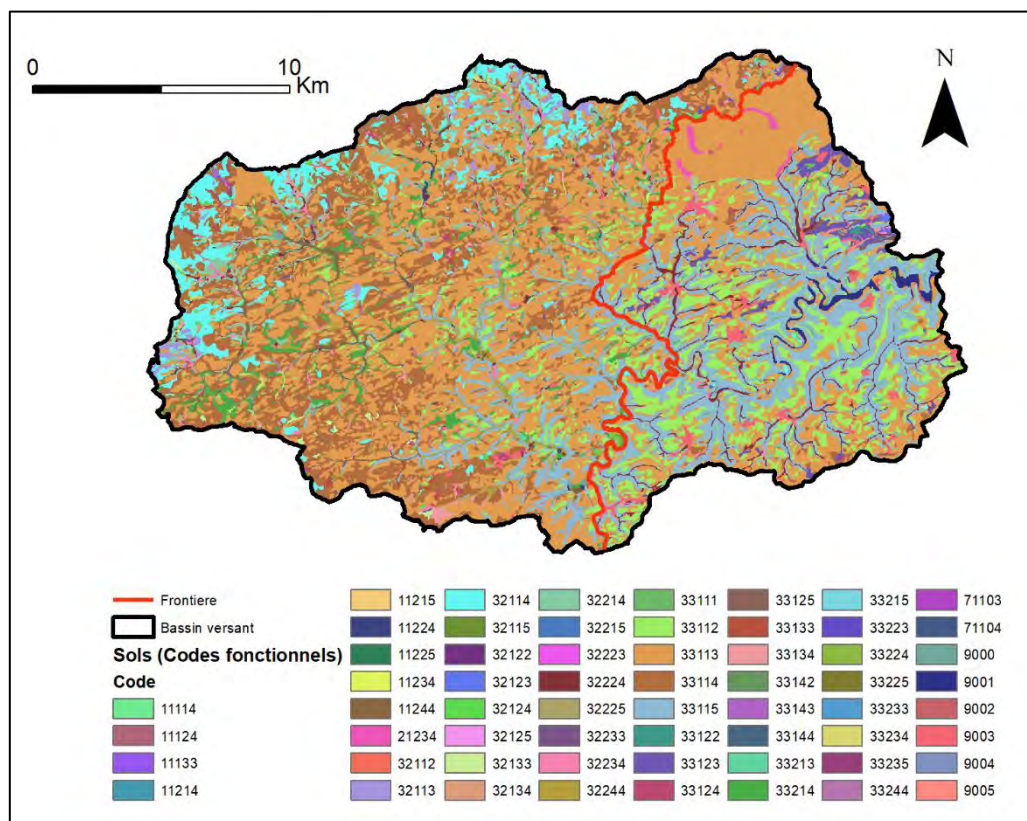


Figure 9 : Carte des sols fonctionnels pour le bassin versant de la Sûre à Esch-sur-Sûre

Texture (1)		
<i>Sigle</i>	<i>Description</i>	<i>Code</i>
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)	
<i>Description</i>	<i>Code</i>
Pas de charge	1
Peu caillouteux	2
Caillouteux à très caillouteux	3

Position dans le paysage (3)	
<i>Description</i>	<i>Code</i>
Sols des plateaux et des pentes	1
Sols des vallées et des dépressions	2

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

Drainage (4)			
<i>Description</i>	<i>Code</i>	<i>Wallonie</i>	<i>GDL</i>
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, l	h, i, l
Drainage naturel assez pauvre ou pauvre, à horizon réduit	4	e, f, F, g, G	f, F

Figure 10 : 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 1 : Codes attribués aux différentes séries spéciales wallonnes présentes sur la zone d'étude. La série spéciale H est assimilée à un GbbfiP (33115) et les zones non cartographiées se voient attribuer le code majoritaire dans son voisinage

RW		
<i>Sigle</i>	<i>Description</i>	<i>Code</i>
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 2 : 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 assimilée à un GDp1 (32224) et la série spéciale R est assimilée à un Gbbfi6 (33111).

GDL		
<i>Sigle</i>	<i>Description</i>	<i>Code</i>
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 rocaillieux	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

Comme le montre la Figure 11, 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 volumique de plus 15 % à plus de 50 % (Figure 12). 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. Les classes de drainage des sols sont quant à elles essentiellement déterminées comme excessives à légèrement excessives ou favorables sur la zone d'étude (Figure 13). 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 vallée 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 14). 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 (sols dans les pentes > 20 %). 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 6). 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 ou d'horizons, le groupe hydrologique ainsi que l'érodibilité du sol [$t\ m^2\ hr$] / ($m^3\ t\ cm$) (Bah et al. 2016)⁶. Il a été constaté que la classification des groupes hydrologiques des sols sur base des informations existantes est très différente entre la Wallonie⁵ et le GDL⁶ (Figure 15). 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., 2018⁷, Martínez-Carreras et al., 2016⁸ et Jackish et al., 2016⁹) et sur le mémoire de Nau (2015)¹⁰ qui montrent des vitesses d'infiltration et de conductivité hydraulique à saturation importantes sur le bassin versant

⁵ Demarcin P, Sohler 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

⁶ 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 GDL à partir de la carte des sols, 48p.+annexes

⁷ 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.

⁸ 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.

