Marché de services pour l'amélioration des axes de concentration du ruissellement générés sur base du LIDAR 2015 à la résolution de 1m et des données cours d'eau dérivées

Rapport

Mars 2019

Association temporaire Alexandre Maugnard – Champs Libres Coopérative

Table des matières

1. Introduction 1
2. Amélioration des axes de ruissellement concentré et du réseau hydrographique wallon 2
2.1. Axes de ruissellement concentré 2
2.1.1. Procédure globale 2
2.1.2. Adaptation de la procédure par rapport au précédent rapport et étapes spécifiques .. 3
2.1.2.1. Prétraitement du MNT 4
2.1.2.2. Choix des distances de l'algorithme breach implémentés de manière incrémentielle 4
2.1.2.3. Choix des couches de berges 4
2.1.2.4. Découpages spatiaux intermédiaires 5
2.1.2.5. Vectorisation et orientation des axes de ruissellement concentré 5
2.1.2.6. Exutoires des axes de ruissellement dans le RHW 6
2.1.2.7. Axes transfrontaliers 6
2.1.2.8. Couche d'incertitude sur le positionnement des axes de ruissellement 8
2.2. Amélioration du réseau hydrographique 10
2.2.1. Procédure globale de la production de la couche améliorée du RHW 10
2.2.2. Adaptation de la procédure par rapport au précédent rapport et étapes spécifiques 11
2.2.2.1. Zone tampon autour des zones complexes 11
2.2.2.2. Calcul des écoulements dans les zones complexes 11
2.2.2.3. Jonctions entre le nouveau et l'ancien réseau hydrographique 13
2.2.2.4. Post-processing 15
2.2.2.5. Table d'attributs 15
2.2.2.6. Détermination du sens d'écoulement 15
2.2.2.7. Extraction de l'altitude 17
3. Description des produits livrés 18
3.1. Axes de ruissellement concentré 18
3.1.1. Synthèse des couches produites 18
3.1.2. Spécifications des couches produites 20
3.1.2.1. Format des rasters 20
3.1.2.2. Géoréférencement 20
3.1.2.3. Compression 20
3.1.2.4. Autres spécifications 20

3.2. Réseau hydrographique 21
3.2.1. Validité du RHW 21
3.2.2. Description des nouveaux attributs du RHW 21
4. Délimitation des bassins versants et des masses d'eau de surface 22
4.1. Création d'un MNT hydrologiquement continu dédié au calcul des bassins versant et masses d'eau de surface 22
4.2. Délimitation des bassins versant des secteurs PARIS 28
4.3. Agrégation des bassins versant des secteurs PARIS aux niveaux supérieurs et en masses d'eau de surface 34
4.4. Délimitation des bassins versant des stations Aqualim, des zones d'immersion temporaires, des zones de baignade et ORI 37
5. Annexes 41
Annexe 1 : Procédures détaillées pour la production des axes de ruissellement concentré 41
Annexe 2 : Procédures détaillées pour l'amélioration du RHW 47
Annexe 3 : Copie des fichiers readme des rasters produits 60
Annexe 4 : Arbre des scripts de production 65
Annexe 5 : Liste des BVs demandant une attention particulière 66

1. Introduction

Le présent marché de services vise à améliorer les axes de concentration du ruissellement générés sur base du LIDAR 2015 à la résolution de 1m et les données cours d'eau dérivées. La convention a été notifiée à l'association temporaire Alexandre Maugnard – Champs Libres le 1er juin 2018 pour une durée de 9 mois.

Ce rapport est le troisième et dernier rapport de cette convention. Nous référons aux deux autres rapports pour des descriptions et des justifications plus approfondies des méthodologies appliquées. Le premier rapport (juillet 2018) détaille les cas problématiques où les axes de ruissellement et le réseau hydrographique présentaient des anomalies et compare des méthodes pour traiter le modèle numérique de terrain (MNT) afin de pallier à ces problèmes. Le deuxième rapport (septembre 2018) décrit et compare les différentes options méthodologiques et présente leur effet sur les cas problématiques identifiés. Dans ce troisième et dernier rapport, nous présentons :

- la méthodologie de production, c'est-à-dire les dernières justifications et modifications de la méthodologie depuis le précédent rapport ;
- la description et la spécification des produits finaux obtenus et livrés relatifs aux axes de ruissellement concentré, au réseau hydrographique et aux bassins versants ;
- les pseudo-codes des scripts de production permettant de reproduire les calculs à mettre en œuvre (cfr Annexes 1 à 4 dont l'arbre des scripts en Annexe 4).

Outre la production de nouveaux axes de ruissellement et l'amélioration du RHW, ce rapport présente les résultats obtenus pour la délimitation des bassins versants et masses d'eau de surface à partir du MNT LiDAR.

2. Amélioration des axes de ruissellement concentré et du réseau hydrographique wallon

2.1. Axes de ruissellement concentré

2.1.1. Procédure globale

La procédure présentée dans le précédent rapport a été globalement suivie lors de la phase de production. Quelques modifications ont dû être apportées (cfr section suivante). Une première phase (Figure 1) a consisté en la production d'un MNT hydrologiquement corrigé avant de calculer les axes de ruissellement. Cette première phase s'est fait suivant un découpage du MNT wallon en maille de 2 x 2 km. Une deuxième phase (Figure 2) a eu lieu pour calculer les écoulements sur base du MNT hydrologiquement corrigé. Elle s'est déclinée en 3 chaines de traitements similaires mais basées sur des MNT différents :

1. un MNT où les valeurs d'altitude sont effacées au niveau des dépressions qui ne débordent pas pour une pluie de 24 h et une période de retour de 100 ans. Il s'agit d'une couche de dépressions identifiées lors du projet LiDAXES 1 (MNT_sinks) ;
2. un MNT où les valeurs d'altitude sont effacées au niveau des dépressions et du réseau hydrographique (MNT_sinks_rhw) ;
3. un MNT où les valeurs d'altitude sont effacées au niveau des dépressions, du réseau hydrographique et des surfaces des grands cours d'eau (MNT_sinks_rhw_berges).

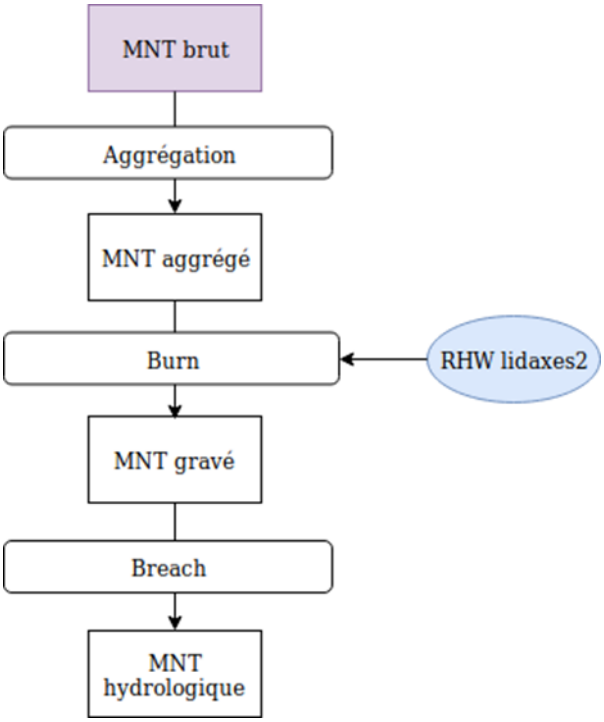


Figure 1 : Phase I de la procédure pour la création des axes de ruissellement concentré. Les boites rectangles représentent des fichiers rasters, les boites ovales des fichiers vectoriels (shp) et les boites à coins arrondis des étapes du processus.

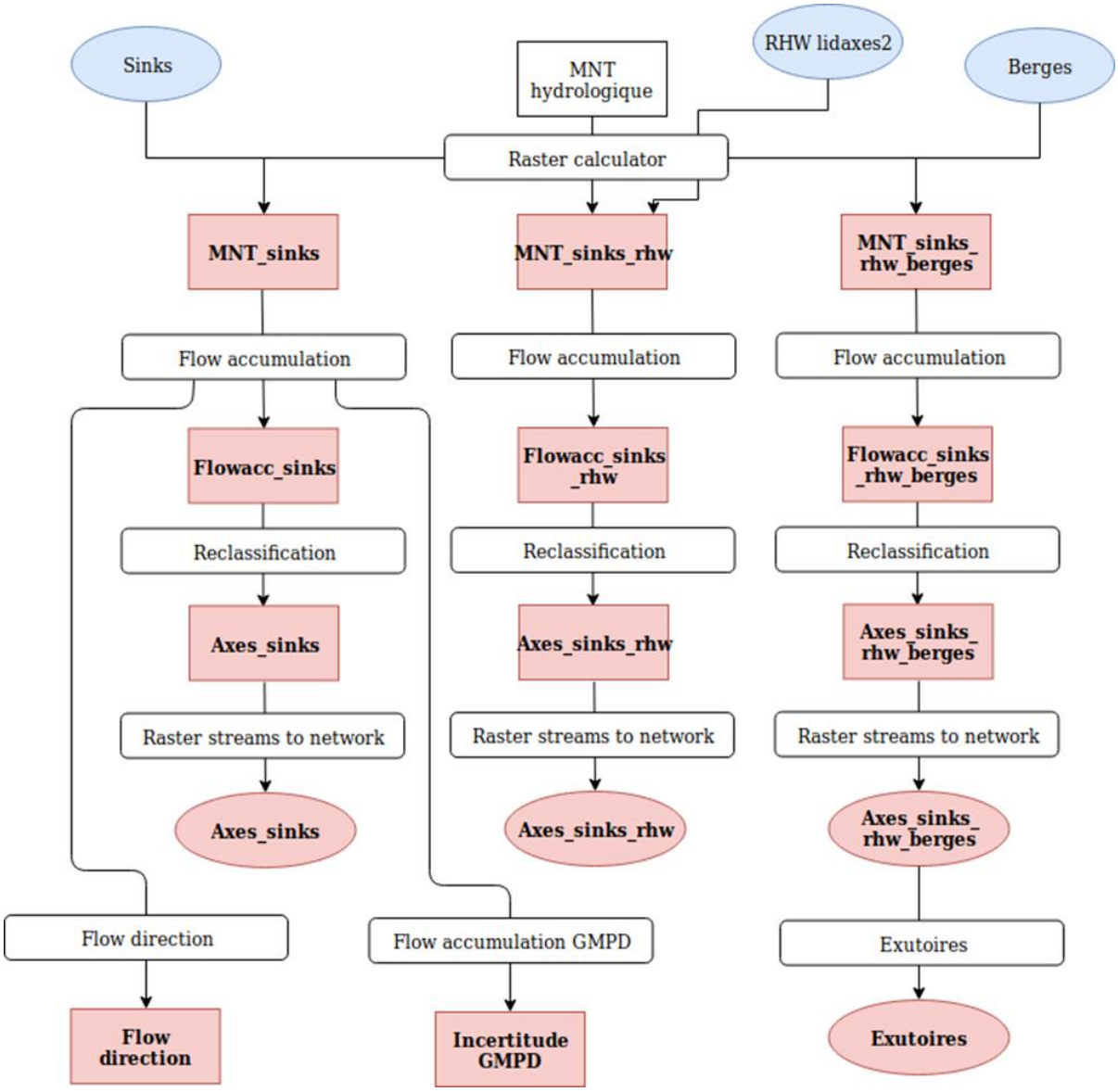


Figure 2 : Phase II de la procédure pour la création des axes de ruissellement concentré. Les boites rectangles représentent des fichiers rasters, les boites ovales des fichiers vectoriels (shp) et les boites à coins arrondis des étapes du processus. Les fichiers de sorties (délivrables) sont mis en évidence en rouge.

2.1.2. Adaptation de la procédure par rapport au précédent rapport et étapes spécifiques

La procédure globale présentée ci-dessus ne rend pas compte des multiples étapes techniques qu'il faut réaliser pour certaines des étapes du processus global. Nous renvoyons à l'annexe I, partie « Axes de ruissellement concentré » pour le détail de chaque étape de traitement de données ainsi que l'enchainement de ces étapes sous forme de pseudocode. Nous présentons ci-dessous les principales modifications et points d'attention qui n'auraient pas été décrits dans les précédents rapports du projet.

2.1.2.1. Prétraitement du MNT

Un visualisateur cartographique[1] a été mis en place afin de permettre au Maître d'Ouvrage de choisir la meilleure technique de prétraitement du MNT permettant d'optimiser le tracé des axes. Cette étape a abouti au choix d'une agrégation du plutôt qu'un lissage par filtre de moyenne. Le MNT brut a donc été agrégé à une échelle de 2m (agrégation 2 x 2 pixels) qui est celle qui permettait d'améliorer le tracé des axes sur la plupart des zones tests. Ce MNT agrégé n'a pas été ultérieurement filtré.

2.1.2.2. Choix des distances de l'algorithme breach implémentés de manière incrémentielle

Les distances pour l'algorithme « Breach depressions » ont été maintenues à 5, 40 et 200 pixels, soit 10, 80 et 400 mètres.

2.1.2.3. Choix des couches de berges

Pour affiner le tracé des axes, une couche des berges des cours d'eau a été utilisée pour supprimer les valeurs du MNT à l'endroit de ces surfaces de cours d'eau. Plusieurs couches potentiellement utilisables étaient disponibles à savoir (Figure 3) :

- le TOP10V_GIS_HYDRONET_P issu de l'IGN. Cette couche reprend via le champ TYPE "HY112" les "surfaces de rivières". Cette couche est relativement continue (le long d'un cours d'eau) et s'arrête avant la fin de la plupart des cours d'eau de catégorie 1. Les cours d'eau navigables sont entièrement couverts. Ceux de catégorie 1 en majorité. A noter que la couche est interrompue par les ponts.
- une couche d'étendue d'eau créée par classification orientée objet fournie par Adrien Michez (GxABT). Cette couche a une étendue supérieure à la précédente (plus de cours d'eau sont couverts). La couche est continue de l'aval à l'amont. Les formes sont moins bien finies que la précédente car les bords de la couche sont pixelisés et ne sont pas lisses.
- une couche de polygones de rivière provenant d'OpenStreetMap (waterway=riverbank). Cette couche couvre moins de cours d'eau que les précédentes (cours d'eau navigables et une partie de ceux classés en catégorie 1). La complétude spatiale de la couche n'est pas uniforme

Après visualisation des trois couches à plusieurs endroits de Wallonie et compte tenu des limitations de la couche d'Adrien Michez (bords non lisses) et d'OpenStreetMap (incomplétude spatiale), la première couche issue de l'IGN a été choisie comme la plus adaptée pour représenter les surfaces de rivières en Wallonie.

1 MNT traité avec les filtres de moyenne: https://lidaxes.champs-libres.be/Lidaxes/ol/map.html, MNT traité avec une agrégation: https://lidaxes.champs-libres.be/Lidaxes/ol/agg.html

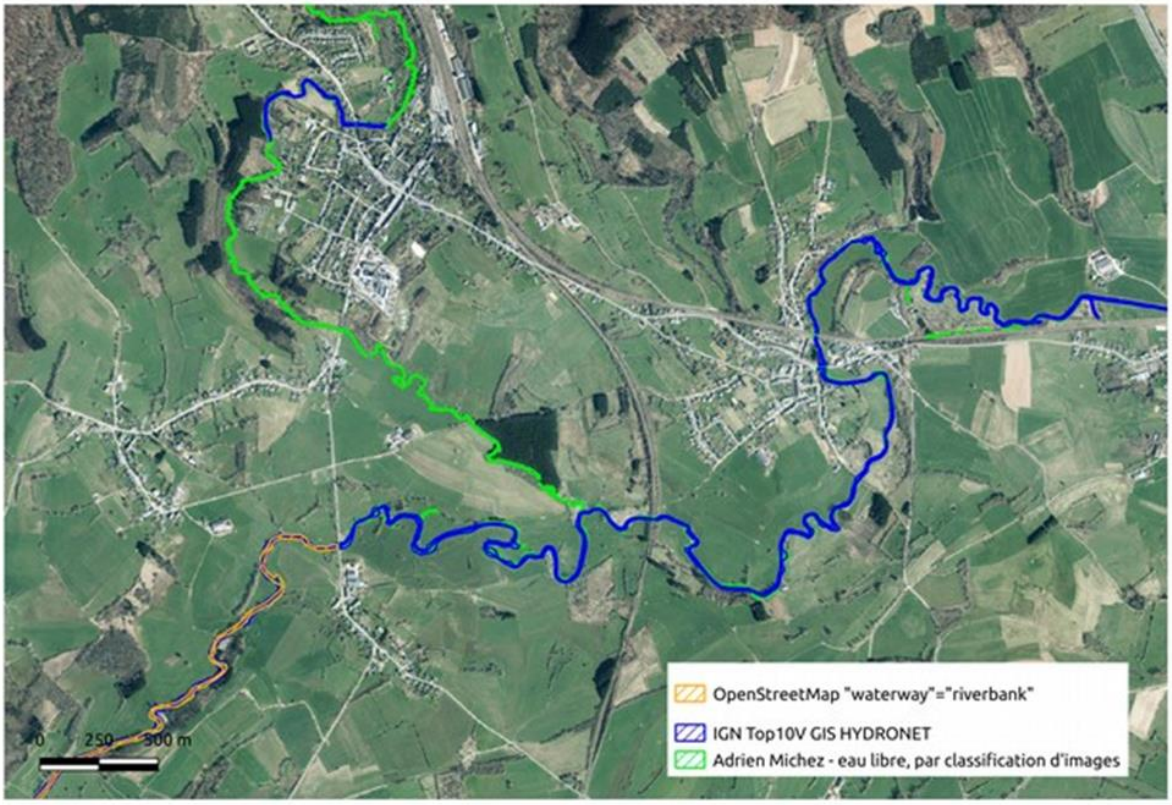


Figure 3 : Superposition des 3 couches candidates pour représenter les berges des larges cours d'eau en Wallonie, Marbehan-Rulles.

2.1.2.4. Découpages spatiaux intermédiaires

Afin de pouvoir reproduire les calculs sur une infrastructure classique (ordinateur avec RAM de 8 Go), ceux-ci ont été effectués suivant un découpage du territoire wallon et les résultats ont ensuite été agrégés à l'échelle de la Wallonie. Le traitement du MNT en un MNT hydrologiquement corrigé s'est fait par maille de 2 x 2 km. Le calcul des axes de ruissellent a été opéré par BPG (Bassins des Plans de Gestion de la DCENN, 15 sur le territoire wallon) afin de travailler à une échelle spatiale hydrologiquement cohérente.

2.1.2.5. Vectorisation et orientation des axes de ruissellement concentré

Les axes de ruissellement issus de la reclassification des valeurs d'accumulation de flux ont été vectorisés sous forme de lignes et ces dernières ont été orientées sur base des directions de flux. Il en résulte une couche vectorielle de lignes regroupées sur base des nouvelles classes d'axes définies par le Maître d'Ouvrage (1 à 6), et sur lesquelles il est possible d'ajouter des flèches permettent d'indiquer le sens d'écoulement (Figure 4). Trois couches vectorielles ont été générées. Il s'agit :

- de la couche vectorielle des axes qui prennent en considération les dépressions (Axes_r_sinks.shp) ;
- de ceux qui en plus ne se propagent pas dans le RHW (Axes_r_sinks_rhw.shp) ;
- de ceux qui sont également stoppés aux berges des cours d'eau (Axes_r_sinks_rhw_berges.shp).