⁹ 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*.

¹⁰ 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. TFE présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master bioingénieur en sciences et technologies de l'environnement 75p. Gembloux Belgique.

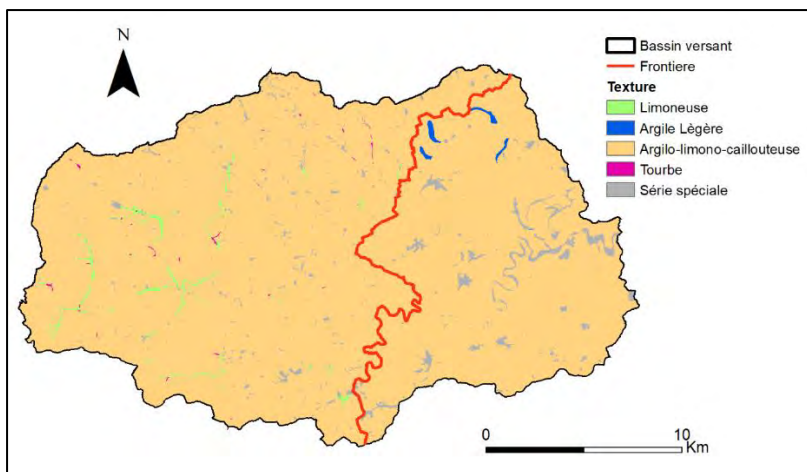


Figure 11 : Textures des sols sur la zone d'étude

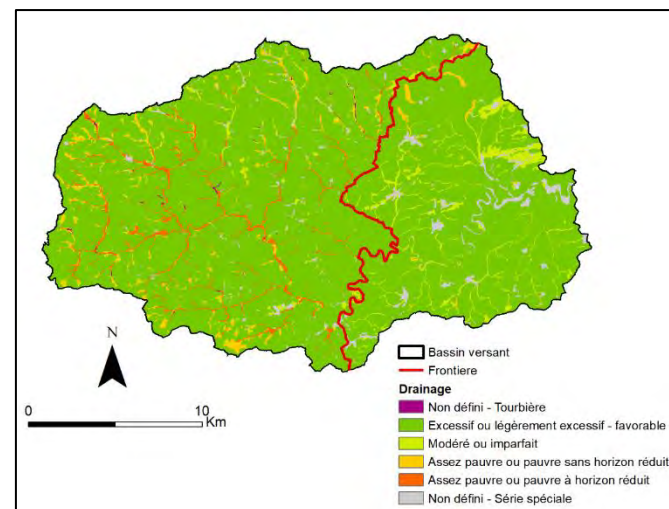


Figure 13 : Classes de drainage des sols sur la zone d'étude

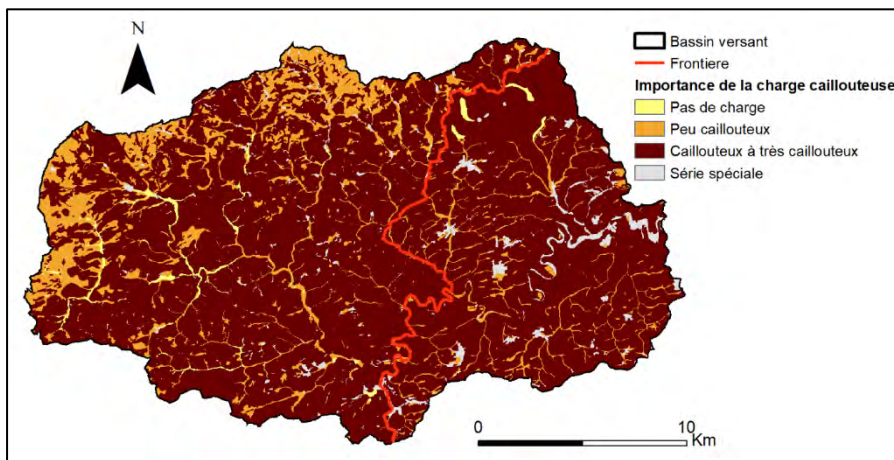


Figure 12 : Importance de la charge caillouteuse des sols sur la zone d'étude

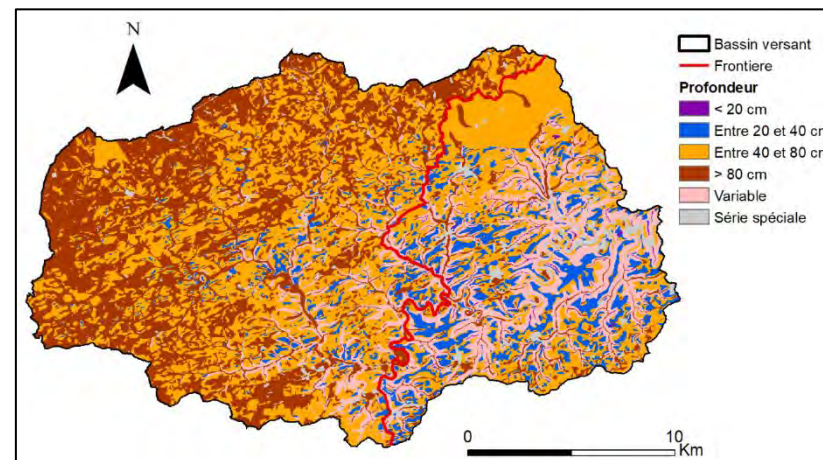


Figure 14 : Classes de profondeur de sol sur la zone d'étude

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 16). 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 intégrés dans la base de données de SWAT. Pour chacun de ces paramètres, le Tableau 3 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 2012¹¹. 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 les profils récents et historiques du GDL (BDSOL) (Tableau 4). Le Tableau 5 montre à titre illustratif la manière dont le sol dominant du bassin versant (Gbbfi2) a été paramétré.

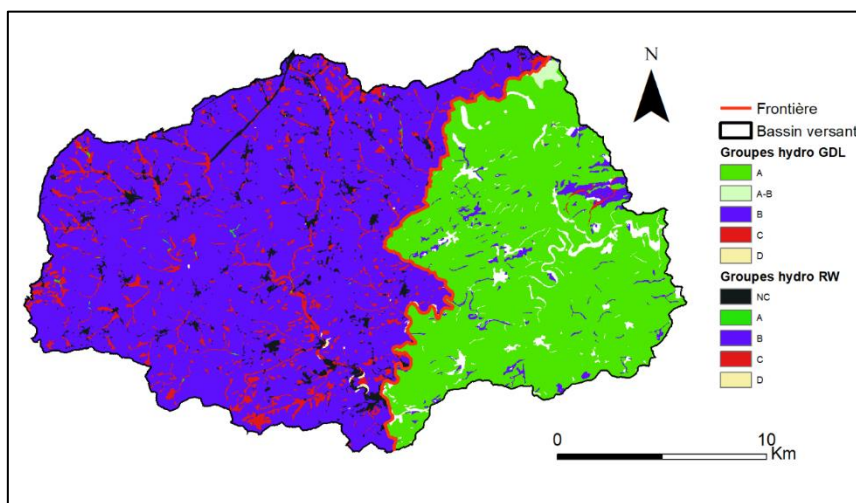


Figure 15 : Groupes hydrologiques de sol sur base des informations wallonnes et luxembourgeoises

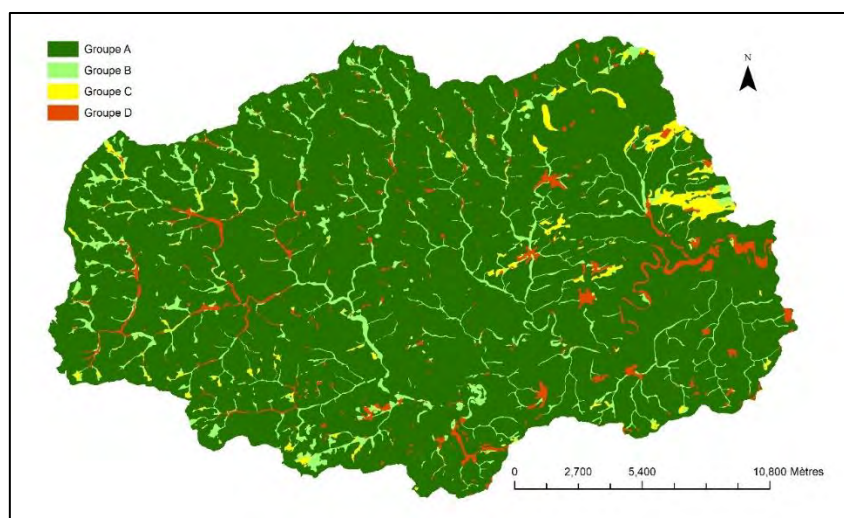


Figure 16 : Groupes hydrologiques de sol après homogénéisation des données et reclassification

¹¹ <http://swat.tamu.edu/documentation/2012-io/>

Tableau 3 : 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 de l'ASTA	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 $Cv=0,4943 \cdot Cm+0,482$
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, terres arables)
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, terres arables)
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, ajustée 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 4 : 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 ¹²

Tableau 5 : 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/cm ³	%vol	%vol	mm/mm de sol	mm/h
A	Terre arable	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	Terre arable	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	Terre arable	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

Une fois le modèle SWAT paramétré, l'étape de calibration sur le bassin versant de Schéimelzerbesch abouti à la sélection de 3 sets de paramètres fournissant des résultats très satisfaisants (Tableau 6 et Figure 17). Les paramètres sensibles des différents sets sont essentiellement liés aux caractéristiques du sol (p.ex. : conductivité hydraulique à saturation [SOL_K], réserve en eau utile [SOL_AWC], ...) et du sous-sol (p.ex. : temps de transfert du bas du profil de sol à l'aquifère peu profond [GW_DELAY], constante de récession du débit de base, [ALPHA_BF]...) (Tableau 7 et Figure 18). Les paramètres liés aux écoulements de surface comme le Curve Number (coefficient de ruissellement) des différentes occupations du sol (Figure 19) ou encore le temps de concentration du bassin versant ne sont pas sensibles. Seuls le Curve Number du sol nu après récolte (CNOP) et la température de fonte de la neige (SMTMP) sont sensibles mais dans une moindre mesure par rapport aux paramètres d'écoulement souterrains.

¹² 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.