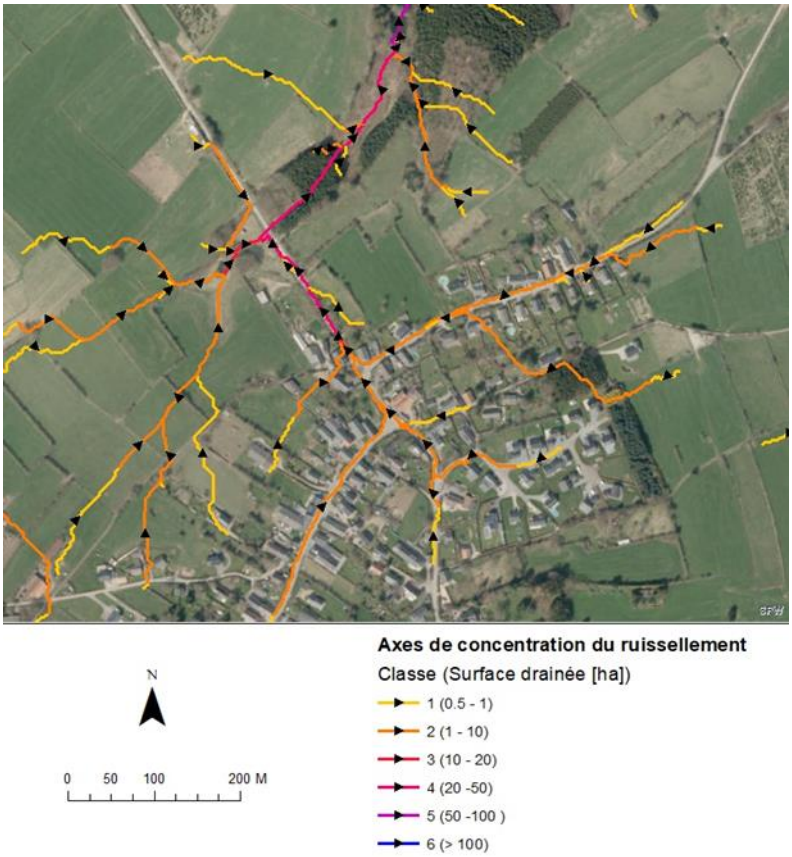


Figure 4 : Axes de ruissellement vectorisés et orientés

2.1.2.6. Exutoires des axes de ruissellement dans le RHW

Une demande supplémentaire formulée par le SPW était de pouvoir disposer des exutoires des axes de ruissellement dans le réseau hydrographique. Cependant, comme le RHW ne coïncide pas toujours parfaitement aux axes d'accumulation de flux modélisés, il est nécessaire d'appliquer un buffer autour du RHW pour déterminer les exutoires des axes de ruissellement. Après différents essais et en concertation avec les agents de la DCENN, ce buffer a été fixé à 12 m autour du RHW et à 2.5 m autour des berges. Les exutoires sont ensuite définis comme l'intersection de la couche vectorielle des axes de ruissellement qui ne se propage pas dans le RHW et qui est stoppée aux berges avec le buffer du RHW et des berges.

2.1.2.7. Axes transfrontaliers

Pour définir les axes transfrontaliers, il a été décidé de collecter les MNTs nationaux et régionaux transfrontaliers à la meilleure résolution. Seuls les MNTs flamand à 1 m, luxembourgeois à 5 m et celui des Pays-Bas à 1 m ont pu être obtenus. Pour le reste de la zone transfrontalière, le MNT disponible à la meilleure résolution est la version 1.1 du MNT 25 m résultant de la fusion des MNTs SRTM et ASTER[2].

[2] https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/copernicus-land-monitoring-service-eu-dem

Les MNTs flamand, luxembourgeois et des Pays-Bas ont été fusionnés avec le MNT 1 m wallon. Pour ce faire, chacun des MNTs a été reprojeté en Lambert belge 1972 si nécessaire et en optant pour une interpolation bilinéaire. Pour le MNT luxembourgeois, un rééchantillonnage à 1 m en appliquant également une interpolation bilinéaire a été appliqué. L'étendue sur laquelle les MNTs transfrontaliers ont été fusionnés avec le MNT wallon a été déterminée sur base de la carte des bassins versants contributifs fournis par la DCENN augmenté d'un buffer de 2000 m. Ceci correspond à 410 nouvelles mailles de 2 km x 2 km à ajouter aux 4551 mailles définies sur base de l'emprise du MNT wallon (Figure 5). Ces mailles ont fait l'objet d'un traitement identique aux mailles du territoire wallon et permettent d'obtenir une information continue sur les axes de ruissellement dans les zones transfrontalières flamandes, néerlandaise et luxembourgeoises. De plus, sur l'ensemble de la zone transfrontalière, le MNT européen 25 m a été extrait et les axes de ruissellement ont été dérivés en appliquant au préalable l'algorithme de correction des dépressions « Fill ». Ceci permet d'obtenir une information sur les axes de ruissellement sur l'ensemble de la zone transfrontalière contributive augmentée d'un buffer de 2000 m. Ces axes avec une résolution de 25 m ont été classés de la manière suivante :

- Classe 2 : 1-10 ha
- Classe 3 : 10-20 ha
- Classe 4 : 20-50 ha
- Classe 5 : 50-100 ha
- Classe 6 : > 100 ha

La classe 1 (0.5 – 1ha) n'est pas représentée car à la résolution de 25 m elle n'est pas pertinente et induit un bruit important. La Figure 6 montre l'information issue du calcul des axes de ruissellement sur base du MNT 25 m dans la zone transfrontalière contributive.

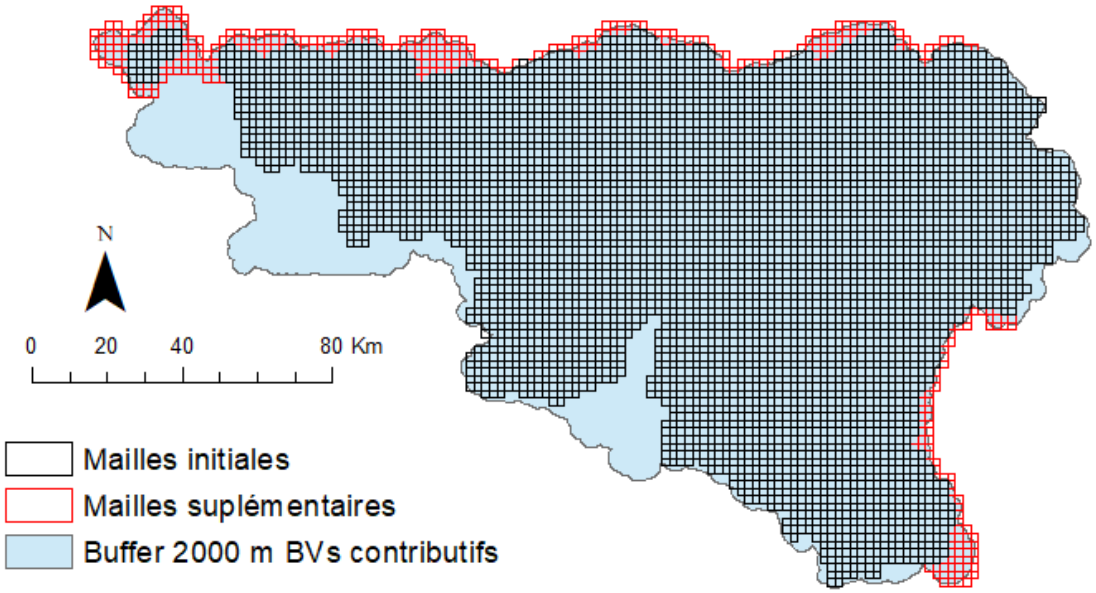


Figure 5 : Nouveau maillage lié à l'intégration des MNTs flamand, luxembourgeois et des Pays-Bas sur les bassins versants contributifs au territoire wallon et augmenté d'un buffer de 2000 m.

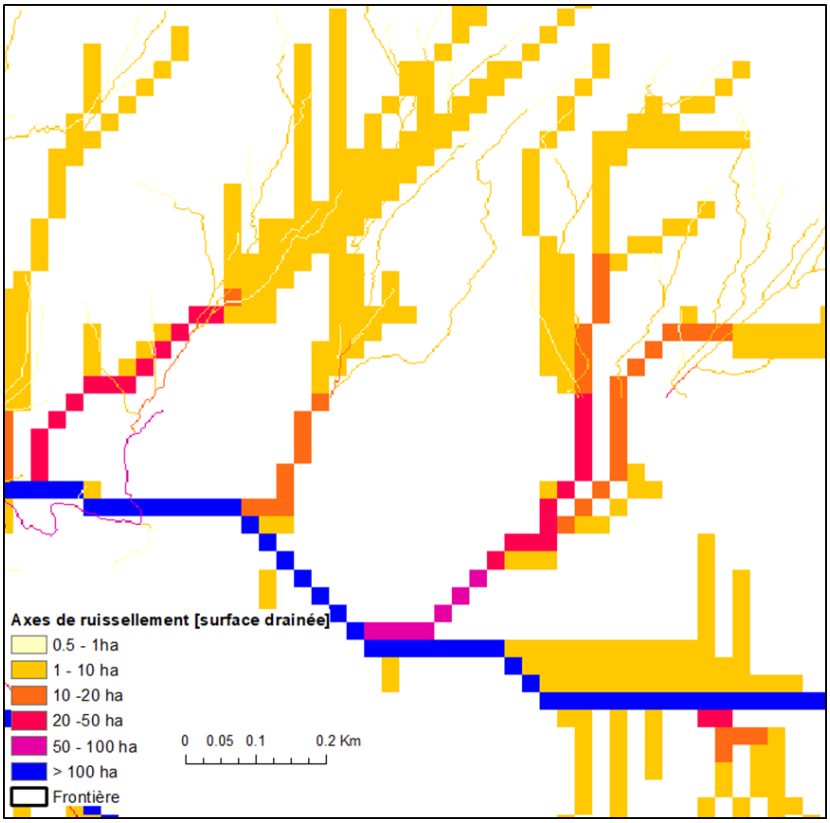


Figure 6 : Axes de ruissellement définis à partir du MNT européen 25 m dans la zone transfrontalière contributive augmentée d'un buffer de 2000 m et superposition avec les axes définis sur base du MNT 1 m agrégé à 2m.

2.1.2.8. Couche d'incertitude sur le positionnement des axes de ruissellement

La couche d'incertitude est issue de la couche d'écoulement à direction multiples obtenue en appliquant l'algorithme GMPD (voir second rapport). Afin d'améliorer cette couche, différentes options ont été testées :

- Appliquer un seuil de convergence pour limiter la divergence au-delà d'une certaine concentration du ruissellement. Cette option permet, dès que le flux atteint le seuil de convergence, d'empêcher les directions d'écoulement et de forcer la convergence à la manière d'un algorithme D8. Après différents essais et discussions avec le Maître d'Ouvrage en réunion technique, cette option n'a pas été retenue.
- Traiter la couche d'incertitude par un filtre : après classification du raster des écoulements GMPD, celui-ci est « tamisé » (gdal_sieve) ce qui permet d'éliminer des groupes de pixels isolés. Ensuite, la couche finale d'incertitude est une combinaison du raster classifié et du raster tamisé. Les pixels ayant une valeur de flux supérieure au seuil de classification et qui ont changé de valeur par le tamisage sont supprimés dans la couche d'incertitude, tandis que les pixels ayant une valeur inférieure au seuil de classification et qui ont changé de valeur par le tamisage sont conservés. Cela évite que l'étape de tamisage par « gdal_sieve » créée des valeurs d'incertitude égale à 1 là où le raster classifié n'indiquait pas de valeur égale à 1. Cette option a finalement été retenue pour créer la couche d'incertitude tamisée. (Figure 7).

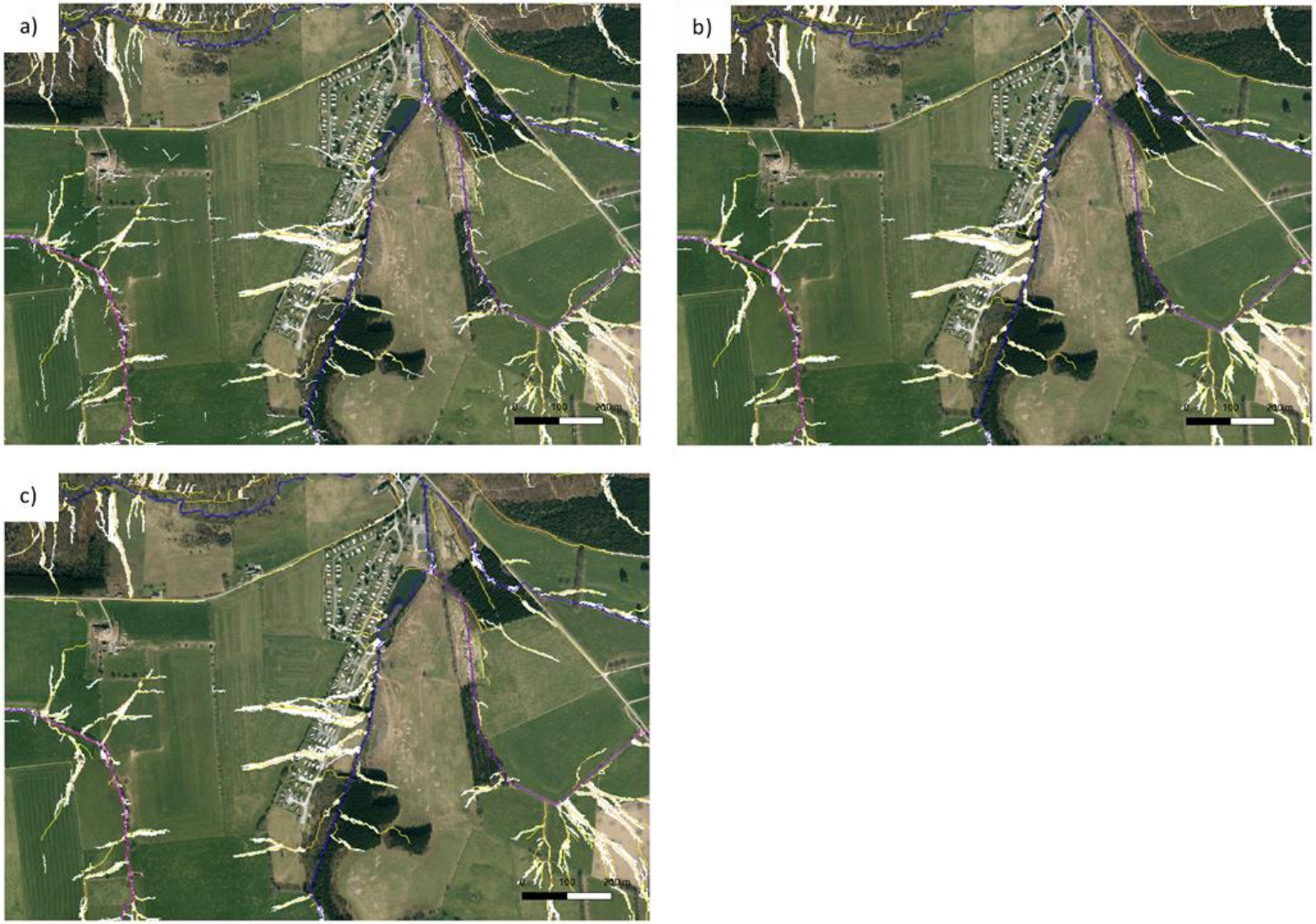


Figure 7 : Vue de la couche d'écoulement multiple GMPD reclassifiée (a), de la couche reclassifiée filtrée (b) et de la couche d'incertitude finale (c).

2.2. Amélioration du réseau hydrographique

2.2.1. Procédure globale de la production de la couche améliorée du RHW

La procédure présentée dans le précédent rapport a été globalement suivie lors de la phase de production, exceptées certaines modifications qui ont dû être apportées (cfr section suivante). La détermination du nouveau réseau hydrographique wallon (RHW) a été conduite uniquement au sein des zones complexes définies par la DCENN. À noter qu'un tampon de 30 m autour de ces zones complexes a été défini. La procédure générale de production du nouveau RHW (rhw_lidaxes) est synthétisée dans la figure suivante :

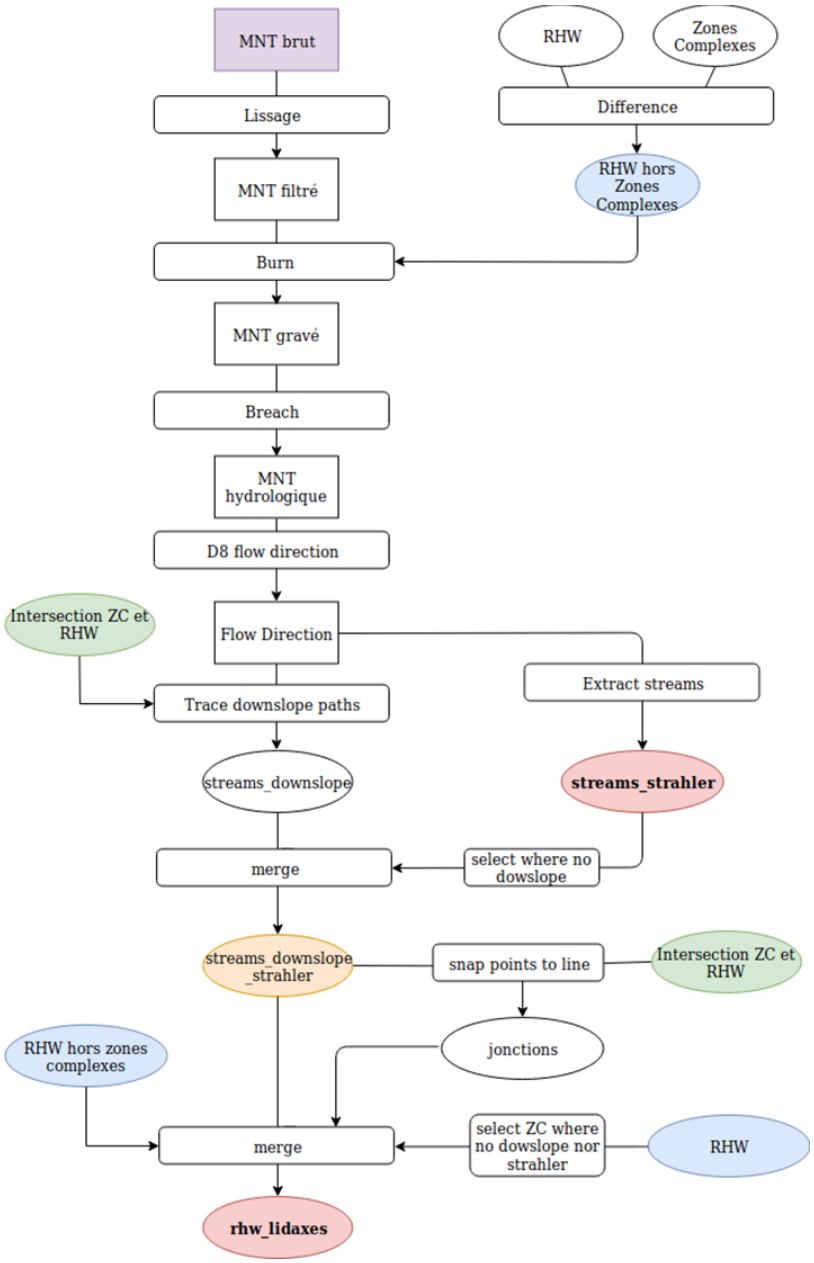


Figure 8 : Procédure globale de création du nouveau RHW. Les boites rectangles représentent des fichiers rasters, les boites ovales des fichiers vectoriels (shp) et les boites à coins arrondis des étapes du processus.

2.2.2. Adaptation de la procédure par rapport au précédent rapport et étapes spécifiques

2.2.2.1. Zone tampon autour des zones complexes

Une zone tampon de 30 m a été considérée autour des zones complexes (ZC) afin d'augmenter leur portée. En effet, les premiers tests ont montré que les écoulements calculés sur base du MNT pouvaient sortir de la ZC s'ils s'éloignaient trop du cours d'eau du RHW actuel. Après plusieurs tests, le choix s'est porté sur une valeur de 30 m. Dans la suite de ce document, lorsqu'il est question de ZC, il s'agit implicitement de la ZC augmentée de la zone tampon sont considérées.

2.2.2.2. Calcul des écoulements dans les zones complexes

Les écoulements ont été calculés de deux méthodes différentes dans les zones complexes à savoir (Figure 9) :

1. par traçage de l'écoulement à partir du point d'entrée amont de la ZC (Trace downslope) ;
2. par traçage libre et création de cours d'eau sur base d'ordre de Strahler.

Trace downslope

La première méthode consiste à utiliser un algorithme qui trace les écoulements à partir du (des) point(s) d'entrée du réseau hydrographique en amont de la ZC. En suivant les valeurs d'altitude du MNT, l'algorithme trace le réseau hydrographique jusqu'à la sortie de la ZC. L'algorithme utilisé est l'algorithme « Trace Downslope » implémenté dans whitebox-tools. Les données d'entrée nécessaires sont les points d'entrée amont et un raster de direction des flux clippé sur la ZC. L'emploi de cette méthode est cependant limité dans le cas des ZC en tête de bassin versant qui n'ont pas de point d'entrée amont dans la ZC (~20%) et pour lesquelles il n'est donc pas possible de reproduire un tracé.

Strahler

Cette seconde consiste à calculer le tracé des écoulements sur l'ensemble de la Wallonie et d'extraire les segments à partir d'un certain ordre de Strahler (min. 3). Ensuite, ce réseau hydrographique déterminé purement grâce au MNT est clippé par les ZC.

Les écoulements sont ensuite combinés afin d'avoir une information complète sur la Wallonie. Les écoulements déterminés à partir des points d'entrée amont (« Trace downslope ») sont tous conservés. Pour les 2019 ZC sur 10489 sans écoulement reproduit par la méthode « Trace downslope » les écoulements ont été déterminés sur base de la méthode « Strahler » (Figure 10). Ces réseaux ont en outre été lissés pour améliorer leur géométrie. Il est à noter que le filtre de lissage utilisé a ajouté ou déplacé des nœuds afin de rendre les courbes plus lisses. Cependant, le lissage a été léger pour éviter d'introduire des artéfacts qui aurait rendu le nouveau réseau hydrographique incohérent avec le MNT dont il est issu. Il est observé qu'en moyenne le déplacement des nœuds par le lissage est de l'ordre de 0.15 m. Enfin, pour certaines ZC (141 sur 10489), aucun écoulement n'a pu être calculé (parce que l'écoulement s'écarte rapidement de la ZC). Dans ce cas, les anciens segments du RHW ont été conservés.