Ceci s'explique par le fait que le bassin versant est très peu ruisselant (*surface runoff*) et que l'essentiel des transferts sont liés à de l'écoulement hypodermique rapide (écoulement latéral, *lateral flow*) et différé (contribution de l'aquifère peu profond, *baseflow / shallow groundwater*) du fait d'une grande capacité d'infiltration des sols et de la présence d'une couche de schiste quasiment imperméable entre 2 et 5 m de profondeur (Tableau 8, Figure 18 et Figure 20). La série temporelle des débits est caractérisée par une grande saisonnalité dans le comportement des débits à l'exutoire, les débits hivernaux étant largement supérieurs aux débits estivaux. Le printemps et l'été, sont caractérisés par de longues périodes débit d'étiage avec quelques pics de débits. La majorité des orages estivaux n'engendre que très peu d'augmentation des débits. La crue du 2 juin 2016 est assez exceptionnelle et a été engendrée par la répétition de fortes pluies du 30 mai au 2 juin. En automne et en hiver, le débit de base augmente et les pics sont plus fréquents du fait de la contribution plus importante des écoulements hypodermiques liée à la saturation des sols.

Tableau 6 : 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. (R² : coefficient de détermination, NS : Nash-Sutcliffe, KGE : Kling Gupta Efficiency, bR² : produit du coefficient de détermination et de la pente de la droite 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 prédicts)¹³.

		Set#1	Set#2	Set#3
Paramètres	<i>SOL_K (r)</i>	-0.968	-0.968	-0.969
	<i>SOL_AWC (r)</i>	-0.480	-0.375	-0.560
	<i>ALPHA_BF</i>	0.902	0.902	0.669
	<i>GWQMN</i>	3112.800	3262.500	4012.500
	<i>GW_DELAY</i>	2.677	2.163	0.764
	<i>CH_K2</i>	173.800	117.500	276.250
	<i>SHALLST</i>	3162.500	3062.500	4275.000
	<i>SMTMP</i>	2.513	-	-
	<i>SOL_BD (r)</i>	-0.067	-	-
	<i>GW_REVAP</i>	0.028	-	-
	<i>CN_OP (r)</i>	-0.041	-	-
	<i>RCHRG_DP</i>	-	-	0.013
	<i>ALPHA_BNK</i>	-	-	0.894
	<i>ESCO</i>	-	-	0.729
	R ²	0.80	0.77	0.79
	Calibration	NS	0.80	0.77
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

¹³ Voir le manuel SWAT-CUP pour plus de détails sur les différents indicateurs de performance

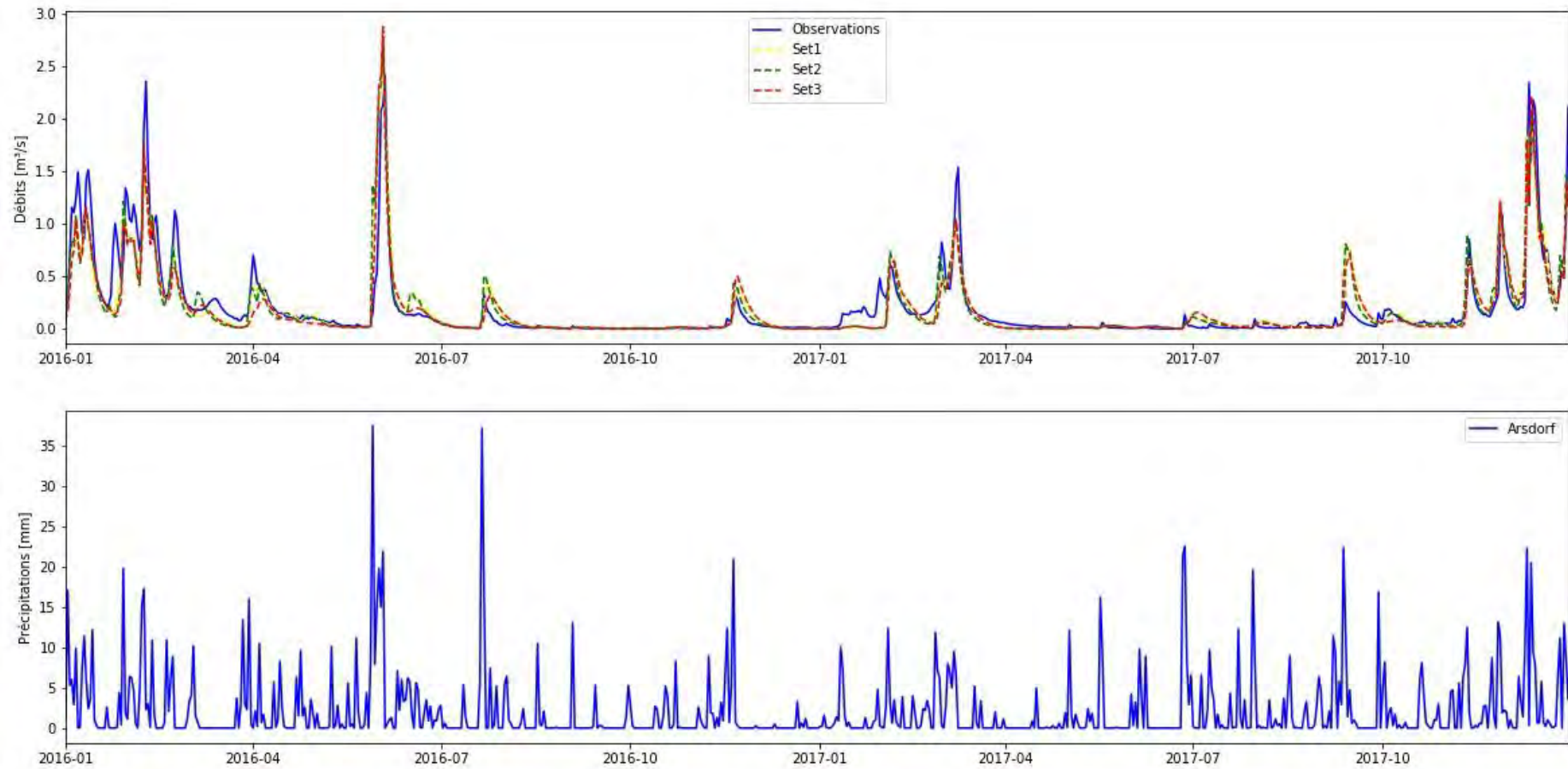


Figure 17 : Débits obtenus sur base des sets de calibration 1, 2 et 3 pour le bassin versant de Schéimelzerbesch

Tableau 7 : Liste des paramètres sensibles utilisés pour la calibration du modèle

Paramètre	Description	Unités
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_BN K	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 H2O /mm sol]
SOL_BD	Densité apparente du sol utilisée pour déterminer la porosité de drainage des différents horizons du sol	[g/cm ³]
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]

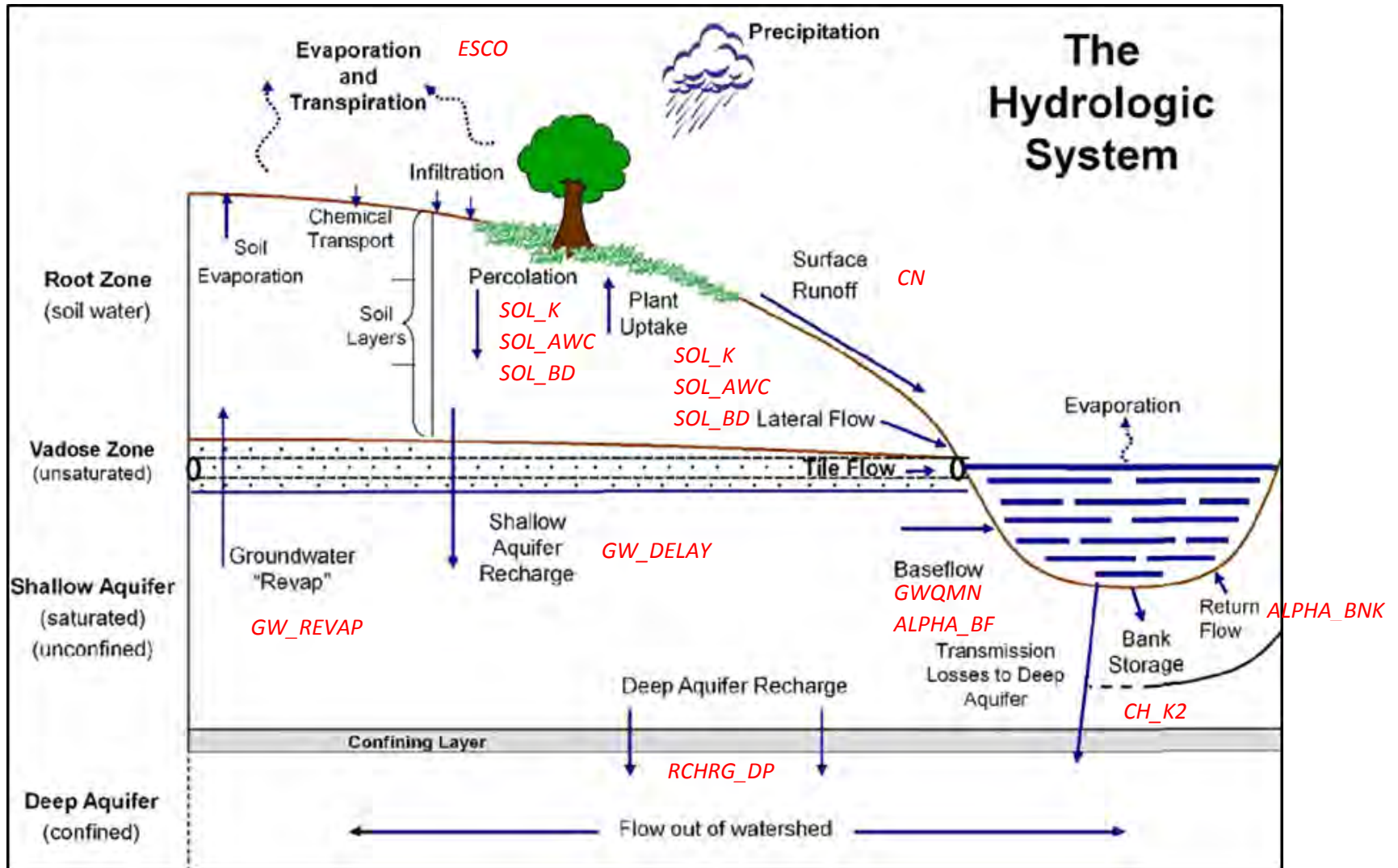


Figure 18 : Schéma du fonctionnement du cycle hydrologique dans le modèle SWAT et lien avec les paramètres des différents sets.