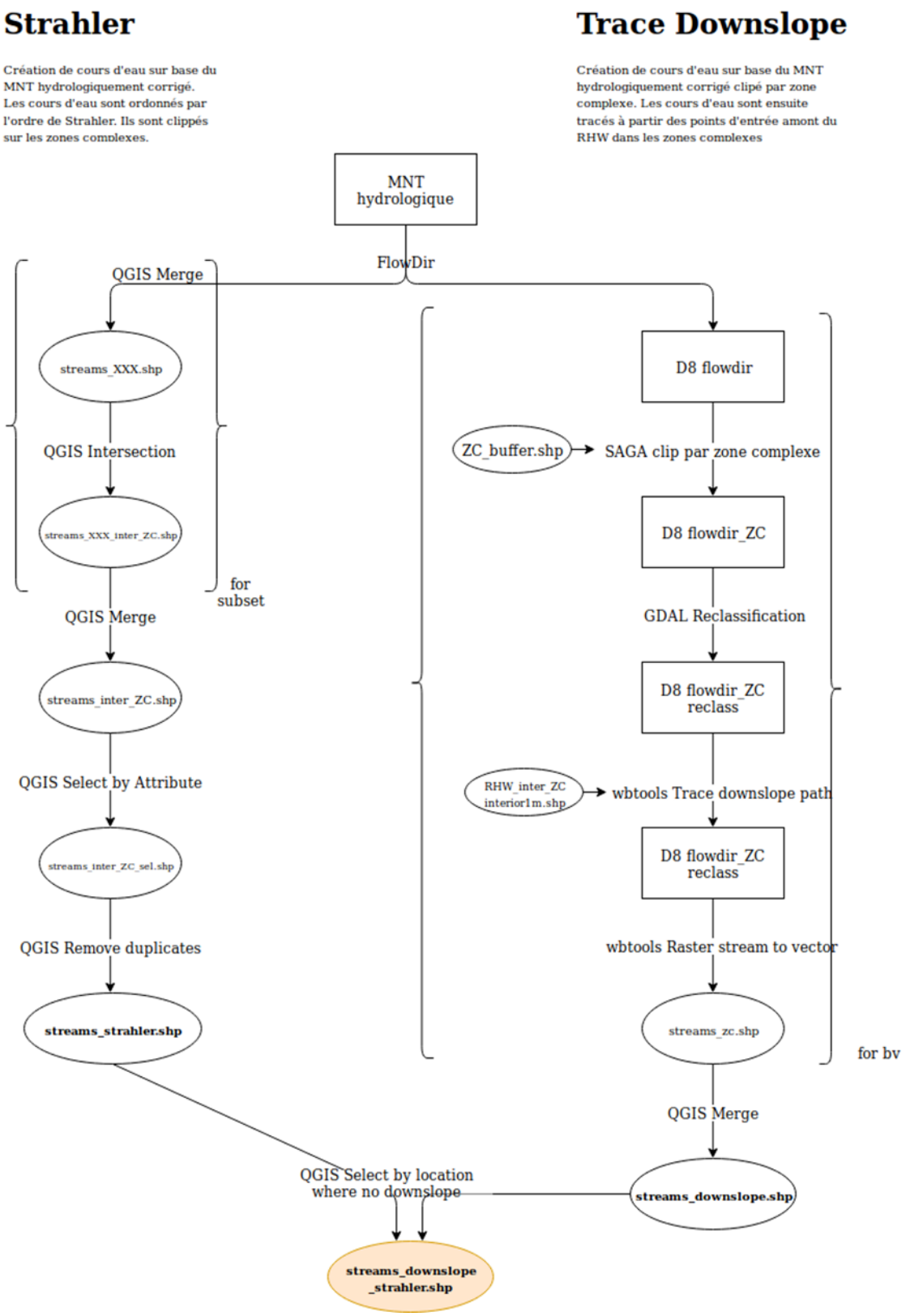


Figure 9 : Schéma des deux méthodes de détermination des écoulements dans les ZC.

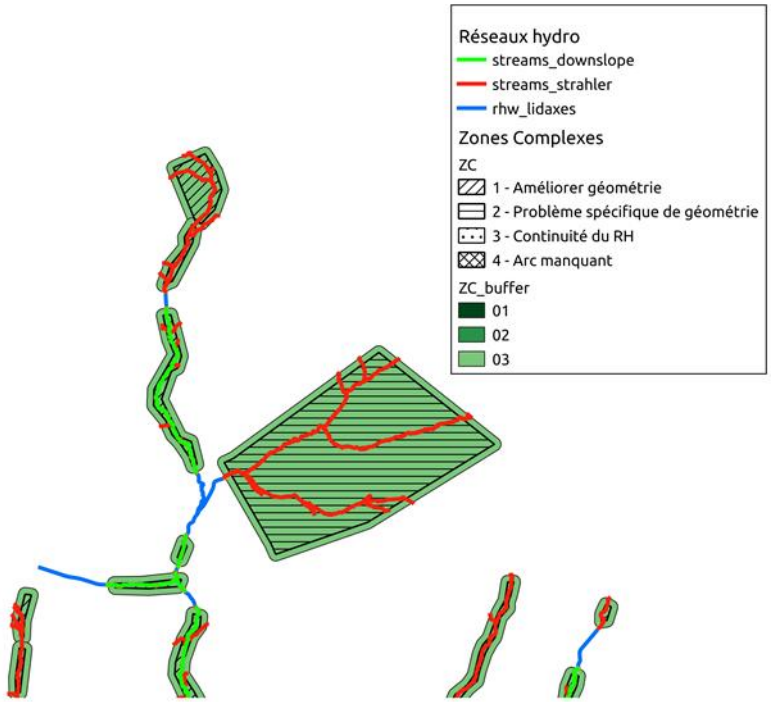


Figure 10 : Vue des réseaux hydrographiques déterminés par la méthode « Trace downslope » (vert) et « Strahler » (rouge) dans les zones complexes.

2.2.2.3. Jonctions entre le nouveau et l'ancien réseau hydrographique

Les segments du réseau hydrographique déterminés à l'intérieur des ZC ne sont pas nécessairement connectés au reste du RHW. En amont des ZC, malgré le fait qu'ils partent du même point, les segments issus de la méthode « Trace downslope » sont déconnectés du RHW de moins de 2m (taille du pixel). En aval, les distances entre la fin du segment dans la ZC et le RHW peuvent être plus importantes. Le schéma de création des jonctions et d'intégration des segments corrigés dans les ZC au RHW est fourni à la Figure 11 .Les jonctions ont notamment été déterminées à l'aide de l'outil « Snap Points to Line » de SAGA via l'interface QGIS où :

- la couche de points (RHW_ZC_pts) correspond à l'entrée/sortie du RHW dans les ZC,
- la couche de segments est la couche des écoulements déterminés à l'intérieur des ZC,
- la distance maximale de recherche est de 200 m.

Il est à noter, qu'après vérification des jonctions d'une longueur de 100 à 200m, 23 jonctions qui tombent en-dehors des ZC ont été éliminées manuellement. Au final, 20289 jonctions ont été intégrées.

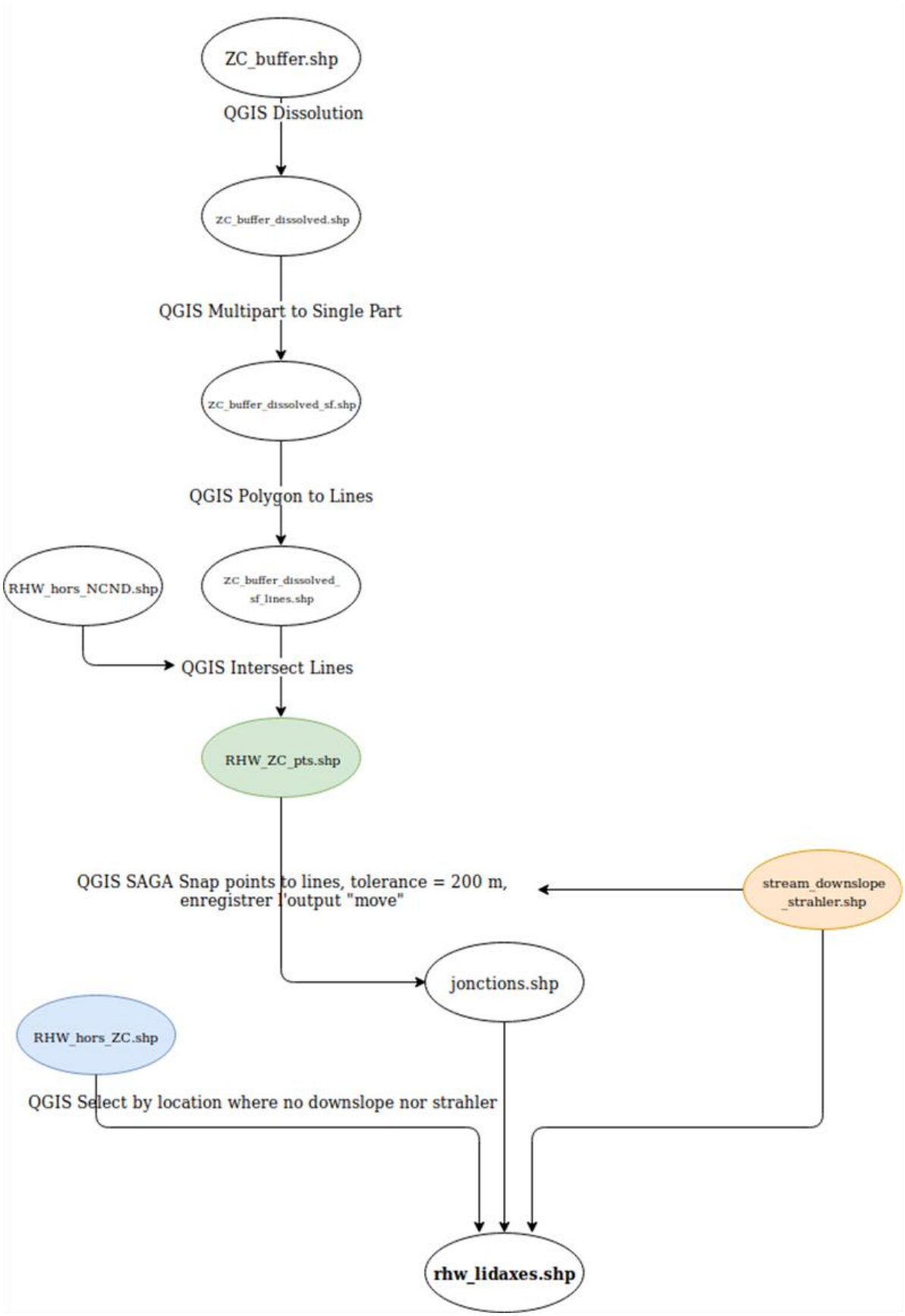


Figure 11 : Schéma de création des jonctions entre le réseau déterminé à l'intérieur des zones complexes et le RHW hors zone complexes.

2.2.2.4. Post-processing

Diverses étapes ont été ensuite effectuées sur le fichier du RHW issu de la fusion du réseau dans les zones complexes, du RHW hors zone complexes et des jonctions à savoir (i) une étape d'auto-snapping permettant d'éliminer de petits artéfacts aux jonctions des zones complexes avec le réseau et(ii) une étape d'élimination des géométries dupliquées. Au final, la couche comprend 187990 éléments.

2.2.2.5. Table d'attributs

Les attributs des nouveaux segments du RHW calculés à l'intérieur des ZC ont été traités spécifiquement. Des valeurs propres aux champs suivants ont été assignées :

- GEOM_SOURC : *LIDAR_DOWNSLOPE, LIDAR_STRAHLER ou LIDAR_M* en fonction de l'origine de la géométrie du segment à savoir respectivement les méthodes « Trace downslope », « Strahler » ou le calcul des jonctions ;
- GEOM_DATE : qui prend la valeur de '2019-03-01' ;
- GEOM_PRECI : qui prend la valeur de 1 (mètre), qui est la précision de la donnée originale (MNT) ;
- ACTUALITE : qui prend la valeur de 1.

Pour les autres attributs, les valeurs des anciens segments du RHW qui traversaient les ZC ont été récupérés en utilisant une jointure spatiale.

2.2.2.6. Détermination du sens d'écoulement

Lorsque l'on détermine le sens des segments du RHW on s'aperçoit qu'ils sont aléatoires et ne renseignent pas sur le sens d'écoulement réel des cours d'eaux. Ceci provient du fait du fait qu'ils n'ont pas été digitalisés en suivant le sens d'écoulement des cours d'eau. Les nouveaux segments déterminés au sein des ZC avec les méthodes « Trace downslope » et « Strahler » ont, quant à eux, un sens correct par rapport au sens d'écoulement des cours d'eau. Pour les autres segments, 2 méthodes successives ont été appliquées afin d'attribuer un sens d'écoulement cohérent avec celui des cours d'eau à savoir (i) une méthode basée sur la différence d'altitude entre le point de départ et de fin du segment et (ii) une méthode basée sur la convergence des segments. Ces deux méthodes ont permis de corriger un grand nombre de segments mal orientés. Cependant il subsiste des segments mal orientés mais nous n'avons pas pu mettre au point de méthode permettant de les identifier de manière certaine. Il est à noter que le sens d'écoulement est défini intrinsèquement dans la géométrie des lignes (ce n'est pas un attribut des segments) et qu'une fois qu'il est correctement déterminé, il peut être affiché par le choix d'une symbologie adéquate, typiquement en utilisant des flèches.

La méthode basée sur la différence d'altitude entre le point de départ et de fin du segment consiste à extraire tout d'abord les points de départ et de fin de segment du RHW. Les altitudes du MNT sont ensuite relevées pour chacun de ces points. On regarde ensuite si l'altitude du point final est bien inférieure à celle du point de départ. Si cela est le cas, les sens d'écoulement est correct, sinon le sens du segment est inversé (Figure 12).

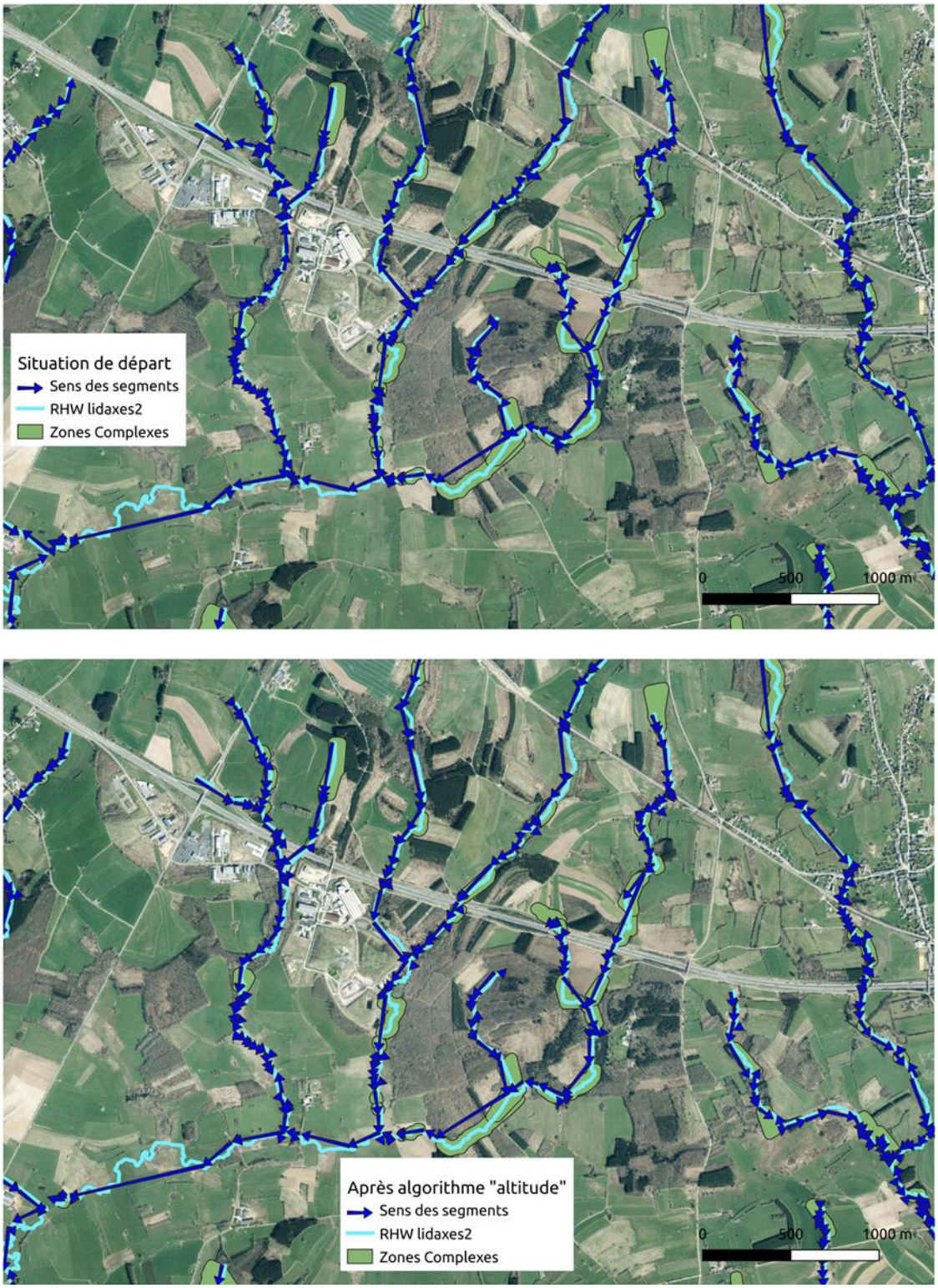


Figure 12 : Vue du sens d'écoulement avant et après correction par l'algorithme basé sur l'altitude

Dans les zones très planes ou alors là où le RHW ne coïncide pas avec le MNT, la méthode basée sur la différence d'altitude ne permet pas de déterminer le sens d'écoulement. La méthode basée sur la convergence des écoulements a donc été utilisée. Cette méthode consiste à regarder pour deux segments qui se suivent si le point final du premier segment est bien le point de départ du second. Si un segment se trouve dans le mauvais sens alors les deux segments vont converger vers le même point d'arrivée (auto-superposition de point d'arrivée) et deux autres segments vont partir du même point de départ (auto-superposition de point de départ). L'algorithme mis au point pour corriger ce problème fonctionne comme suit :

- extraction des points de départ et d'arrivée de chaque segment ;
- sélection par localisation des points de départ et d'arrivée auto-superposants ;
- jointure au RHW des ID de ces points auto-superposants ;
- changement de sens des segments où il y a des points auto-superposants.

Néanmoins, cet algorithme est également limité dans certaines configurations où plusieurs segments avec un mauvais sens se suivent en alternance avec des segments orientés dans le bon sens. Dans ce cas, une partie des segments mal orientés ne peuvent pas être identifiés.

2.2.2.7. Extraction de l'altitude

Les altitudes de départ et d'arrivée de tous les segments du RHW ont été extraites du MNT, puis la moyenne de ces deux altitudes a été calculée. L'altitude du segment est stockée sous le champ "ELEVATION".

3. Description des produits livrés

3.1. Axes de ruissellement concentré

3.1.1. Synthèse des couches produites

Les couches sont livrées dans des répertoires numérotées de 1 à 15 comme indiqué dans le tableau ci-dessous. >Les fichiers rasters sont compressés au maximum, ce qui réduit leur taille de stockage.