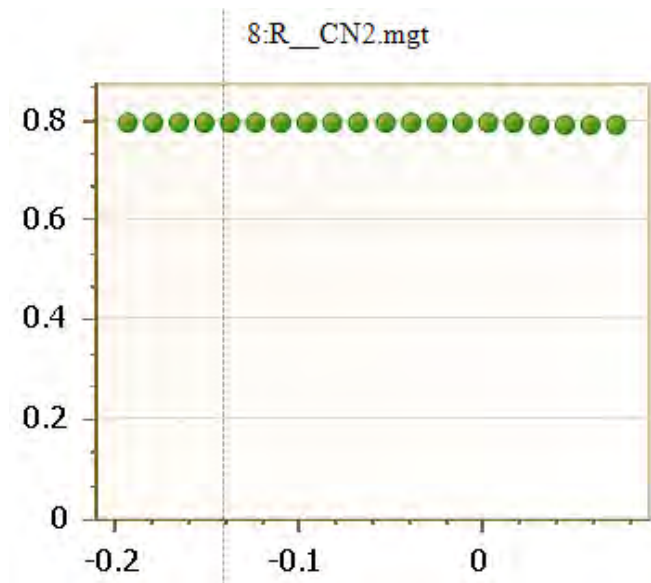


Figure 19 : Variation du coefficient de Nash-Sutcliffe lorsque l'on fait varier de manière relative la valeur du Curve Number (CN) des différentes occupations du sol pour le modèle calibré. Les résultats que le modèle calibré n'est pas sensible à la valeur du Curve Number.

Tableau 8 : Comparaison des bilans hydriques annuels moyens sans calibration et avec calibrations pour les sets de paramètres 1 à 3 pour le bassin versant de Schéimelzberbesch

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



Figure 20 : Profil de sol Gbbfi 2 où l'on peut distinguer la couche de schiste imperméable située entre 2 et 5 m de profondeur. On remarque la charge caillouteuse s'intensifie et s'organise avec la profondeur.

La validation sur les bassins versants de Grondmillen, Bavigne, Rommelerkraiz et Bigonville montre des résultats similaires avec des indicateurs de performance du modèle très satisfaisants puisque les coefficients de Nash-Sutcliffe sont compris entre 0.70 et 0.80 (Figure 21). Seul le bassin versant de Rommelerkraiz présente des coefficients légèrement inférieurs (0.60 à 0.65) du fait de la non reproduction d'un pic de débit en janvier 2017 qui pourrait être liée à une mauvaise prise en compte des sols gelés par le modèle. Dans tous les cas, les écoulements sont principalement hypodermiques (*lateral flow* et *baseflow -shallow groundwater*) et le ruissellement (*surface runoff*) est quasiment inexistant (< 5% des écoulements annuels).

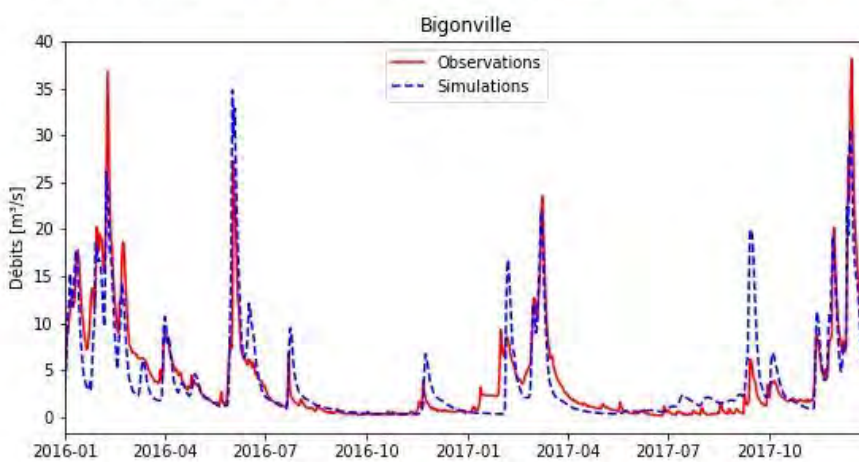
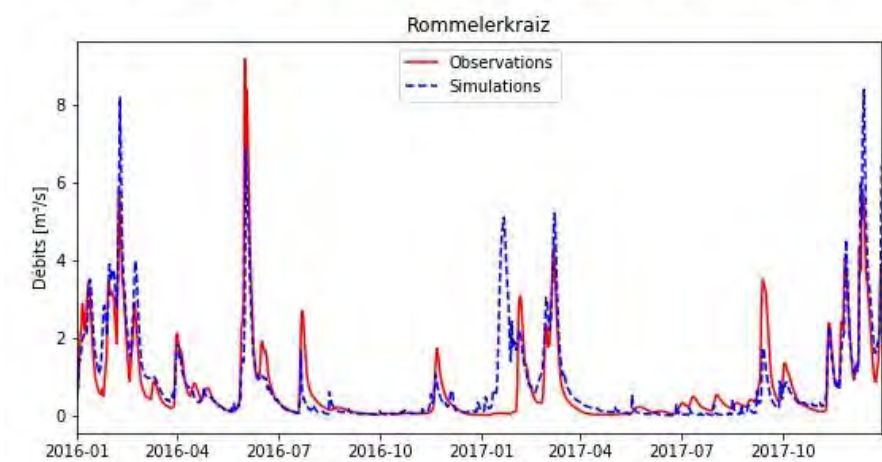
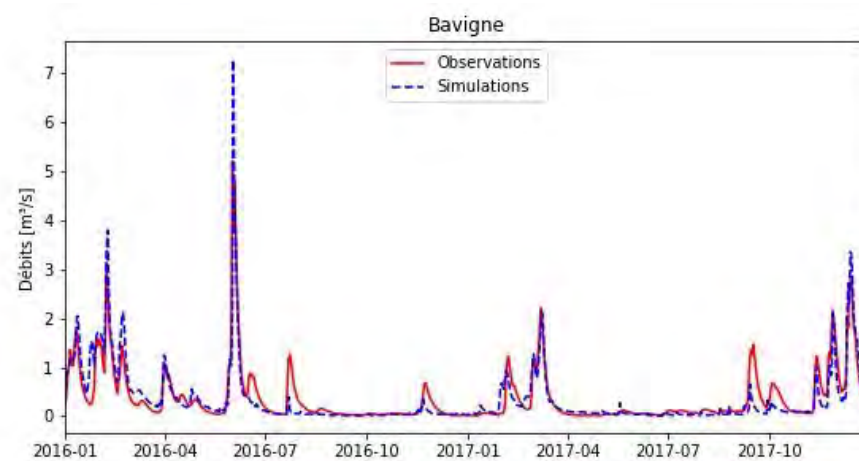
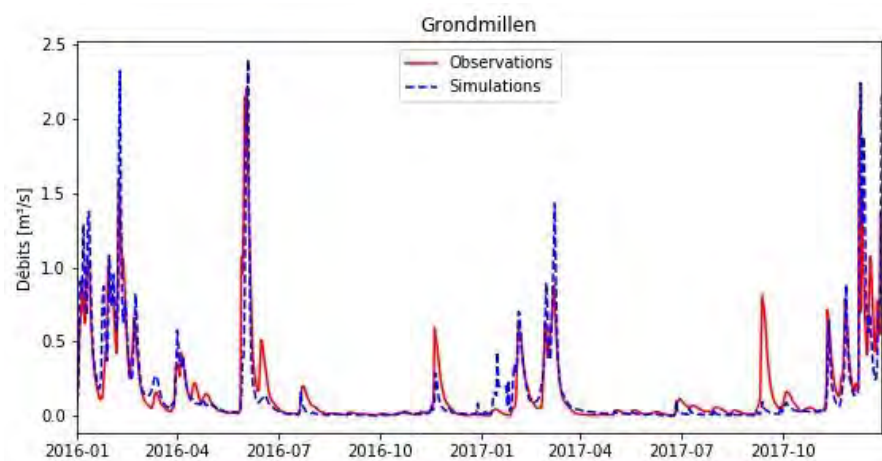


Figure 21 : Débits simulés sur les bassins versants utilisés pour la validation du modèle sur du set de calibration 1 (Set#1, Tableau 6)

Dans le modèle SWAT, le bassin versant modélisé est divisé en différents niveaux d'organisation représentés à la Figure 22. Le bassin versant est divisé en sous-bassins (SB_1, \dots, SB_n) sur base de la topographie et du réseau hydrographique. A chaque segment du réseau hydrographique correspond un sous-bassin. Les sous-bassins sont reliés spatialement de sorte que le flux contenu dans un sous-bassin s'écoule entièrement vers le sous-bassin suivant. Les sous-bassins 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 sous-bassins 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 sous-bassin. Il est donc possible de déterminer pour chaque sous-bassin les écoulements principaux sur base des sorties du modèle (Figure 23). Il en ressort que 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. Toutefois, les écoulements de surface sont très faibles car seulement 5 % de la quantité annuelle des précipitations est convertie en ruissellement sur le bassin versant. 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.