	Fichiers	Description	Taille	Format
	FLOW ACCUMULATION			
1	Flowacc_sinks.tif	Couche raster d'accumulation de flux	4.9 Go	Geotiff
2	Flowacc_sinks_rhw.tif	Couche raster d'accumulation de flux s'arrêtant aux cours d'eau	4.8 Go	Geotiff
3	Flowacc_sinks_rhw_berges.tif	Couche raster d'accumulation de flux s'arrêtant aux cours d'eau et aux berges des grands cours d'eau	4.8 Go	Geotiff
	AXES			
4	Axes_r_sinks.tif	Couche raster des axes d'écoulement reclassifiés	131 Mo	Geotiff
5	Axes_r_sinks_rhw.tif	Couche raster des axes d'écoulement reclassifiés s'arrêtant aux cours d'eau	129 Mo	Geotiff
6	Axes_r_sinks_rhw_clip_berges.tif	Couche raster des axes d'écoulement reclassifiés s'arrêtant aux cours d'eau et aux berges des grands cours d'eau.	129 Mo	Geotiff
7	Axes.shp	Couche vectorielle des axes d'écoulement reclassifiés. Issue de Axes_r_sinks.tif	1.5 Go	shp
8	Axes_rhw.shp	Couche vectorielle des axes d'écoulement reclassifiés s'arrêtant aux cours d'eau. Issue de Axes_r_sinks_rhw.tif	1.5 Go	shp
9	Axes_clip_berges.shp	Couche vectorielle des axes d'écoulement reclassifiés s'arrêtant aux cours d'eau et aux berges des grands cours d'eau. Issue de Axes_r_sinks_rhw_clip_berges.tif	1.5 Go	shp
	FLOW DIRECTION			
10	Flowdir_sinks.tif	Couche raster de direction d'écoulement sur base du MNT avec dépressions (MNT_sinks.tif)	1.3 Go	Geotiff
	MNT			
11	MNT_sinks.tif	MNT hydrologiquement corrigé avec dépressions	11 Go	Geotiff
12	MNT_sinks_rhw.tif	MNT hydrologiquement corrigé avec dépressions et sans valeurs dans les cours d'eaux	11 Go	Geotiff
13	MNT_sinks_rhw_berges.tif	MNT hydrologiquement corrigé avec dépressions et sans valeurs dans les cours d'eaux ni entre les berges des grands cours d'eaux.	11 Go	Geotiff
	INCERTITUDE			
14	GMPD.tif	Couche raster d'écoulement diffus	21 Go	Geotiff
15	Incertitude.tif	Couche raster d'incertitude des écoulements		Geotiff
	EXUTOIRES			
16	Exutoires.shp	Couche vectorielle de l'entrée des axes de ruissellement concentré dans le réseau hydrographique	10 Mo	shp

3.1.2. Spécifications des couches produites

Ces spécifications sont écrites au sein des fichiers raster et sont accessibles via la commande « gdalinfo » ou bien lors de leur ouverture dans un logiciel SIG (métadonnées). La plupart de ces spécifications sont exécutés dans le script « formatRaster.py ».

3.1.2.1. Format des rasters

Les rasters ont été produits à partir d'outils GDAL 2.2.3 au format GeoTiff. Les spécifications de ce format par GDAL sont disponibles ici : https://www.gdal.org/frmt_gtiff.html.

3.1.2.2. Géoréférencement

Tous les rasters produits dans le cadre de ce projet ont un système de coordonnées Lambert Belge 1972 (EPSG : 31370) tel que décrit ici : http://epsg.io/31370. L'option « -a_srs EPSG :31370 » a été utilisée pour cela.

3.1.2.3. Compression

Tous les rasters sont comprimés au maximum sans perte de contenu. La compression se fait avec les options suivantes (avec gdal_translate) :

-co COMPRESS=DEFLATE -co PREDICTOR=2 -co ZLEVEL=9

Les rasters sont compressés avec l'algorithme DEFLATE. C'est un algorithme qui n'occasionne aucune perte de contenu ou de qualité. Néanmoins, vu la répétition successive de nombreux pixels (par exemple les pixels avec une valeur nulle dans les rasters d'accumulation de flux ou les valeurs « no data » en dehors du territoire de la Wallonie mais dans l'emprise (bbox) du raster), la compression donne des résultats très intéressants : la taille des fichiers compressés est largement inférieure à celle des fichiers originels. L'option PREDICTOR=2 avec DEFLATE permet de tirer parti de la corrélation spatiale entre les valeurs des pixels, qui est en général importante pour des rasters de modèle numérique de terrain, ainsi que dans une moindre mesure pour des rasters d'accumulation de flux et de direction de flux. L'option ZLEVEL=9 minimise la taille du raster compressé. Des valeurs moins élevées permettraient d'augmenter la vitesse d'écriture et de lecture du raster.

3.1.2.4. Autres spécifications

BIGTIFF = YES : sans compression, les fichiers raster à l'échelle de la Wallonie à 2 m de résolution dépassent la limite de 4 Go. Dans ce cas, ils doivent être créés avec l'option BIGTIFF = YES lorsqu'ils sont compressés ou bien lors d'un mosaïquage car la taille finale du fichier est inconnue lorsque le script de conversion ou bien de mosaïquage commence.

TILED=YES : les rasters créés sont tuilés, ce qui permet d'augmenter les performances d'affichage dans certains cas et réduit leur taille.

NoData : la valeur de NoData est spécifiée avec l'argument « NoData » de gdal_translate. Par exemple, cette valeur vaut 0 pour les rasters d'axes classifiés.

3.2. Réseau hydrographique

3.2.1. Validité du RHW

La validité du RHW final et initial a été vérifiée par la méthode « check validity » de GEOS. Cet outil permet notamment de vérifier si la couche ne présente pas des problèmes d'auto intersections, de duplication de points, etc. Aucune erreur n'a été détectée. Cependant, cela ne permet pas d'affirmer que la couche ne présente aucune erreur topologique propre à un réseau hydrographique (par ex. intersection de cours d'eau ou division de cours d'eau) ou que le sens d'écoulement est cohérent entre les segments.

3.2.2. Description des nouveaux attributs du RHW

Sur les nouveaux segments calculés à l'intérieur des zones complexes, les attributs suivants ont été mis à jour avec les valeurs suivantes.

- GEOM_SOURC : LIDAR_DOWNSLOPE, LIDAR_STRAHLER ou LIDAR_M
- GEOM_DATE : 2019-03-01
- GEOM_PRECI : 1
- ACTUALITE : 1

En outre, le champ « SHAPE_Leng » (longueur des segments) a été recalculé et un champ "ELEVATION" a été ajouté. Ce champ reprend la moyenne des altitudes de chaque extrémité du segment extrait à partir du MNT Lidar 2013, en mètre.

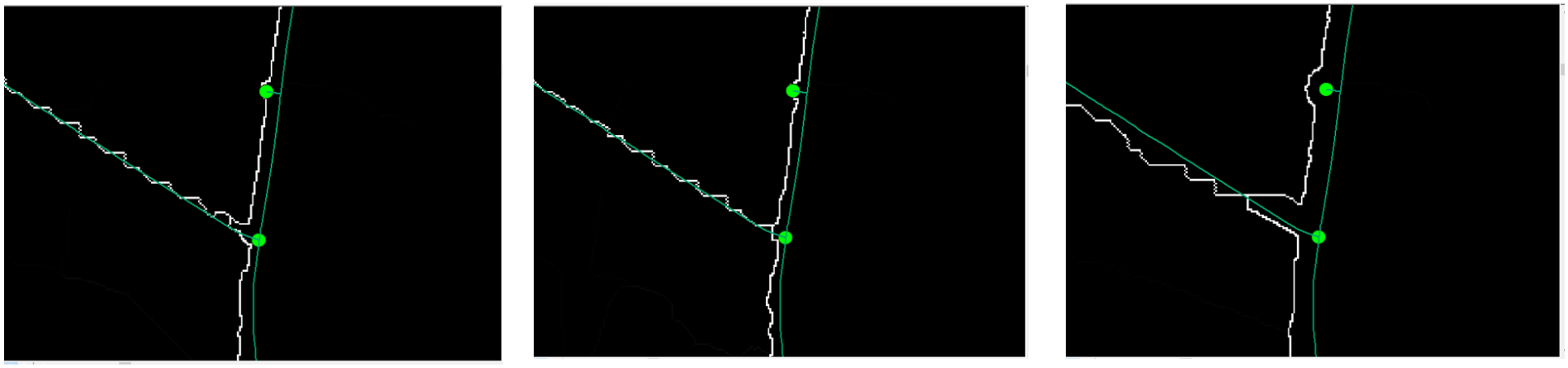
4. Délimitation des bassins versants et des masses d'eau de surface

La convention prévoyait de mettre à jour les masses d'eau de surface (MESU) ainsi que les différents niveaux de bassins versant (BVs) sur base du MNT LiDAR 1 m. Il s'agit notamment des BVs des 6255 secteurs PARIS qui doivent être agrégés pour obtenir les 4 BVs fluviaux (BFL), les 15 BVs des plans de de gestion (BPG), les 25 BVs principaux (BPR) et les 50 BVs sous-principaux (ssPR). L'agrégation des BVs des secteurs PARIS permet aussi de délimiter les MESU (390). Il était également prévu de déterminer les bassins versants des zones de baignade (33), des stations Aqualim (310), des zones d'immersion temporaires (ZIT, 28) ainsi que les bassins versants ORI (344).

4.1. Création d'un MNT hydrologiquement continu dédié au calcul des bassins versant et masses d'eau de surface

Il est nécessaire de pouvoir disposer d'un MNT hydrologiquement continu pour pouvoir délimiter les bassins versants. Le MNT tel qu'il a été traité pour définir les axes de ruissellement ne peut pas être utilisé car il a été décidé de ne pas appliquer l'algorithme « fill » afin de ne pas générer de tracés d'axes improbables notamment pour les zones fortement artificialisées. Ce MNT présente donc des discontinuités incompatibles avec la délimitation des bassins versants. De plus, les cours d'eau n'ont été enfoncés que très superficiellement afin de ne pas influencer le tracé des axes de ruissellement. Dans le cadre de la définition des bassins versant, le réseau hydrographique doit au contraire faire l'objet d'un enfoncement plus important des cours d'eau pour y faire coïncider au maximum les flux de surface modélisés. Pour finir, la nécessité d'assurer la continuité hydrologique du MNT induit également de disposer d'un MNT qui puisse être traité d'un seul bloc par un logiciel SIG.

Ces différentes considérations mettent en avant la nécessité de tester plusieurs paramètres lors de la création du MNT hydrologique. Il s'agit (i) de la résolution du MNT à partir de laquelle ce dernier peut être traité d'un seul bloc par les différents algorithmes hydrologiques en un temps raisonnable tout en fournissant des résultats qualitativement acceptables et (ii) des paramètres d'enfoncement des cours d'eau (profondeur et portée). De nombreux essais ont été effectués quant aux paramètres d'enfoncement des cours d'eau au moyen de la fonction « Burn Streams » de Whitebox GAT. Il est à noter que lors de ces tests, les cours d'eau du RHW ont été enfoncés à l'exception des cours d'eau « Non classés » et « Non définis » comme cela a été le cas dans la partie consacrée au calcul des axes du ruissellement. Il en résulte que si la profondeur d'enfoncement est excessive, cela impacte négativement la localisation des accumulations de flux sur le MNT hydrologique (Figure 13). La Figure 14 illustre également le fait que le coefficient lié à la portée de l'enfoncement est optimal pour une valeur de 1. Lorsqu'on diminue ce coefficient, cela affecte en effet négativement la localisation des accumulations de flux sur le MNT hydrologique. Plusieurs tests ont également été effectués quant à l'impact de la résolution du MNT sur la reproduction des cours d'eau et des accumulations de flux sur les bassins de l'Escaut-Lys et de la Haine. Des agrégations à 2 m, 5 m et 10 m ont notamment été testées. Ces tests mettent en évidence que pour un même enfoncement des cours d'eau la résolution de 2 m est très sensible aux variations d'altitude et ne permet pas toujours de reproduire les cours d'eau même avec un enfoncement important. Certains cours d'eau ont même un sens d'écoulement qui s'inverse. La résolution de 10 m permet de reproduire la plupart des cours d'eau mais induit à certains endroits des simplifications, notamment lorsque certains cours d'eau sont proches en les fusionnant. La résolution de 5 m semble, quant à elle, être un bon compromis entre sensibilité aux variations d'altitude du MNT et la fidélité dans la reproduction hydrographique (Figure 15).



A = 2 m
E = 5 m
D = 1

A = 2 m
E = 10 m
D = 1

A = 2 m
E = 30 m
D = 1

Figure 13 : Illustration de l'impact de la profondeur de l'enfoncement des cours d'eau sur la définition des axes de ruissellement concentré (A = Agrégation, E = profondeur d'enfoncement et D= portée de l'enfoncement). Les lignes vertes représentent le réseau hydrographique, les points verts des limites aval des secteurs PARIS et les lignes blanches les accumulations de flux.

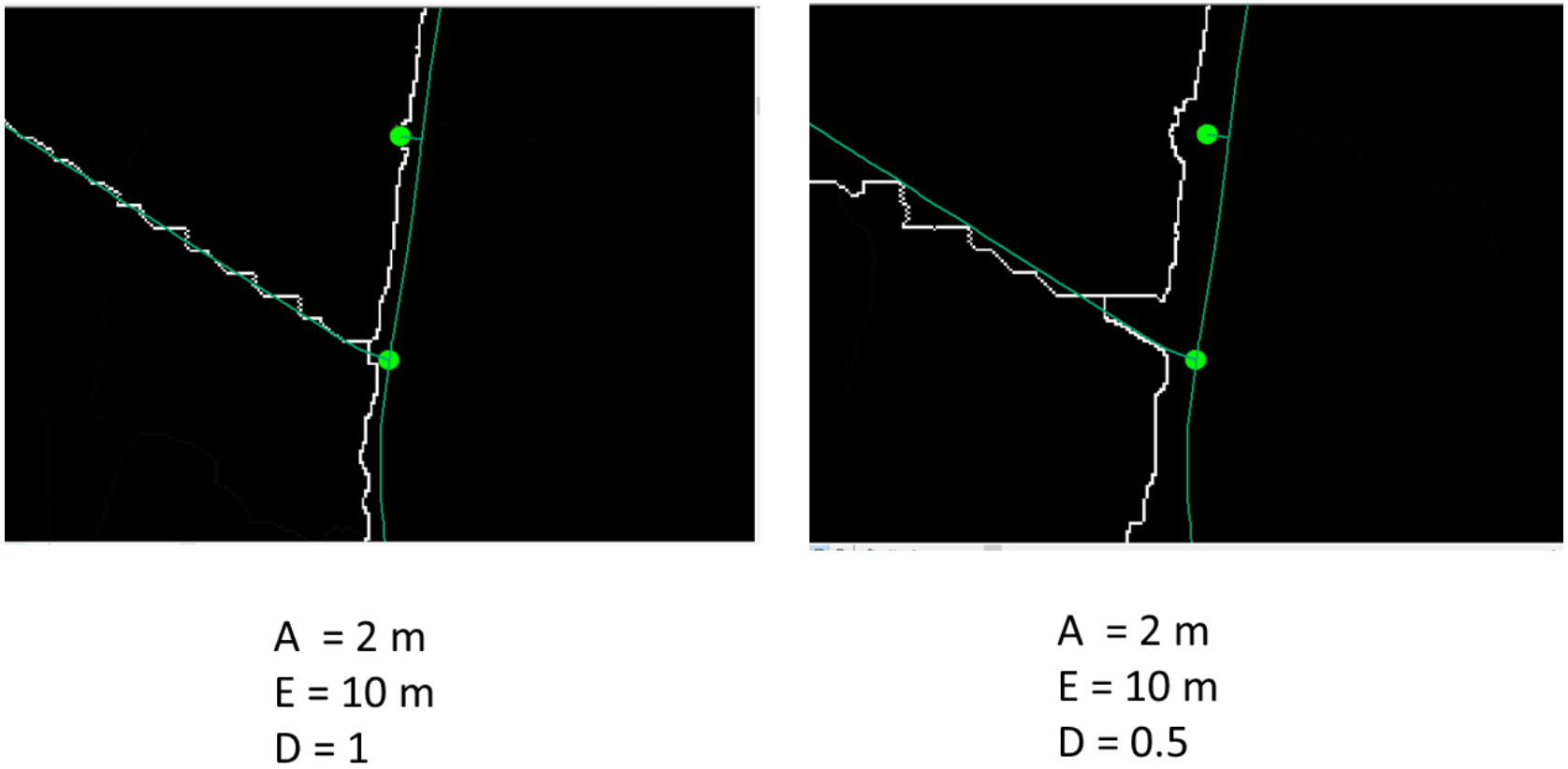


Figure 14 : Illustration de l'impact de la portée de l'enfoncement des cours d'eau sur la définition des axes de ruissellement concentré (A = Agrégation, E = profondeur d'enfoncement et D= portée de l'enfoncement). Les lignes vertes représentent le réseau hydrographique, les points verts des limites aval des secteurs PARIS et les lignes blanches les accumulations de flux.

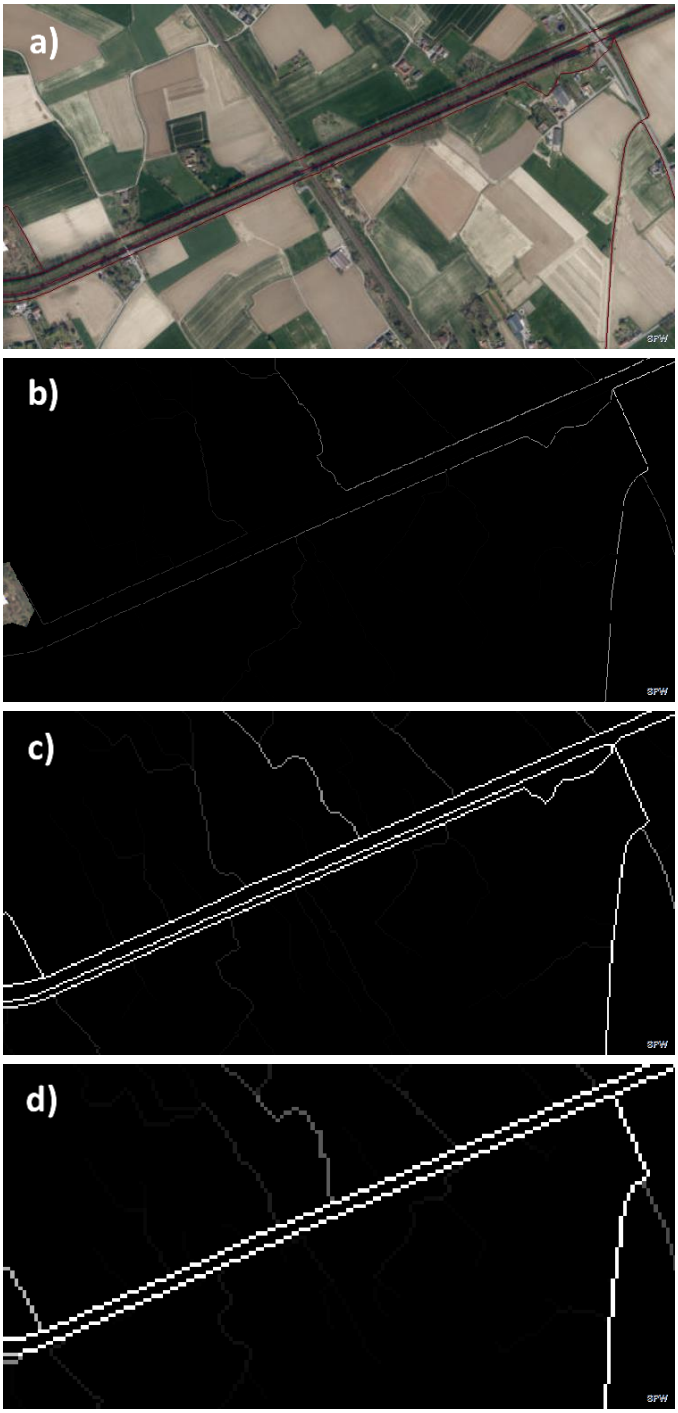


Figure 15 : a) Réseau hydrographique (en rouge) superposé aux orthophotoplans dans la région du Canal de l'Espierres, b), c) et d) sont respectivement les accumulations de flux résultant d'une agrégation à 2 m, 5 m et 10 m et un enfoncement des cours d'eau de 20 m avec un coefficient d'enfoncement de 1. Plus un pixel est blanc, plus la valeur d'accumulation de flux est élevée.

A la résolution de 5 m, les tests d'enfoncement effectués sur les bassins de l'Escaut-Lys et de la Haine montrent que les résultats sont les plus satisfaisants pour une profondeur de 20 m et une portée avec un coefficient de 1. Les différents tests effectués ont également mis en évidence la nécessité de procéder à un enfoncement supplémentaire pour les parties souterraines des cours d'eau renseignées dans la couche vectorielle du RHW avec l'attribut « S » et « V » dans la colonne SAV. De plus, il a été remarqué que bien que le MNT doit renseigner l'altitude des cours d'eau sous les ponts, cela n'est bien souvent pas le cas. Ce dernier renseigne en effet quasiment toujours systématiquement l'altitude au droit du pont et non celle du cours d'eau qui se trouve en dessous. Il a donc été décidé de procéder également à un enfoncement supplémentaire des cours d'eau croisant une route ou une portion de rail définies par le PICC. Les tests d'enfoncement effectués montre qu'un enfoncement exagéré de ces portions de cours d'eau peut induire des biais. Au final un enfoncement supplémentaire de 5 m est donc opéré pour ces portions de cours d'eau ce qui permet d'apporter des améliorations substantielles tout en minimisant les biais.

Après l'agrégation des mailles du MNT à 5 m, la reconstitution d'un MNT en un bloc et l'enfoncement successif de l'ensemble du réseau hydrographique à 20 m avec un coefficient de portée de 1 et un enfoncement supplémentaire à 5 m des parties souterraines des cours d'eau avec un coefficient de portée de 1, l'algorithme fill est appliqué. Lors de l'application du fill, il a été mis en évidence des différences importantes selon que l'on travaille simplement sur l'emprise du MNT LiDAR 1 m ou bien sur cette emprise augmentée des MNTs flamand, luxembourgeois et néerlandais comme c'est le cas pour les axes de ruissellement. Ceci s'explique par le fait que nous ne disposons pas des données de cours d'eau pour les MNTs des régions ou pays voisins. En effet, si un cours d'eau est enfoncé sur la partie wallonne de 20 m, puis poursuit son cheminement au-delà de la frontière là où il n'a pas été enfoncé, alors il en résulte une différence de niveau de 20 m qui est corrigée par le « fill » en défaisant en quelque sorte l'enfoncement opéré (Figure 16). Il a été donc été décidé de définir les bassins versants sur l'étendue initiale du MNT LiDAR 1 m. La Figure 17 résume les opérations ayant permis d'aboutir à la création du MNT hydrologiquement continu et des produits dérivés comme la couche de direction des flux et d'accumulation des flux utiles pour la reconstitution des bassins versant.

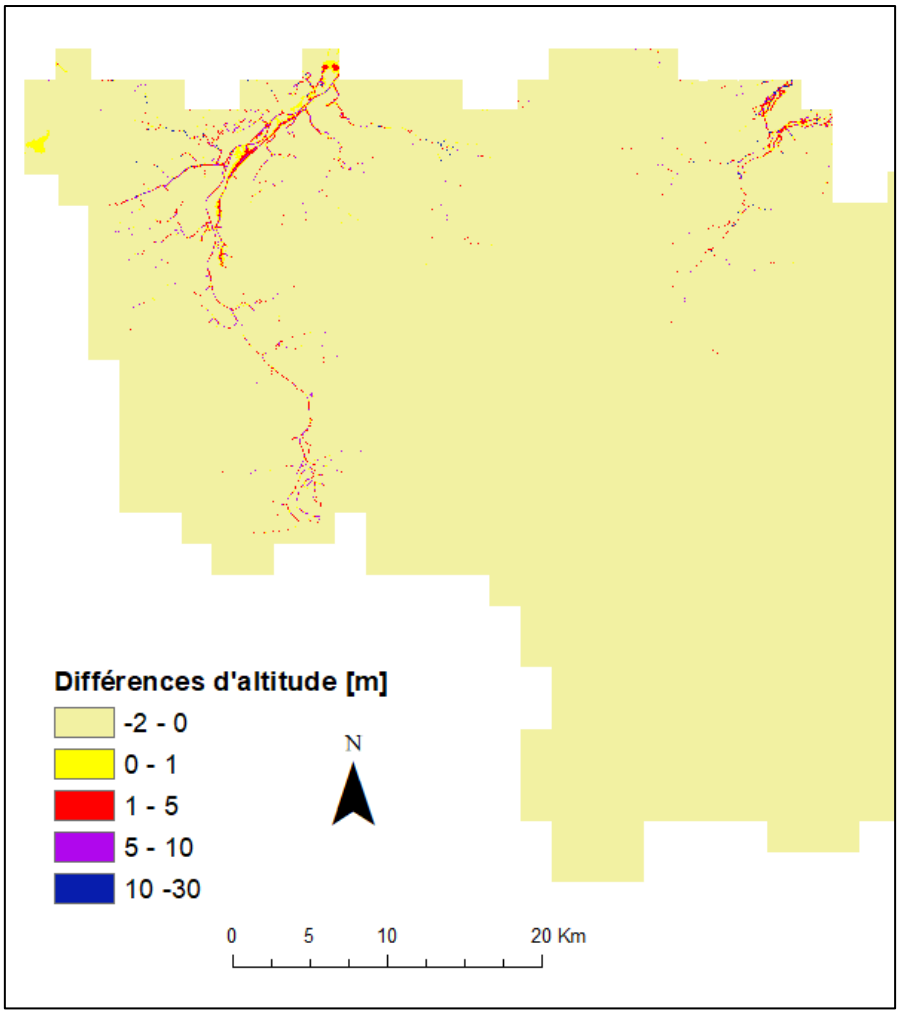


Figure 16 : Différences d'altitudes entre les MNTs « fillés » sur l'étendue du MNT LiDAR 1 m augmentée des MNTs contributifs flamand, luxembourgeois et néerlandais et sur l'étendue initiale du MNT LiDAR 1 m. En l'absence d'enfoncement au-delà des frontières wallonnes, les cours d'eau enfoncés qui sortent de Wallonie comme l'Escaut et les cours d'eau secondaires sont négativement affectés

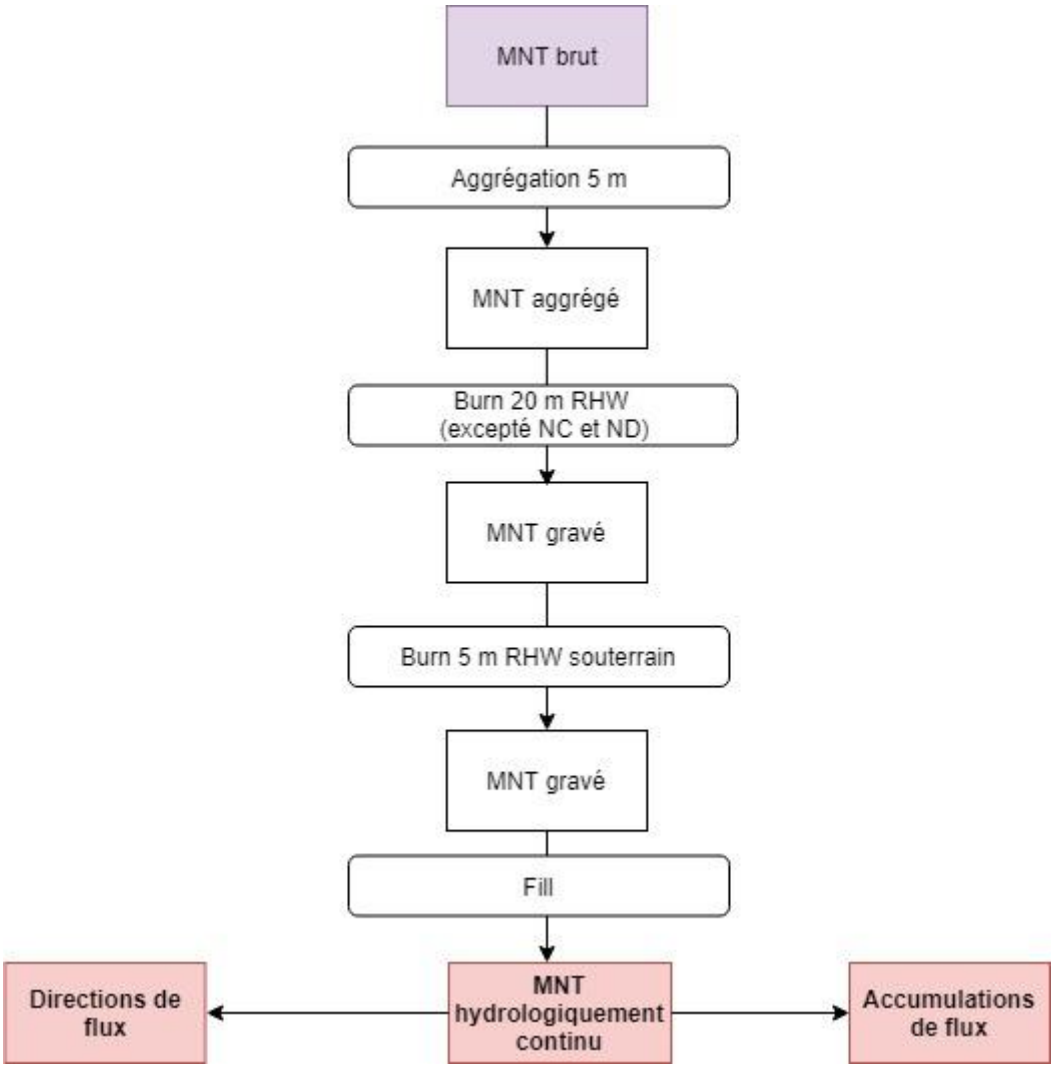


Figure 17 : Opérations ayant permis d'aboutir au MNT hydrologiquement continu et aux produits dérivés pour la délimitation des bassins versant

4.2. Délimitation des bassins versant des secteurs PARIS

Une procédure automatisée a été mise au point pour recaler automatiquement la plus grande partie des 6690 limites aval des 6255 secteurs PARIS. Cette procédure a été calibrée et validée sur les BPGs de l'Escaut-Lys et de la Haine. Elle permet de replacer environ 91 % des limites aval sur une valeur d'accumulation de flux d'au moins 10 ha à une distance de 55 m au maximum. Cette procédure fait intervenir plusieurs étapes. Les limites aval sont tout d'abord recalées 30 m en amont sur le secteur qui porte le même nom. Ceci peut démultiplier certaines limites aval car un secteur qui présente différentes branches se rejoignant se voit attribuer une limite aval par branche (Figure 18). On passe donc de 6690 limites aval à 7147.

Figure 18 : Illustration d'un cas de démultiplication d'une limite aval d'un secteur PARIS (lignes bleues). A) Le secteur « EsLys224 » présente deux branches se rejoignant à la limite aval (point bleu). B) Lors du recalage automatisé des limites aval, ces dernières sont replacées sur les secteurs du même nom en les déplaçant de 30 m vers l'amont. Ceci aboutit dans ce cas à l'attribution d'une limite aval « EsLys224 » sur chacune des branches du secteur « EsLys224 » (points verts).

Dans un second temps, la valeur d'accumulation de flux maximum est recherchée dans un rayon de 5 m à partir des limites aval déplacées de 30 m vers l'amont sur les secteurs PARIS. Cette méthode permet de gérer les problèmes d'intersection entre secteur PARIS en réallouant la limite aval au bon secteur et en replaçant la limite sur la valeur d'accumulation de flux modélisé la plus pertinente dans un environnement proche. Suite à ces opérations, les limites aval qui se situent sur une valeur d'accumulation de flux d'au moins 10 ha sont considérées comme recalées. Il s'agit de 5716 limites aval (80%). La certitude associée à leur positionnement est élevée puisque la valeur d'accumulation de flux correspondant à la limite aval du secteur se situe à un pixel ou moins du secteur. Si la valeur d'accumulation de flux est inférieure à 10 ha alors les limites aval ne sont pas considérées comme recalées et la valeur maximale d'accumulation de flux a été recherchée dans un rayon de 25 m. Si les limites aval se situent sur une valeur d'accumulation de flux d'au moins 10 ha alors elles sont considérées comme recalées. Il s'agit de 790 limites aval soit environ 55% des limites non recalées en première instance. La certitude associée à leur positionnement est cependant moindre que pour les limites aval recalées en première instance. La Figure 19 illustre le recalage de limites aval pour la procédure automatisée décrite ci-dessus.

Les limites aval qui se situent sur une valeur d'accumulation de flux inférieure à 10 ha ne sont pas considérées comme correctes et doivent être recalées manuellement. Il s'agit de 640 limites aval soit environ 9% des 7147 limites aval d'origine. Ces 640 limites aval ont été passées en revue et 395 ont pu être recalées soit 62%. Néanmoins, ces recalages ont pu faire l'objet d'une certaine subjectivité et il est nécessaire qu'un expert de la DCENN valide les choix de recalage opérés. Pour les 245 limites aval non recalées, 91 sont liées à des dédoublements de cours d'eau et ne doivent à priori pas faire l'objet d'un travail en particulier. Ces limites aval présentent en effet un doublon qui est recalé de manière correcte à savoir sur la branche du cours qui correspond à l'accumulation de flux maximale et qui permet la reconstitution du bassin versant du secteur PARIS. Il y a également 122 limites aval qui n'ont pas pu être recalées en raison de l'absence d'accumulation de flux ou de situations ambiguës avec la présence de plusieurs accumulations de flux. Pour finir 32 cas montrent une inversion du sens d'écoulement par rapport à ce qui était attendu sur base du positionnement des limites aval. Ces cas doivent être l'objet d'une expertise de la part d'un agent de la DCENN. Il est également à noter que bien 91% des limites aval sont recalées avec une certitude assez élevée, il est souhaitable qu'elles soient validées par un expert de la DCENN. Nous attirons particulièrement l'attention sur les limites aval le long des voies navigables qui présentent souvent des situations ambigües.

Après vérification par les agents de la DCENN des limites aval recalées, il a été demandé de rapprocher au plus les limites aval recalées du point initial fourni. Dans de nombreux cas en effet, le point initial se situe déjà sur un axe bien défini et a été remonté à 30 m en amont ce qui n'est pas toujours judicieux. Il s'agit notamment des points recalés en première instance. Ce problème a été résolu en grande partie par un traitement automatique supplémentaire spécifique pour ces exutoires. Un autre problème soulevé est le dédoublement des points lorsqu'un secteur possède plusieurs tronçons se rejoignant à une limite aval commune. Ce dédoublement génère des bassins avec des formes parfois bizarres en aval. Ce problème a été solutionné pour la plupart des cas (80%) par une méthode semi-automatique permettant de ne garder qu'une seule limite aval au plus proche de la limite initiale. Les 20% restants non solutionnés correspondent à des cas ambigus.

La couche des limites aval recalées remise au Maître d'ouvrage (Exutoires_sectorisation_recales_v3.shp) reprend dans sa table attributaire un champ « Round » qui indique si la limite aval a été recalée en première (1) ou seconde instance (2) ainsi qu'un champ « MAX » qui reprend la valeur d'accumulation de flux après le recalage automatisé. Les limites aval avec une valeur de 2 dans le champ « Round » et avec une valeur inférieure à 4000 (10 ha) dans le champ « MAX » sont les limites qui ont été passées en revue. Le champ « Modif » indique pour ces limites si elles ont pu être recalées (O), si elles sont liées à un dédoublement de cours d'eau (D), si elles n'ont pu être recalées en raison d'une ambiguïté (A) ou bien d'une inversion du sens d'écoulement (I).

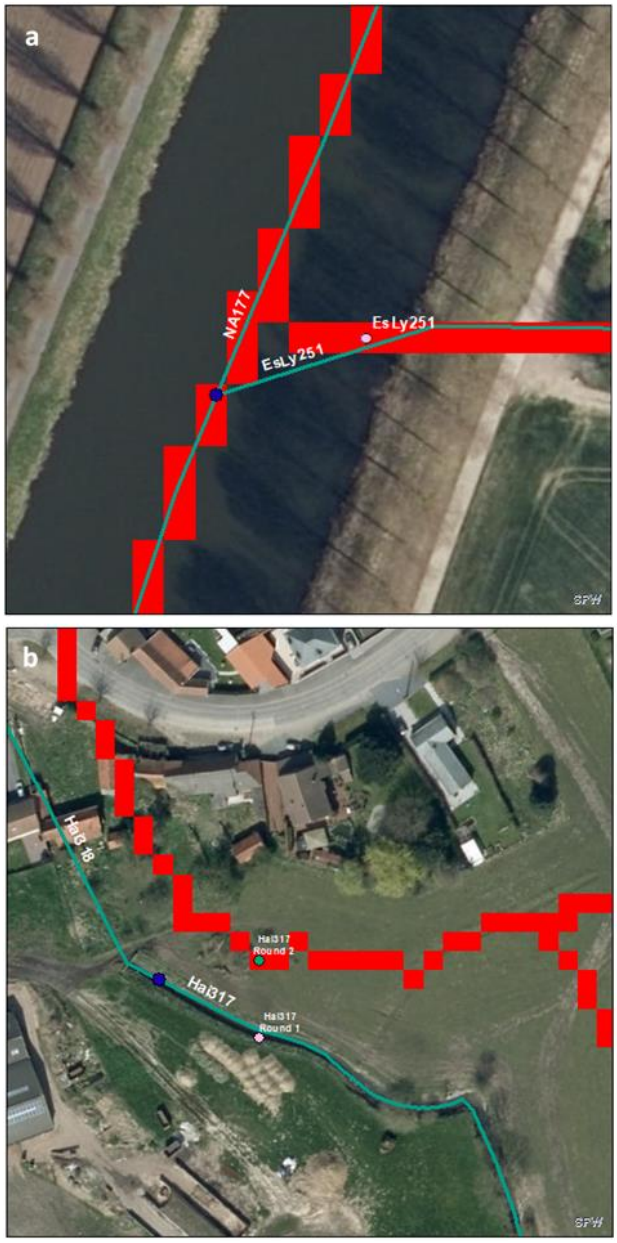


Figure 19 : a) Recalage automatisé de la limite aval « EsLys251 » (point bleu) en un « round ». La limite aval qui avait été remontée de 30 m sur le secteur « EsLys251 » (ligne bleue) a été déplacée sur la valeur d'accumulation de flux maximum d'au moins 10 ha (pixels rouges) dans un rayon de 5 m. Le point rose constituera donc l'exutoire du bassin versant du secteur « EsLys251 ». b) Recalage en 2 « rounds » de la limite aval du secteur « Hai317 ». Le premier « round » aboutit au point rose qui ne se trouve pas sur une valeur d'accumulation de flux d'au moins 10 ha. Le second « round » (point vert) permet de localiser la limite aval sur une valeur de flux d'au moins 10 ha car le rayon de recherche est augmenté à 25 m.

Comme ces limites aval nécessitent encore un travail de validation de la part des experts de la DCENN et qu'elles sont susceptibles d'être modifiées, il a été décidé de mettre au point une Toolbox ArcGIS qui permettra aux agents de la DCENN (i) de reconstituer automatiquement les bassins versants des secteurs PARIS et (ii) de les agréger aux niveaux supérieurs ainsi qu'en MESU (Figure 20). Pour pouvoir reconstituer les BVs des secteurs PARIS, l'opérateur doit, une fois qu'il a recalé correctement les 7147 limites aval, déterminer avec la fonction « Watershed » d'ArcGIS les 7147 bassins versants liés à ces limites aval en renseignant le champ « ID_LID » comme « Input raster or feature point data ». Le champ « ID_LID » reprend pour chacune des limites aval un identifiant unique. Une fois que ces BVs sont créés alors l'outil « Délimitation BVs sectorisation » de la Toolbox « Délimitation BVs secteurs PARIS, niveaux supérieurs et MESU.tbx » peut être utilisé. Cet outil nécessite comme donnée d'entrée : (i) le répertoire dans lequel l'opérateur souhaite stocker les résultats, (ii) les bassins versants définis au préalable sur base de l'identifiant « ID_LID », (iii) la table de reclassification vers les BVs de la sectorisation fournie (Table_Agregation_BVs_exutoires_uniques_to_BVs_sectorisation.dbf) et (iv) les limites administratives wallonnes (Figure 21).

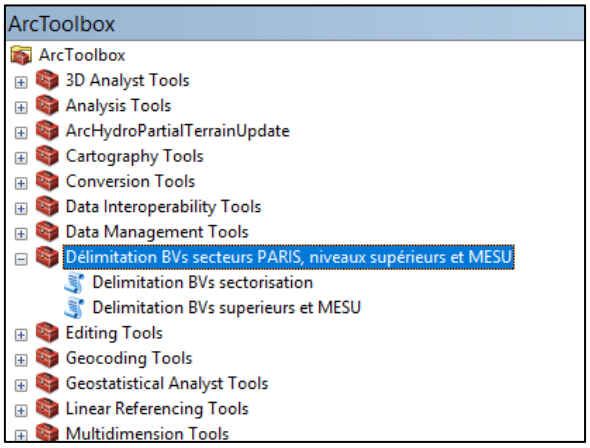


Figure 20: Toolbox "Délimitation BVs secteurs PARIS, niveaux supérieurs et MESU" comportant deux outils permettant (i) de reconstituer les BVs des secteurs PARIS et (ii) de les agréger pour déterminer les BVs des niveaux supérieurs et les MESU

Un secteur pouvant présenter plusieurs limites aval, la table de reclassification (Table_Agregation_BVs_exutoires_uniques_to_BVs_sectorisation.dbf)) permet de regrouper les limites aval qui possèdent chacune un « ID_LID » unique selon un « ID_BV » commun correspondant à un secteur PARIS. Il est donc à noter que si lors de la validation des limites aval des secteurs PARIS, il s'avère nécessaire de créer l'une ou l'autre limite supplémentaire, cette dernière doit se voir attribuer un identifiant unique « ID_LID » et que ce dernier doit être lié à un « ID_BV » dans la table de reclassification. Les limites administratives wallonnes permettent de redécouper les bassins versants selon l'emprise de la Wallonie. Au final l'outil crée une gdb « BVs sectorisation » dans le répertoire de travail renseigné et y stocke les BVs sous forme simplifiée et non simplifiée et pour chacune des formes sur l'étendue du domaine calcul ou bien sur l'étendue de la Wallonie seulement. Chaque couche vectorielle comporte une table attributaire dans laquelle est stockée le nom du secteur pour les différents bassins versant. En l'état actuel du recalage des limites aval des secteurs PARIS, cet outil a permis d'aboutir à la création de 6237 bassins versant sur 6255 attendus du fait des problèmes d'inversion de sens d'écoulement sur certaines portions du territoire (Figure 22).