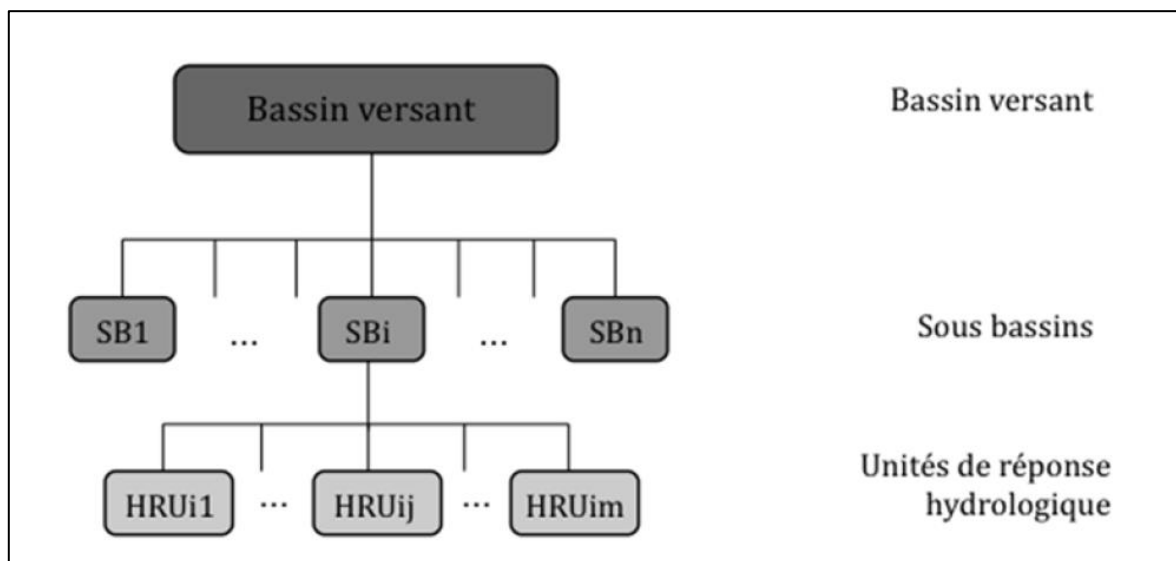


Figure 22 : Organisation des unités spatiales dans le modèle SWAT

Conclusion

Cette étude met en évidence qu'il est possible de modéliser de manière fiable les écoulements d'un bassin versant si l'on prend correctement en compte le fonctionnement du sol et du sous-sol. Cela nécessite de disposer d'informations pédologiques fiables quant aux profils de sols, leurs textures, leurs charges caillouteuses, leurs profondeurs, leurs classes de drainage ou encore leurs groupes hydrologiques. Ces paramètres permettent de regrouper les sols du point de vue de leur fonctionnement hydrologique et de leur attribuer des valeurs moyennes de conductivité hydraulique à saturation, de réserve utile et de densité apparente qui gouvernent le comportement de l'eau dans le sol. L'exemple du bassin versant de la Sûre à Esch-sur Sûre, qui présente très peu d'écoulement de surface (< 5 %) mais pour lequel les écoulements sont essentiellement souterrains (> 95%), démontre l'importance de ces paramètres dans la reproduction des séries temporelles de débit.

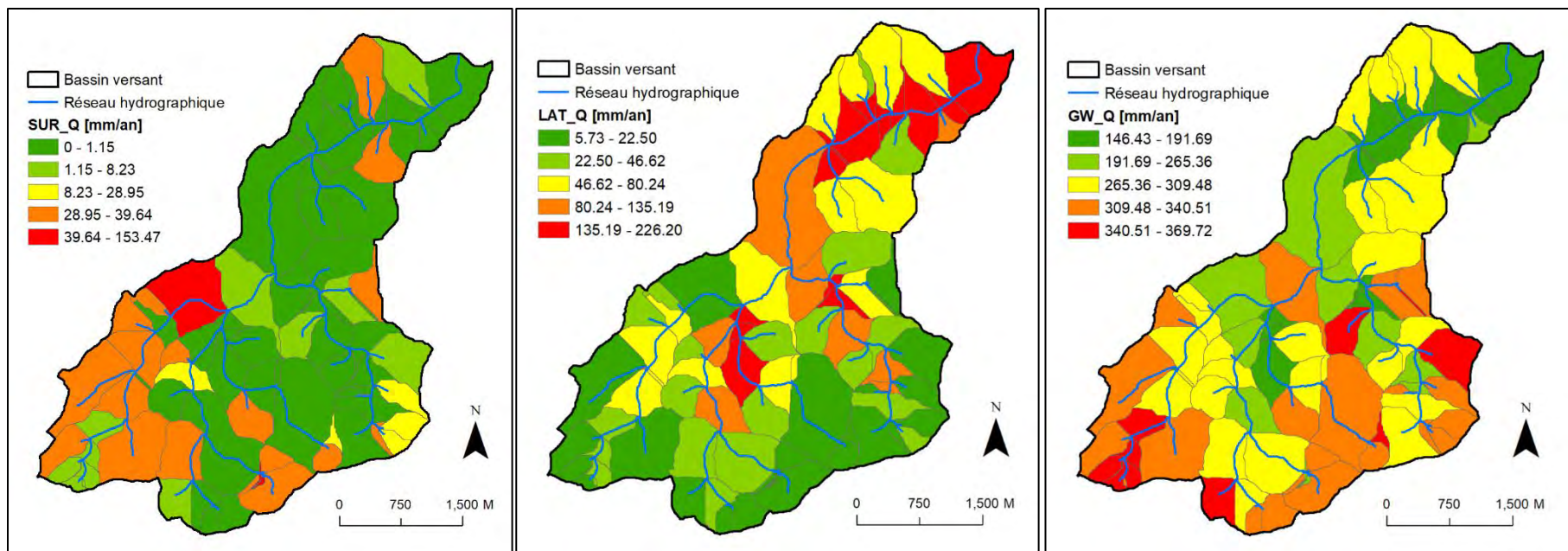


Figure 23 : Quantité moyenne annuelle des principaux types d'écoulements sur le sous-bassin versant Schéimelzerbesch calculée sur base des résultats des débits simulés pour la période 2016-2017. *SURF_Q* = Ruissellement de surface [mm/an], *LAT_Q* = Ecoulements latéraux hypodermiques [mm/an], *GW_Q* = Contribution de l'aquifère peu profond [mm/an].