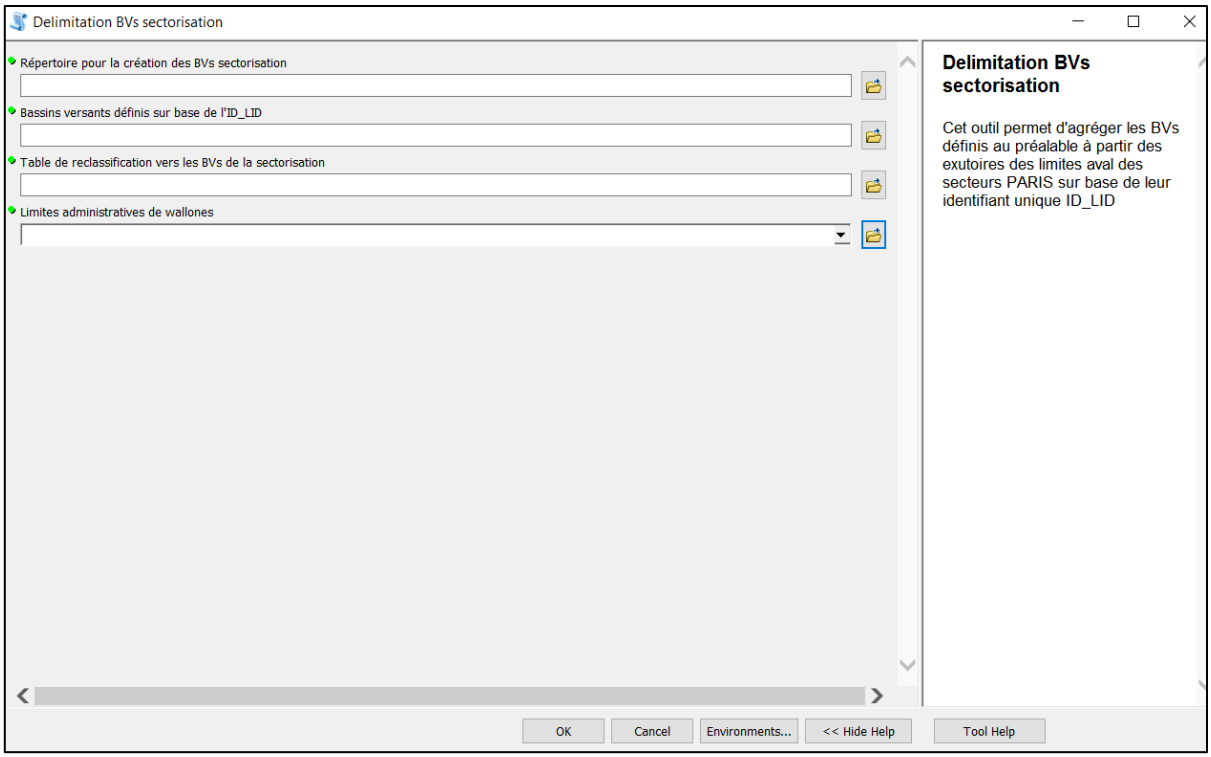


Figure 21 : Outil "Délimitation BVs sectorisation" de la Toolbox "Délimitation BVs secteurs PARIS, niveaux supérieurs et MESU"

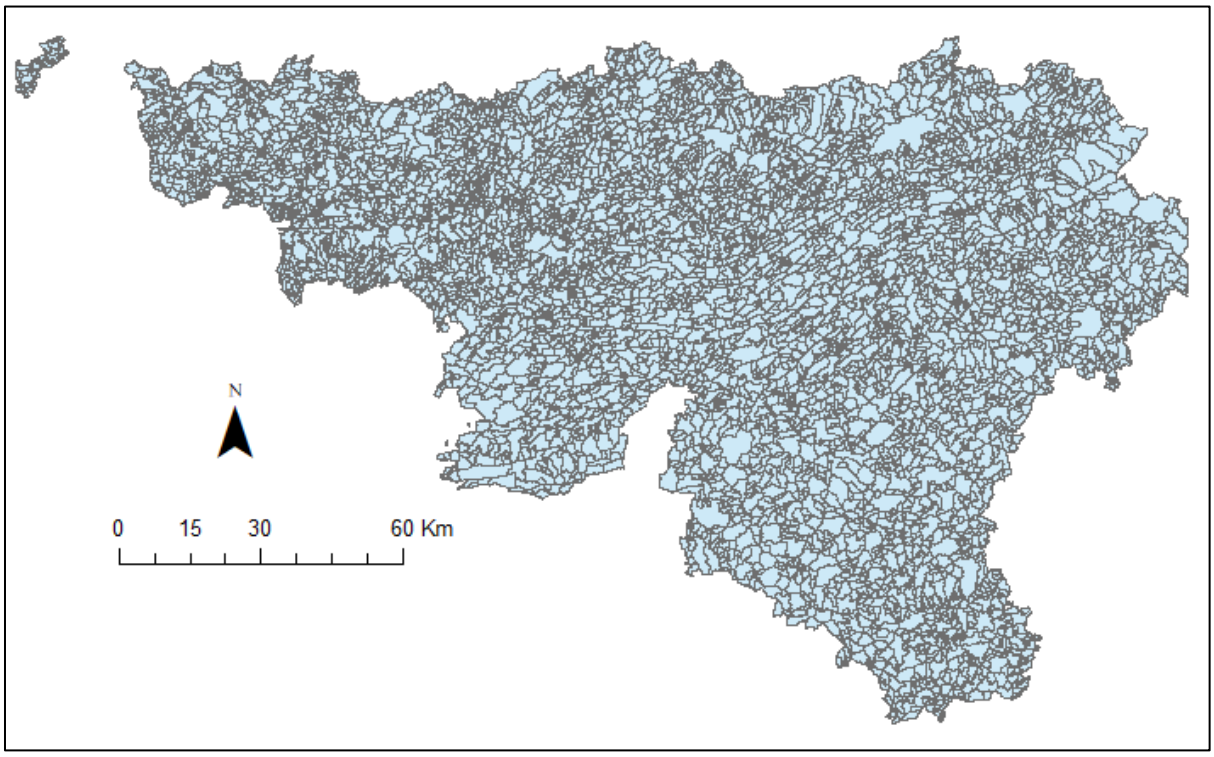


Figure 22 : BVs des secteurs PARIS issus de l'outil "Délimitation BVs sectorisation" de la Toolbox "Délimitation BVs secteurs PARIS, niveaux supérieurs et MESU".

4.3. Agrégation des bassins versant des secteurs PARIS aux niveaux supérieurs et en masses d'eau de surface

Il a été demandé par le Maître d'ouvrage de reconstituer les BVs supérieurs et MESU par agrégation des BVs des secteurs PARIS définis préalablement. Pour cela, nous avons identifiés pour chaque secteur PARIS son appartenance aux BFL, BPG, BPR, ssPR et MESU sur base des anciennes couches mises à disposition. Ceci a permis d'aboutir à une table de reclassification (Table_Agregation_BVs_Secto_to_other_BVs_and_MESU.dbf) qui fait le lien entre chaque BVs de la sectorisation et le niveau supérieur ou la MESU. L'outil « Délimitation BVs supérieurs et MESU » de la Toolbox « Délimitation BVs secteurs PARIS, niveaux supérieurs et MESU» permet de générer automatiquement les BVs supérieurs et les MESU sur base de cette table et des BVs des secteurs PARIS définis préalablement au moyen de l'outil « Délimitation BVs sectorisation » (Figure 23). Il est à noter que pour les bassins supérieurs, l'outil génère une gdb « Bassins » pour stocker les couches vectorielles des BFL, BPG, BPR et ssPR au format simplifié et non simplifié et « clippé » ou non sur la Wallonie. Pour chacune de ces couches, une table attributaire reprend le nom des bassins. Une couche raster est également fournie pour chaque niveau de bassin et le lien entre la valeur renseignée et le nom du bassin peut être retrouvé dans la table de reclassification fournie. Une gdb « MESU » est également créée pour stocker les couches vectorielles des MESU simplifiées ou non et « clippées » ou non sur la Wallonie. La table attributaire de ces couches reprend pour chaque MESU le code wallon de la masse d'eau. La couche au format raster est également fournie. Il est à noter que si un changement doit être effectué concernant la reclassification d'un BV d'un secteur PARIS, il suffit de modifier son appartenance au niveau des bassins supérieurs ou de la MESU dans la table de reclassification. En l'état actuel, les couches de BFL, BPG, BPR, ssPR et MESU ont été reconstituées à partir de l'outil mis au point (Figure 24). Il est à noter que ces couches sont partiellement fausses du fait de l'incertitude sur le positionnement de certaines limites aval de secteur PARIS. De plus, certaines portions du territoire sont manquantes car elles ne comportent pas de limite aval de secteur PARIS et de fait aucun BV ne peut y être reconstitué.

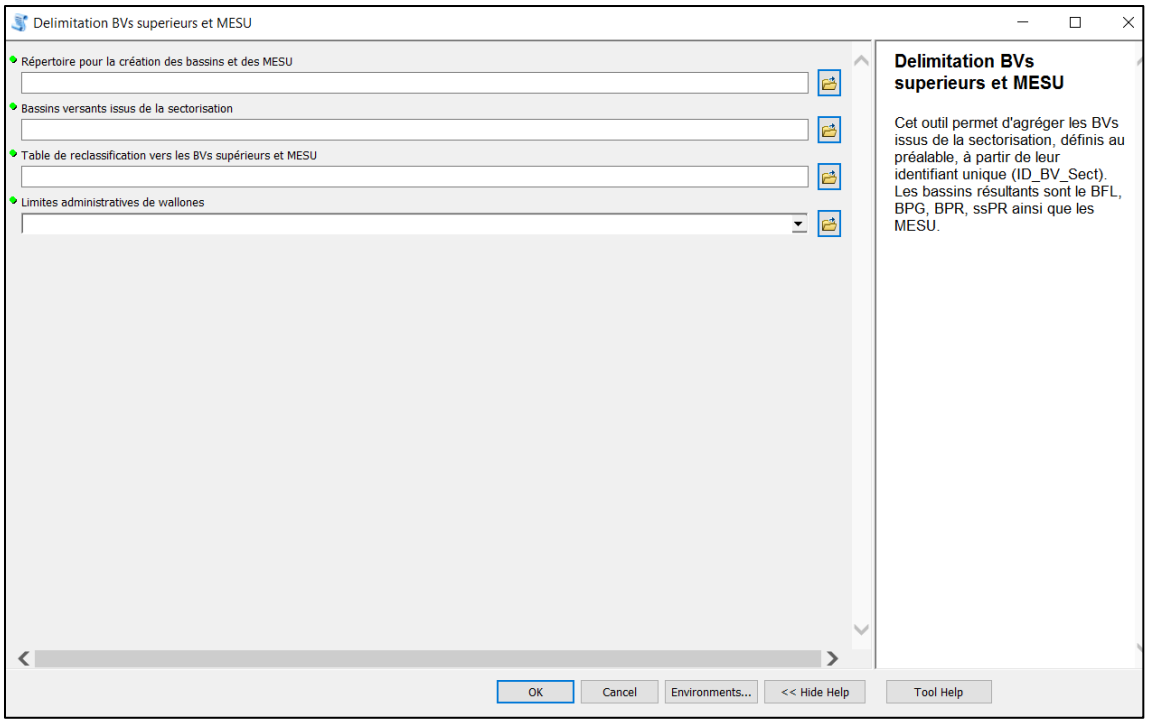


Figure 23 : Outil "Délimitation BVs supérieurs et MESU" de la Toolbox "Délimitation BVs secteurs PARIS, niveaux supérieurs et MESU". Cet outil nécessite comme donnée d'entrée : (i) le répertoire dans lequel l'opérateur souhaite stocker les résultats, (ii) les bassins versants de la sectorisation issus de l'outil "Délimitation BVs sectorisation" définis au préalable, (iii) la table de reclassification vers les niveaux supérieurs et les MESU fournie (Table_Agregation_BVs_Secto_to_other_BVs_and_MESU.dbf) et (iv) les limites administratives wallonnes.

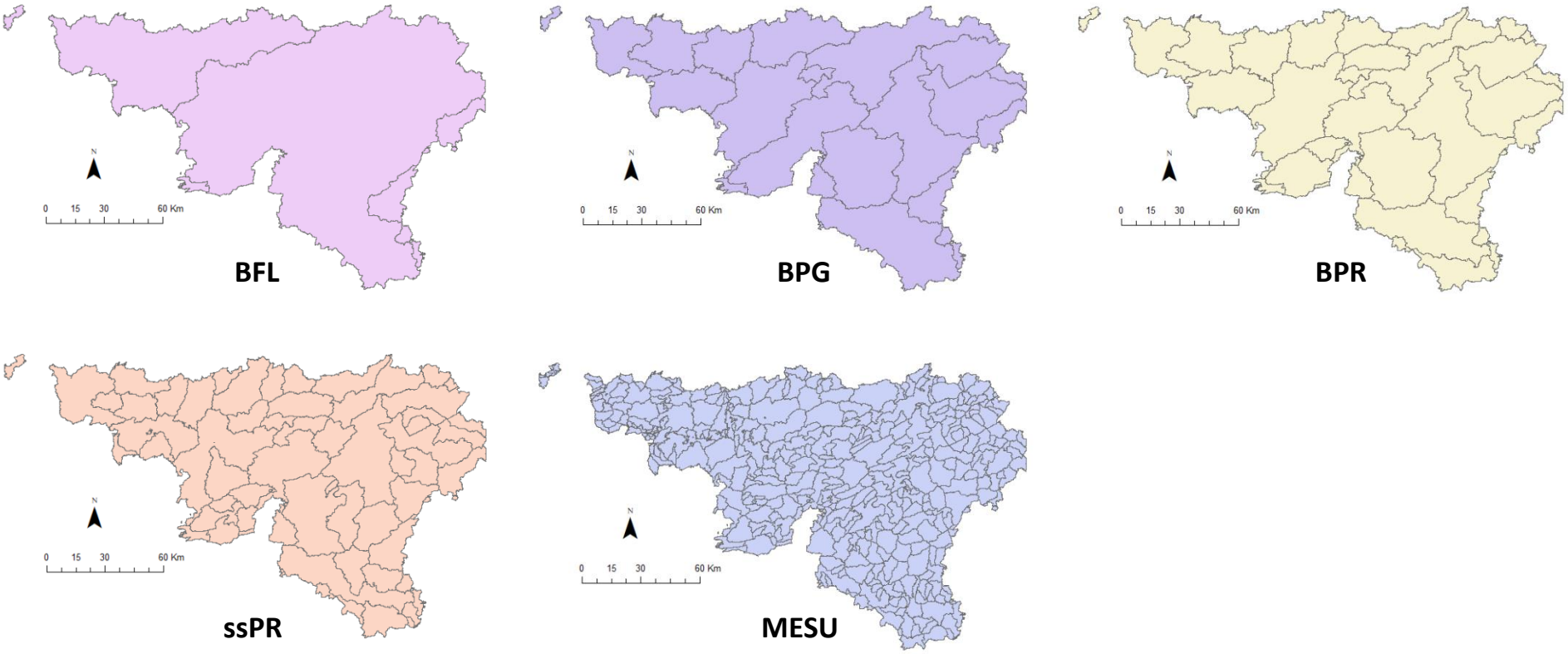


Figure 24 : Reconstitution des BFL, BPG, BPR, ssPR et MESU par agrégation des BVs des secteurs PARIS au moyen de l'outil « Délimitation BVs supérieurs et MESU » de la Toolbox « Délimitation BVs secteurs PARIS, niveaux supérieurs et MESU ».

4.4. Délimitation des bassins versant des stations Aqualim, des zones d'immersion temporaires, des zones de baignade et ORI

Les coordonnées des exutoires des ZITs et des stations Aqualim ont été fournies par le Maître d'ouvrage. Les exutoires ont été recalées manuellement sur les valeurs d'accumulation de flux les plus élevées à proximité. Concernant les zones de baignage, un shapefile de points a été remis pour permettre de les localiser et ces derniers ont également été recalés sur la valeur d'accumulation de flux la plus pertinente à proximité. Les bassins versants individuels ont ensuite été calculés pour les ZITs, les stations Aqualim et les zones de baignade puis ils ont été regroupés en une couche vectorielle unique respectivement stockée dans une gdb nommée « BVs_ZIT », « BVs_Stations_Aqualim » et « BVs_Zones_de_baignade ». Il subsiste toutefois des cas où les BVs semblent problématiques du fait d'une absence d'accumulation de flux en surface, d'une ambigüité sur la localisation du réseau de drainage en surface, de doublons, de coordonnées trop peu précises ou de bassins versants à la limite du domaine de calcul. La liste des bassins versants demandant une attention particulière est fournie en annexe (Annexe 6).

Une Toolbox ArcGIS nommée « Délimitation BVs ZITs, Stations Aqualim et Zones de Baignade » a été créée afin de permettre aux agents de la DCENN, de régénérer automatiquement les couches finales des bassins versant après modification ou ajout de l'un ou l'autre exutoire (Figure 25). Cette Toolbox nécessite comme donnée d'entrée :

- le chemin d'accès du répertoire contenant les dossiers « BVs_individuels » et « BVs_regroupés » préalablement calculés et fournis au Maître d'ouvrage ;
- les exutoires pour lesquels les BVs doivent être calculés ;
- le type d'exutoires (ZIT, Station Aqualim ou Zone de baignade) ;
- l'exutoire de départ pour lequel le calcul doit être effectué : il s'agit du numéro de l'exutoire repris dans le champ « FID » de la couche des exutoires ;
- l'exutoire de fin pour lequel le calcul doit être effectué : il s'agit du numéro de l'exutoire repris dans le champ « FID » de la couche des exutoires ;
- la géodatabase dans laquelle les résultats seront stockés ;
- la couche de direction des flux à utiliser.

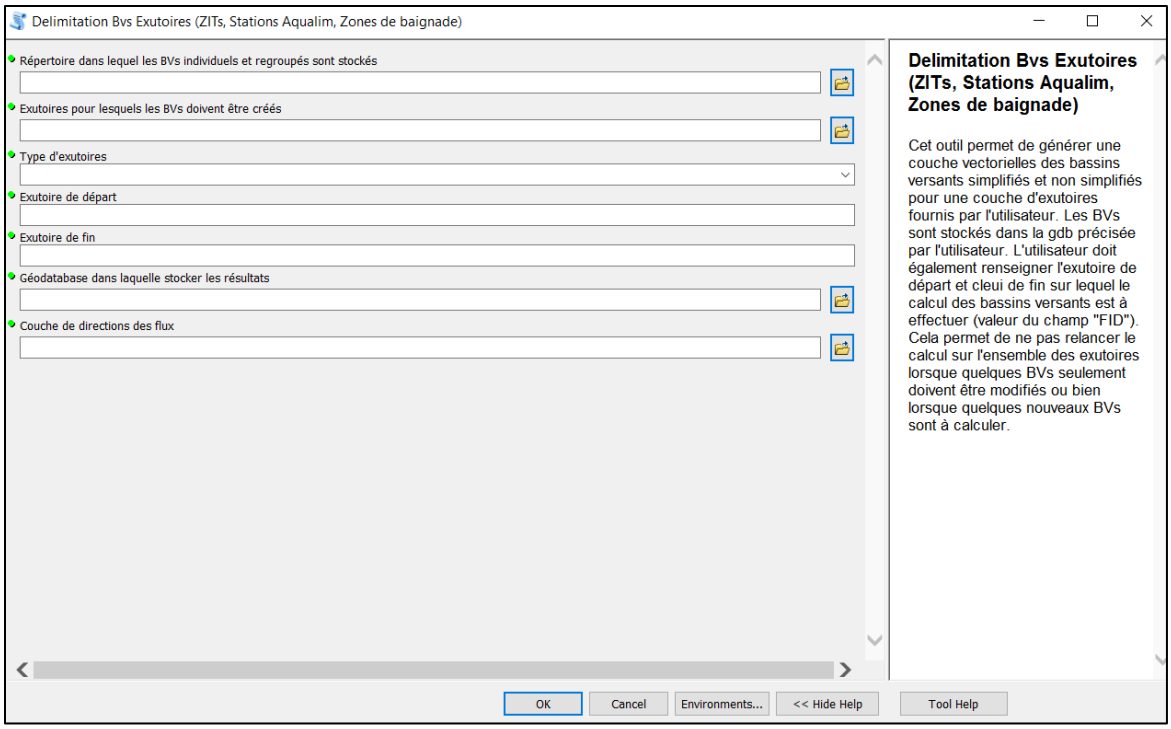


Figure 25 : Outil "Délimitation Bvs Exutoires (ZITs, Stations Aqualim, Zones de baignade)" de la Toolbox "Délimitation BVs ZITs, Stations Aqualim et Zones de Baignade".

A la demande du Maître d'ouvrage, un outil supplémentaire a été créé pour permettre de définir les BVs intercalaires pour les ZITs, les stations Aqualim et les zones de baignades (Figure 26). L'outil précédent permet en effet de déterminer pour un exutoire donné le BV total alors que cet outil permet de déterminer pour le même exutoire la portion de BV comprise entre l'exutoire fourni et l'exutoire localisé en amont. Cette Toolbox nécessite comme donnée d'entrée :

- les exutoires pour lesquels les BVs doivent être calculés ;
- le type d'exutoires (ZIT, Station Aqualim ou Zone de baignade) ;
- la géodatabase dans laquelle les résultats seront stockés ;
- la couche de direction des flux à utiliser.

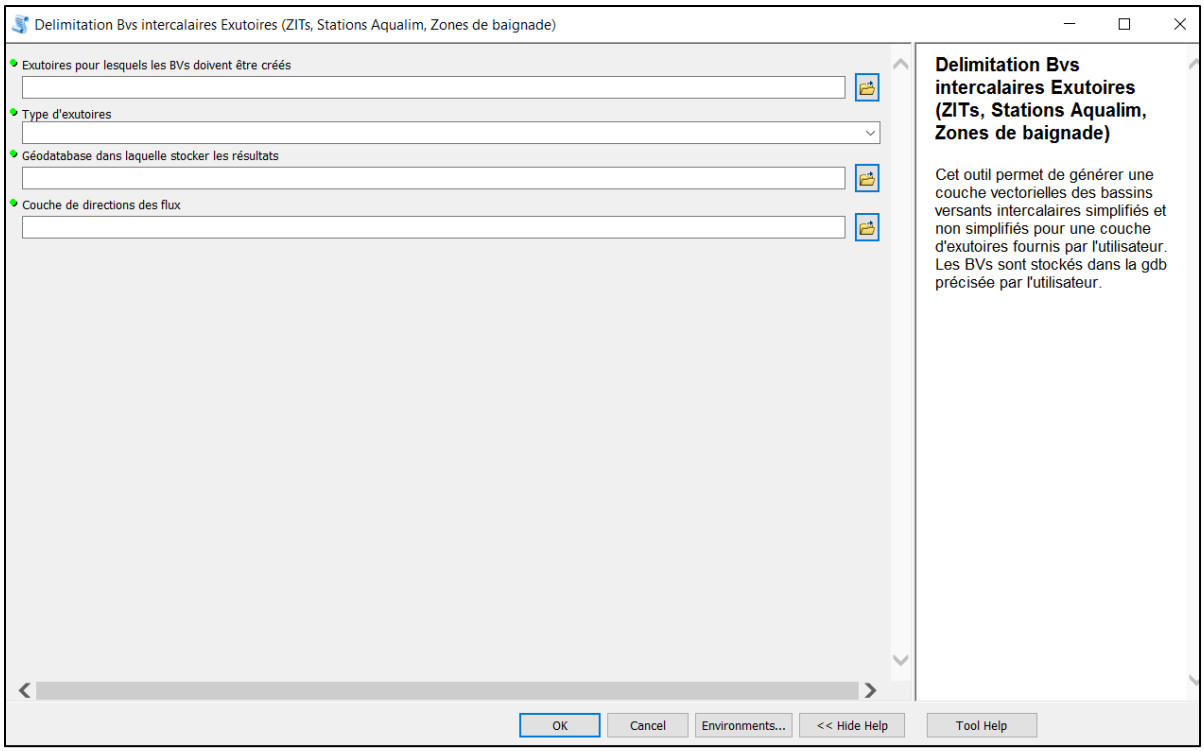


Figure 26 : Outil "Délimitation Bvs intercalaires Exutoires (ZITs, Stations Aqualim, Zones de baignade)" de la Toolbox "Délimitation BVs ZITs, Stations Aqualim et Zones de Baignade".

Concernant les bassins versant ORI, il avait été décidé en cours de convention de ne pas les délimiter car il s'agit d'un découpage obsolète de la Wallonie. Néanmoins, le Maître d'Ouvrage a finalement souhaité disposer d'un outil permettant de les reconstituer si cela s'avère nécessaire. Une Toolbox ArcGIS nommée « Délimitation BVs ORI » a donc été mise au point pour permettre au Maître d'Ouvrage de définir la limite des BVs ORI une fois les exutoires recalés sur le nouveau MNT hydrologique avec une résolution de 5 m (Figure 27). Cette Toolbox fournit une couche des BVs ORI sur base des exutoires identifiés par le code ORI2. L'outil fournit une version simplifiée et non simplifiée des BVs ainsi qu'une version clippée et non clippée sur les limites administratives wallonnes. La Toolbox fournit également une couche par BV ORI avec une version simplifiée et non simplifiée et qui est clippée ou non sur les limites administratives wallonnes.

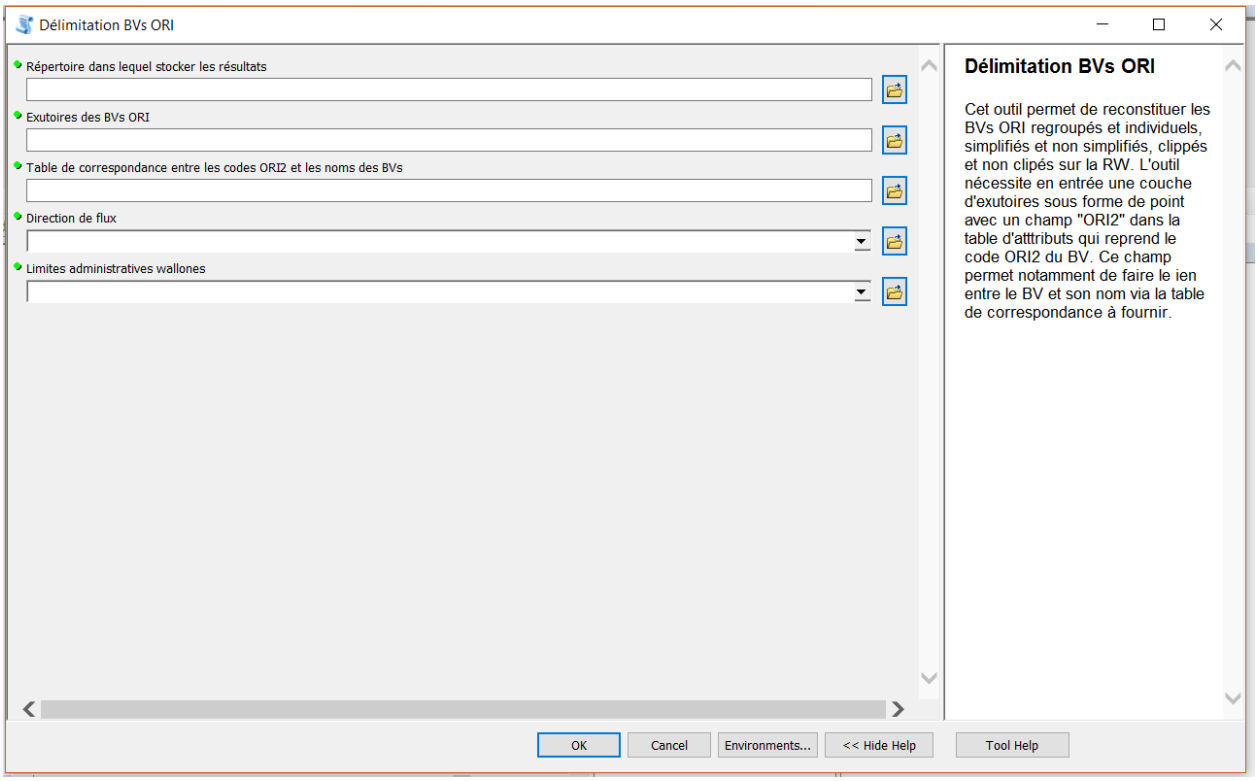


Figure 27 : Outil "Délimitation BVs ORI" de la Toolbox du même nom.

5. Annexes

Annexe 1 : Procédures détaillées pour la production des axes de ruissellement concentré

Nous présentons ci-après les procédures détaillées de traitement des données pour la production des axes de ruissellement concentré. Chaque étape est détaillée avec les fichiers d'entrées (input) et de sortie (output) ci-dessous. Tous les scripts Python utilisés sont renseignés dans ces procédures. Par étape, nous entendons l'utilisation d'une commande ou d'un outil particulier. Il y a donc plus d'étapes détaillées ci-après que les étapes listées dans la procédure globale. Les étapes sont décrites de manière générique indépendamment des outils utilisés. Ainsi, d'autres logiciels/librairies pourraient être utilisés. Les outils qui ont été employés pour le calcul des axes sont :

- Python 3.6.7 : Pilotage des scripts, divers ;
- GDAL 2.2.3 : Conversion format raster, rasterisation, calcul de raster ;
- SAGA 2.3.1 : Algorithmes d'accumulation et de direction de flux, clip de rasters ;
- Whitebox GAT 3.4.0 : Algorithmes « Breach » et « Burn streams »

<u>Phase 1 : production d'un MNT hydrologiquement corrigé</u>

Dans cette première phase, 2 étapes successives sont appliquées à l'intérieur d'une boucle sur l'ensemble des mailles du MNT 2 x 2 km.

Pseudocode

```
## Boucle sur mnt (4966 fichiers)
for mnt in mnts:
   mnt_a = aggregate(mnt, 2m)
   mnt_a_burn = burn(mnt_a)
   mnt_a_burn_b = breach(mnt_a_burn)
```

Aggregate

- raison: agréger les valeurs du MNT 2 x 2 pixels
- input: mnt
- output: mnt_a
- découpage spatial: maille mnt
- script: aggregate.py
- outils: whitebox_tools
- usage: `python3 aggregate.py`

burn-breach

- raison: graver puis effectuer l'algorithme breach sur le MNT agrégé.
- input: mnt_a
- output: mnt_a_burn_b
- découpage spatial: maille mnt
- script: burn_breach_wb.py
- outil: WhiteboxGAT
- usage: exécuter burn_breach_wb.py dans la console de WhiteboxGAT

Phase 2 : production des axes de ruissellement

Dans cette deuxième phase, les traitements sont principalement effectués à l'échelle du bassin versant. Les étapes détaillées ci-dessous sont répétées pour 3 MNT différents : MNT_sinks, MNT_sinks_rhw et MNT_sinks_rhw_berges.

Pseudocode

```
## Préparation des couches de bassins versants (bv) splitté
[...bv] = Selection des mailles par bv

## Traitement par BV (15 bvs)
for bv in bvs:

    mnt_a = mosaic_bv([...mnt_a])
    mnt_a_burn_b_b = breach(mnt_a_burn_b)
    mnt_a_burn_b_b = setNegativeValuesToNoData(mnt_a_burn_b_b)
    mnt_a_burn_b_b_sinks = setZeroWhereSinks(mnt_a_burn_b_b)

    # Process without sinks
    Flowdir_sinks = flowdir(mnt_a_burn_b_b_sinks)
    Flowacc_sinks = d8flowacc(mnt_a_burn_b_b_sinks)
    Axes_r_sinks = reclass(Flowacc_sinks)
    gmpd = gmpd(mnt_a_burn_b_b_sinks)
    gmpd_r = reclass(gmpd)
    gmpd_r_sieve = sieve(gmpd_r_sieve)
    incertitude = calc(gmpd_r, gmpd_r_sieve)

    # Process without sinks & rhw
    mnt_a_burn_b_b_sinks_rhw = setZeroWhereRHW(mnt_a_burn_b_b_sinks, rhw)
    Flowacc_sinks_rhw = d8flowacc(mnt_a_burn_b_b_sinks_rhw)
    Axes_r_sinks_rhw = reclass(Flowacc_sinks_rhw)
    Axes_r_sinks_rhw = removeAxesWhereRhw(Axes_r_sinks_rhw, rhw)

    # Process without sinks, rhw & berges
    mnt_a_burn_b_b_sinks_rhw_berges = setZeroWhereBerges(mnt_a_burn_b_b_sinks_rhw,
berges)
    Flowacc_sinks_rhw_berges = d8flowacc(mnt_a_burn_b_b_sinks_rhw_berges)
    Axes_r_sinks_rhw_berges = reclass(Flowacc_sinks_rhw_berges)
    Axes_r_sinks_rhw_berges = removeAxesWhereRhw(Axes_r_sinks_rhw_berges, rhw)

    # clip all rasters by the SBH bv
    clipped/Flowdir_sinks = clip(Flowdir_sinks, bv)
    clipped/Flowacc_sinks = clip(Flowacc_sinks, bv)
    clipped/Axes_r_sinks = clip(Axes_r_sinks, bv)
    clipped/Flowacc_sinks_rhw = clip(Flowacc_sinks_rhw, bv)
    clipped/Axes_r_sinks_rhw = clip(Axes_r_sinks_rhw, bv)
    clipped/Flowacc_sinks_rhw_berges = clip(Flowacc_sinks_rhw_berges, bv)
    clipped/Axes_r_sinks_rhw_berges = clip(Axes_r_sinks_rhw_berges, bv)
```

Integration sur la Wallonie
mosaic_wallonie.py
formatRaster.py

Vectorisation des axes de ruissellement

Exutoires
rhw_lidaxes_buffer2m = buffer(rhw_lidaxes, 2m)
rhw_lidaxes_buffer2m_dissolved = dissolve(rhw_lidaxes_buffer2m)
rhw_lidaxes_buffer2m_dissolved_lines = polygon2lines(rhw_lidaxes_buffer2m_dissolved)
exutoires = lineIntersection = (rhw_lidaxes_buffer2m_dissolved_lines, axes)

mosaic

- raison: mosaiquer les rasters des MNT à l'échelle des bassins versants
- input: collection de mnt filtré breaché ([...mnt_d_burn_b])
- output: mnt_a_burn_b
- découpage spatial: bassins versants
- script: processByBv.py
- outils: gdal
- usage: `python3 processByBv.py`

breach

- raison: Faire un breach supplémentaire après mosaiquage à l'échelle du bassin versant pour éviter certains problèmes à la jonction de mailles du MNT
- input: mnt_a_burn_b
- output: mnt_a_burn_b_b
- découpage spatial: bassins versants
- script: breach_wb.py
- outils: WhiteboxGAT
- usage: exécuter breach_wb.py dans la console de WhiteboxGAT

setNegativeValuesToNoData

- raison: Spécifier des valeurs comme "no data"
- input: mnt_a_burn_b_b
- output: mnt_a_burn_b_b
- découpage spatial: bassins versants
- script: processByBv.py
- outils: gdal
- usage: `python3 processByBv.py`

convert to saga

- input: mnt_a_burn_b_b
- output: mnt_a_burn_b_b
- découpage spatial: bassins versants
- script: processByBv.py
- outils: gdal
- usage: `python3 processByBv.py`

Convert sink shp to raster

- raison: préparer input pour étape suivante
- input: Sinks_to_use.shp
- output: sinks
- découpage spatial: bassins versants
- script: processByBv.py
- outils: gdal
- usage: `python3 processByBv.py`

setZeroWhereSinks

- raison: supprimer les valeurs d'altitude à l'endroit des sinks (dépressions)
- input: mnt_a_burn_b_b, sinks
- output: mnt_a_burn_b_b_sink
- découpage spatial: bassins versants
- script: processByBv.py
- outils: gdal
- usage: `python3 processByBv.py`

d8 flow accumulation

- raison: produire les valeurs d'accumulation de flux
- input: mnt_a_burn_b_b_sink
- output: flowacc_sinks
- découpage spatial: bassins versants
- script: processByBv.py
- outils: SAGA
- usage: `python3 processByBv.py`

classification en axes

- raison: classifier les valeurs de flow accumulation en classes selon le schéma suivant:
  - 0 : flowacc < 5000 m²
  - 1 : 5000 <= flowacc < 10000 m² (1 ha)
  - 2 : 10000 <= flowacc < 100000 m²
  - 3 : 100000 <= flowacc < 200000 m²
  - 4 : 200000 <= flowacc < 500000 m²
  - 5 : 500000 <= flowacc < 1000000 m²
  - 6 : flowacc >= 1000000 m² (100 ha)
- input: flowacc_sinks
- output: axes_r_sinks
- découpage spatial: bassins versants
- script: processByBv.py
- outils: gdal
- usage: `python3 processByBv.py`

d8 flow direction

- raison: produire les directions de flux
- input: mnt_a_burn_b_b_sink
- output: flowdir_sinks
- découpage spatial: bassins versants
- script: processByBv.py
- outils: SAGA
- usage: `python3 processByBv.py`

Multiple direction flow accumulation (GMPD)

- raison: produire les accumulation de flux à direction multiples
- input: mnt_a_burn_b_b_sink
- output: gmpd_sinks
- découpage spatial: bassins versants
- script: processByBv.py
- outils: SAGA
- usage: `python3 processByBv.py`

Reclassification GMPD

- input: gmpd_sinks
- output: gmpd_sinks_r
- découpage spatial: bassins versants
- outils: gdal_calc
- script: processByBv.py
- usage: `python3 processByBv.py`

Sieve

- input: gmpd_sinks_r
- output: gmpd_sinks_r_sieved
- découpage spatial: bassins versants
- outils: gdal_sieve
- script: processByBv.py
- usage: `python3 processByBv.py`

Incertitude

- input: gmpd_sinks_r, gmpd_sinks_r_sieved
- output: incertitude
- découpage spatial: bassins versants
- outils: gdal_calc
- script: processByBv.py
- usage: `python3 processByBv.py`

Clip par bv

- raison: éliminer les bords des rasters produits (problème d'effets de bords)
- input: [...flowacc_sinks, ...flowdir_sinks, ...gmpd_sinks, ...axes_r_sinks]
- output: [...clipped/flowacc_sinks, ...clipped/flowdir_sinks, ...clipped/gmpd_sinks, ...clipped/axes_r_sinks]
- découpage spatial: bassins versants
- script: processByBv.py
- outils: SAGA
- usage: `python3 processByBv.py`

mosaic

- raison: mosaiquer les rasters des bassins versants à l'échelle de la Wallonie
- input: [...clipped/flowacc_sinks, ...clipped/flowdir_sinks, ...clipped/gmpd_sinks, ...clipped/axes_r_sinks]
- output: flowacc_wal, flowdir_wal, gmpd_wal, axes_wal
- découpage spatial: Wallonie
- script: mosaicWallonie.py
- outils: gdal
- usage: `python3 mosaicWallonie.py`

format raster

- raison: Spécifier les valeurs "No data", le système de projection et les métadonnées, compresser le raster
- input: flowacc_wal, flowdir_wal, gmpd_wal, axes_wal
- output: flowacc_wal, flowdir_wal, gmpd_wal, axes_wal
- découpage spatial: Wallonie
- script: formatRaster.py
- outils: gdal
- usage: `python3 formatRaster.py`

Annexe 2 : Procédures détaillées pour l'amélioration du RHW

Nous présentons ci-après les procédures détaillées de traitement des données pour l'amélioration du RHW. Chaque étape est détaillée avec les fichiers d'entrées (input) et de sortie (output) ci-dessous. Tous les scripts Python utilisés sont renseignés dans ces procédures. Par étape, nous entendons l'utilisation d'une commande ou d'un outil particulier. Il y a donc plus d'étapes détaillées ci-après que les étapes listées dans la procédure globale. Les étapes sont décrites de manière générique indépendamment des outils utilisés. Ainsi, d'autres logiciels/librairies pourraient être utilisés. Les outils qui ont été employés pour le calcul des axes sont : Les outils employés pour le calcul des écoulements dans les ZC sont :

- Python 3.6.7 : Pilotage des scripts, divers ;
- GDAL/OGR 2.2.3 : Conversion format raster, reclassification, mosaiquage, merge ;
- SAGA 2.3.1 : Algorithmes d'accumulation et de direction de flux, Snap points to lines ;
- Whitebox GAT 3.4.0 : Algorithmes « Breach » et « Burn streams » ;
- whitebox-tools : Algorithme « Fill »

Pseudocode

```
## Préparation du RHW hors Zones Complexes
ZC_s = select(ZC, type de zones complexes à sélectionner)
ZC_buffer = buffer(ZC_s, 30m)
RHW_hors_NCND = select(RHW, tout sauf NC,ND,NR)
RHW_hors_ZC = difference(RHW_hors_NCND, ZC_buffer)


## Préparation de la table des bassins versants
ORI_buffer = buffer(ORI, 3000m)
ORI_buffer_inter_maille = intersection(ORI_buffer, mailles MNT)
Export sous csv


## Boucle sur mnt (4551 fichiers)
for mnt in mnts:
   mnt_d = filter(mnt)
   mnt_d_burn = burn(mnt_d)
   mnt_d_burn_b = breach(mnt_d_burn)


## Traitement par BV (337 bvs)
for bv in bvs:
   mnt_d_burn_b_bv = mosaic_bv([...mnt_d_burn_b])
   mnt_d_burn_b_bv_0 = setNegativeValuesToNoData(mnt_d_burn_b_bv)
   mnt_d_burn_b_bv_0_fill = fill(mnt_d_burn_b_bv_0)
   flowdir, streams = flowdir(mnt_d_burn_b_bv_0_fill)
   flowacc = flowacc(mnt_d_burn_b_bv_b_0_fill)
```

```
## Constitution des réseaux - méthode "downslope"
flowdir_ZC = intersection(flowdir, ZC)
streams_downslope = trace downslope path(flowdir, rhw_ZC_pts)
streams_downslope (vector) = raster stream to vector (streams_downslope (raster))

## Constitution des réseaux - méthode "strahler"
streams_merged = mergeShp([...streams])
streams_inter_ZC = intersection(streams_merged, ZC_buffer)
streams_inter_ZC_sel = select(streams_inter_ZC, strahler order)
streams_strahler = remove duplicas(streams_inter_ZC_sel)

## Clip d'une couche de réseau "strahler" où il n'y a pas de "downslope" (têtes de bassins
versants)
ZC_whereNoDownslope = Select by location "ZC" and "streams_downslope" are disjoint
ZC_buffer_whereNoDownslope = Select by location "ZC_buffer" and
"ZC_whereNoDownslope" intersect
streams_strahler_whereNoDownslope = clip(streams_strahler,
ZC_buffer_whereNoDownslope)
streams_downslope_whereNoSelectedStrahler =  difference(streams_downslope,
ZC_buffer_whereNoDownslope)

## Merge
streams_downslope_strahler = merge(streams_downslope,
streams_downslope_whereNoSelectedStrahler)
streams_downslope_strahler = Smooth(streams_downslope_strahler)

## Clip d'une couche d'éléments du RHW où streams_downslope_strahler n'existe pas
(certains méandres coupés)
ZC_buffer_whereNoDownslopeNorStrahler = Select by location "ZC_buffer" and
streams_downslope_strahler are disjoint
RHW_hors_NCND_whereNoDownslopeNorStrahler = clip(RHW_hors_NCND,
ZC_buffer_whereNoDownslopeNorStrahler)

## Merge
streams_downslope_strahler_rhw = merge(streams_downslope_strahler,
RHW_hors_NCND_whereNoDownslopeNorStrahler)

## Création d'une couche de jonctions
jonctions = snapline2points(rhw_ZC_pts, streams_downslope_strahler_rhw, 200m)
jonctions_manual_filtered = filter(jonctions)

## Intégration
rhw_lidaxes = merge(RHW_hors_ZC, streams_downslope_strahler_rhw, jonctions)

## Gestion des attributs
rhw_lidaxes = set attributes for GEOM_SOURC, GEOM_DATE, GEOM_PRECI,
ACTUALITE for downslope, strahler and jonctions segments
rhw_lidaxes_ZC = select by attributes (GEOM_DATE = 2019-03-01)
rhw_lidaxes_ZC = join attributes by location (rhw)
rhw_lidaxes_attributes = merge (rhw_lidaxes_ZC, rhw_lidaxes_horsZC)
```

Préparation du RHW hors Zones Complexes

- inputs: ZC.shp (ISO-8859-1), RHW.shp
- outputs: ZC_buffer.shp, RHW_hors_ZC.shp
- découpage spatial: Wallonie
- outils: QGIS, QGIS.select, QGIS.buffer, QGIS.difference
- projet QGIS: RHW_hors_ZC.qgs
- usage:
  1. Sélection des zones complexes à considérer
     - Select by expression
     - "TYPE_ZC" = '1 - Améliorer géométrie' OR "TYPE_ZC" = '2 - Problème spécifique de géométrie' OR "TYPE_ZC" = '3 - Continuité du RH' OR "TYPE_ZC" = '4 - Arc manquant'
  2. Buffer sur les zones complexes de 30 m
  3. Sélection des segments du RHW
     - QGIS > Select by expression
     - "CATEG" = 'ND' OR "CATEG" = 'NC' OR "CATEG" = 'NR'
     - invert selection
  4. Différence entre RHW et ZC_buffer
- temps de calcul:
  - buffer: 3.23 s
  - difference: 265 s
- espace disque:
  - ZC_buffer: 8.1 Mo
  - RHW_hors_ZC: 360 Mo

Traitement du MNT pour un MNT hydrologique et des rasters d'accumulation de flux et de direction de flux

Filtrage du MNT

- input: mnt
- output: mnt_d
- découpage spatial: maille mnt
- script: filter.py
- outils: whitebox_tools
- usage: `python3 filter.py`
- temps de calcul: 43.67 s par fichier, 201203 s = 56 h Wallonie
- CPU: denoise: tous pendant 50% du temps, 1 seul pendant 50% du temps
- espace disque: 23.1 Mo par fichier, 106421 Mo Wallonie

burn

- input: mnt_d
- output: mnt_d_burn
- découpage spatial: maille mnt
- script: burn.py
- outils: WhiteboxGAT
- temps de calcul: 159 s par fichier!
- CPU: assez chargéespace disque: attention, whiteboxGAT duplique l'input (tif->dep)

Breach

- input: mnt_d_burn
- output: mnt_d_burn_b
- découpage spatial: maille mnt
- script: breach.py
- outils: whitebox_tools
- usage: `python3 breach.py`
- temps de calcul: 17.5 s par fichier, 22.4 h Wallonie
- CPU: 1 seul
- espace disque: 23.1 Mo par fichier, 106421 Mo Wallonie

burn-breach ensemble dans whiteboxGAT

- input: mnt_d
- output: mnt_d_burn_b + breach intermédiaires
- découpage spatial: maille mnt
- script: burn_breach_wb.py
- outil: WhiteboxGAT
- temps de calcul: 68 s par fichier. 87 h Wallonie
- CPU: chargé
- espace disque: 2 * 23.1 Mo par fichier, 212 Go Wallonie + breach intermédiaires

mosaic

- input: collection de mnt filtré breaché ([mnt_d_burn_b])
- output: mnt_d_burn_b_bv
- découpage spatial: Wallonie ou bassins versants
- script: mosaic.py
- outils: gdal
- usage: `python3 mosaic.py`
- temps de calcul: 24s par fichier à mosaiquer, 30.7 h Wallonie (estimé)
- CPU: aucun à 100%
- espace disque: ~65 Go (Wallonie)
- limitation: non

setNegativeValuesToNoData

- input: mnt_d_burn_b_bv
- output: mnt_d_burn_b_bv
- découpage spatial: Wallonie ou bassins versants
- script: setNegativeValuesToNoData.py
- outils: gdal
- usage: `python3 setNegativeValuesToNoData.py`
- temps de calcul: 15 min pour 10.5 Go, 89 s pour 945 Mo, 75s pour 1.5 Go
- CPU: aucun à 100%
- espace disque: ~65 Go (Wallonie)
- limitation: non

convert to saga

- input: mnt_d_burn_b_bv
- output: mnt_d_burn_b_bv
- découpage spatial: Wallonie ou bassins versants
- script: convert_saga.py
- outils: gdal
- usage: `python3 convert_saga.py`
- temps de calcul: 860 s pour 945 Mo, 322s pour 1.5Go
- espace disque: ~65 Go (Wallonie)

fill

- input: mnt_d_burn_b_bv
- output: mnt_d_burn_b_bv_fill
- découpage spatial: Wallonie ou bassins versants
- script: fill_wal.py
- outils: whitebox_tools
- usage: `python3 fill_bv.py`
- temps de calcul: 135s pour un fichier de 10 Go
- espace disque: ~65 Go (Wallonie)
- limitation: fichier < taille RAM pour SAGA

d8 flow accumulation

- input: mnt_d_burn_b_bv_fill
- output: d8
- découpage spatial: Wallonie ou bassins versants
- script: d8_saga.py
- outils: SAGA
- usage: `python3 d8_saga.py`
- temps de calcul: 797 s pour un fichier de 1.5 Go
- CPU: 1 pris
- espace disque: ~65 Go (Wallonie)
- limitation: fichier < taille RAM pour SAGA

d8 flow direction

- input: mnt_d_burn_b_bv_fill
- output: d8pointer ou flowdir, streams
- découpage spatial: Wallonie ou bassins versants
- script: flowdir_saga.py
- outils: SAGA
- usage: `python3 flowdir_saga.py`
- temps de calcul: 610 s pour un fichier de 945 Mo (SAGA)
- CPU: tous
- espace disque: <65 Go (Wallonie)
- limitation: fichier < taille RAM pour SAGA

<u>Post-traitement du réseau hydro déterminé avec saga (streams_downslope)</u>

Pre-processing: créer une couche de points à l'intersection des ZC et du RHW légèrement à l'intérieur des ZC

- Buffer
  - inputs: ZC_buffer.shp
  - outputs: ZC_buffer_interior1m.shp
  - Outil: QGIS > Vector > Buffer de "-1 m" avec dissolution
- PolygonToLine
  - inputs: ZC_buffer_interior1m.shp
  - outputs: ZC_buffer_interior1m_lines.shp
  - Outil: QGIS > Vector > Polygons to lines
- SingleParts
  - inputs: ZC_buffer_interior5m_lines.shp
  - output: ZC_buffer_interior5m_lines_sf.shp
  - Outil: QGIS > Vector > Multipart to single parts
- Intersection
  - inputs: RHW_hors_NCND.shp, ZC_buffer_interior1m_lines_sf.shp
  - output: RHW_hors_NCND_inter_ZC_interior1m.shp
  - Outil: QGIS > Vector > Lines Intersection

Intersection flowdir par ZC

- inputs: d8flowdir, ZC_buffer.shp
- output: d8flowdir_inter_ZC.shp
- découpage spatial: bv
- outil: SAGA
- usage: `python3 processDownslope.py`

Trace downslope paths

- inputs: d8flowdir, RHW_hors_NCND_inter_ZC_interior5m.shp
- output: streams_downslope
- découpage spatial: Wallonie
- outils: whitebox_tools
- usage: `python3 processDownslope.py`

Convert raster stream to vector

- input: streams_downslope
- output: streams_downslope.shp
- découpage spatial: Wallonie
- outils: whitebox_tools
- usage: `python3 processDownslope.py`

Merge all stream lines (bv -> Wallonie)

- input: [streams_downslope.shp]
- output: streams_downslope_merged.shp
- découpage spatial: Wallonie
- script: mergeDownslopeShp.py
- outils: ogr2ogr
- usage: `python3 mergeDownslopeShp.py`
- espace disque: 47 Mo (Wallonie)
- temps de calcul: ~60 s

Remove small features

- input: streams_downslope_merged.shp
- output: streams_downslope_sel.shp
- découpage spatial: Wallonie
- outil: QGIS Select by attributes : $length > 5
- espace disque: 47 Mo (Wallonie)

Delete duplicates in stream lines

- input: streams_downslope_sel.shp
- output: streams_downslope_sel_deldupl.shp
- découpage spatial: Wallonie
- outil: QGIS Delete duplicates
- espace disque: 47 Mo (Wallonie)

<u>Post-traitement du réseau hydro déterminé avec saga (streams_strahler)</u>

Merge all stream lines (bv -> 7 sous-ensembles)

- input: [streams.shp]
- output: stream_merge.shp
- découpage spatial: 7 sous-ensembles de la Wallonie (car un shp doit être < 2Go)
- script: mergeShp.py
- outils: ogr2ogr
- usage: `python3 mergeShp.py`
- temps de calcul: qq minutes pour 1 Go de shp en sortie
- espace disque: ~7.95 Go (Wallonie)

Intersect lines by ZC_buffer

- input: streams.shp, ZC_buffer.shp
- output: streams_inter_ZC.shp
- découpage spatial: Wallonie
- outils: QGIS > Layer > Intersection
- temps de calcul: ~10 min pour un shp de 59 Mo
- espace disque: 360 Mo (Wallonie)

Merge all stream lines (7 sous-ensembles -> Wallonie)

- A cause de leur taille, tous les shp n'avaient pu être mergés à la première étape. Ils sont maintenant mergés.

Selection post-intersection

- input: streams_inter_zc.shp
- output: streams_inter_zc_sel.shp
- outil: QGIS > Select by attribute avec: ("CATEGORIE" = '01' AND "ORDER" > 4) OR ("CATEGORIE" = '02' AND "ORDER" > 3) OR ("CATEGORIE" = '03')
- espace disque: 315 Mo (Wallonie)

Remove duplicate geometries

- input: streams_inter_zc_sel.shp
- output: streams_strahler.shp
- découpage spatial: Wallonie
- outils: QGIS > Delete duplicate geometries
- temps de calcul: ~1 min pour un shp de 3 Mo
- espace disque: 158 Mo

<u>Intégration des nouveaux segments au RHW</u>

Streams de streams_strahler où streams_downslope n'existent pas (tête de bassins versants)

- QGIS Select by location: ZC where ZC and streams_downslope are disjoint
- QGIS Select by location: ZC_buffer where ZC_buffer and ZC selected intersect -> ZC_buffer_whereNoDownslope.shp (2160 éléments)
- QGIS Clip: streams_strahler par ZC_buffer_whereNoDownslope -> streams_strahler_whereNoDownslope.shp
- QGIS Difference: streams_downslope par ZC_buffer_whereNoDownslope -> streams_downslope_whereNoSelectedStrahler.shp
- QGIS Select by attribute: streams_downslope_whereNoSelectedStrahler.shp where $length > 2 (supprimer artefacts de Difference) -> streams_downslope_whereNoSelectedStrahler_lGt2.shp

Merge

streams_downslope_strahler = merge(streams_downslope_whereNoSelectedStrahler_lGt2, streams_strahler_whereNoDownslope)

Lissage

streams_downslope_strahler = QGIS smoothing(streams_downslope_strahler)

Streams de RHW où streams_downslope_strahler n'existent pas

- QGIS Select by location: ZC_buffer where ZC_buffer and streams_downslope_strahler disjoint -> ZC_buffer_whereNoDownslopeNorStrahler.shp (141 éléments)
- QGIS Clip: RHW_hors_NCND par ZC_buffer_whereNoDownslopeNorStrahler -> RHW_hors_NCND_whereNoDownslopeNorStrahler.shp

Merge

streams_downslope_strahler_rhw = merge(streams_downslope_strahler, RHW_hors_NCND_whereNoDownslopeNorStrahler)

Delete duplicates

- input: streams_downslope_strahler_rhw.shp
- output: streams_downslope_strahler_rhw_deldupl.shp
- découpage spatial: Wallonie
- outil: QGIS Delete duplicates

<u>Jonctions</u>

pre-processing: créer une couche de points d'entrée à l'intersection des ZC et du RHW

- PolygonToLine
  - inputs: ZC_buffer.shp
  - outputs: ZC_buffer_lines.shp
  - Outil: QGIS > Vector > Polygons to lines
- SingleParts
  - inputs: ZC_buffer_lines.shp
  - output: ZC_buffer_lines_singlepart.shp
  - Outil: QGIS > Vector > Multipart to single parts
- Intersection
  - inputs: RHW_hors_NCND.shp, ZC_buffer_lines_singlepart.shp
  - output: RHW_ZC_pts.shp
  - Outil: QGIS > Vector > Lines Intersection

Create jonctions

- inputs: RHW_ZC_pts (points), streams_downslope_strahler_rhw_deldupl (lines)
- output: junctions (sauvegarder les "moves")
- outil: QGIS/SAGA: Snap points to lines, search distance = 200 m

Final merge

rhw_lidaxes = merge(RHW_hors_ZC, streams_downslope_strahler_rhw_deldupl, junctions)

Final snap

rhw_lidaxes = snap geometries to layer (2m)

Remove duplicates

rhw_lidaxes = remove duplcite (rhw_lidaxes)

Gestion des attributs de la couche

Identification des nouveaux segments et ajout de champs spécifiques

- Downslope: ont un attribut FID non null
  - Select by attribute: "FID" IS NOT NULL -> 12525 valeurs, 12547 avec nv version
  - Field calculator: only selected features, update GEOM_SOURC: 'LIDAR_DOWNSLOPE'
- Strahler: ont un attribut SEGMENT_ID non null
  - Select by attribute: "SEGMENT_ID" IS NOT NULL -> 34104 valeurs, 35137 avec nv version
  - Field calculator: only selected features, update GEOM_SOURC: 'LIDAR_STRAHLER'
- Jonctions: ont un attribut jonction = 1
  - Select by attribute: "jonction" = 1 -> 4986 valeurs, 5548 avec nv version
  - Field calculator: only selected features, update GEOM_SOURC: 'LIDAR_M'
- Tous les nouveaux segments LIDAR:
  - Select by attribute: "GEOM_SOURC" = 'LIDAR_DOWNSLOPE' OR "GEOM_SOURC" = 'LIDAR_STRAHLER' OR "GEOM_SOURC" = 'LIDAR_M'
  - Field calculator: GEOM_DATE: '2019-03-01',
  - Field calculator: GEOM_PRECI: 1,
  - Field calculator: ACTUALITE: 0

Récupérer les anciens attributs du RHW

- Sélectionner les nv segments LIDAR: Select by attribute: "GEOM_SOURC" = 'LIDAR_DOWNSLOPE' OR "GEOM_SOURC" = 'LIDAR_STRAHLER' OR "GEOM_SOURC" = 'LIDAR_M'
- Sauvegarder les features sélectionnées (nv features) et supprimer tous les champs sauf GEOM_DATE, GEOM_SOURC, GEOM_PRECI, ACTUALITE -> rhw_lidaxes_ZC.shp
- Inverser la sélection et supprimer tous les champs qui viennent des ZC -> rhw_lidaxes_horsZC.shp

- Join attributs du RHW sur ZC
  - Join attributes by location ZCbuffer intersect RHW_tronçons -> ZC_buffer_intersect_rhw.shp
    - input layer: ZC_buffer
    - join layer: RHW_hors_NCNDNR
    - Fields: all except GEOM_SOURC, GEOM_DATE, GEOM_PRECI, ACTUALITE
    - relation: 1 to 1
- Join attributes du ZC_buffer_intersect_rhw.shp sur nouveau rhw
- Join attributes by location rhw_lidaxes intersect ZC_buffer_intersect_rhw.shp -> rhw_lidaxes_ZC_joinRhwAttributes
  - input layer: rhw_lidaxes_ZC
  - join layer: ZC_buffer_intersect_rhw
  - Fields: all except the ones from ZC_buffer: CATEGGORIE, TYPE_ZC, SHAPE_Leng, SHAPE_Area, OBJECTID_2
  - relation: 1 to 1
- Merge (rhw_lidaxes_ZC_joinRhwAttributes, rhw_lidaxes_horsZC) -> rhw_lidaxes_attributes.shp

<u>Sens des écoulements</u>

- Ajouter un ID unique à la couche rhw_lidaxes

Sens de l'écoulement sur base des altitudes

Points de départ

- input: rhw_lidaxes
- output: rhw_lidaxes_start
- outil: ogr2ogr avec ST_StartPoint (PostGIS)
- script: ByElevation/getElevationStartEndPointsRHW.py

Points d'arrivée

- input: rhw_lidaxes
- output: rhw_lidaxes_end
- outil: ogr2ogr avec ST_EndPoint (PostGIS)
- script: ByElevation/getElevationStartEndPointsRHW.py

Extraire les altitudes à ces points de départ et d'arrivée

- input: rhw_lidaxes_start / rhw_lidaxes_end, MNT_sinks
- output: rhw_lidaxes_start / rhw_lidaxes_end
- outil: SAGA avec Add Raster Values to Points
- script: ByElevation/getElevationStartEndPointsRHW.py

Jointure

Joindre par attribut (ID) les altitudes extraites de rhw_lidaxes_start et rhw_lidaxes_end à rhw_lidaxes: start_ele & end_ele -> rhw_lidaxes_ele

Changement de sens suivant l'altitude

- input: rhw_lidaxes_ele
- output: rhw_lidaxes_reverseEle
- outil: ogr2ogr avec ST_Reverse
- script: ByElevation/setWaterflowSenseByElevation.py

Sens de l'écoulement sur base de la convergence

Points de départ

- input: rhw_lidaxes_reverseEle
- output: rhw_lidaxes_reverseEle_start
- outil: ogr2ogr avec ST_StartPoint (PostGIS)
- script: ByLogic/getElevationStartEndPointsRHW.py

Points d'arrivée

- input: rhw_lidaxes_reverseEle
- output: rhw_lidaxes_reverseEle_end
- outil: ogr2ogr avec ST_StartPoint (PostGIS)
- script: ByLogic/getElevationStartEndPointsRHW.py

Extraire les altitudes à ces points de départ et d'arrivée

- input: rhw_lidaxes_reverseEle_start / rhw_lidaxes_reverseEle_end, MNT_sinks
- output: rhw_lidaxes_reverseEle_start / rhw_lidaxes_reverseEle_end
- outil: SAGA avec Add Raster Values to Points
- script: ByLogic/getElevationStartEndPointsRHW.py

Sélection des points se-superposant

- QGIS Select by location rhw_lidaxes_reverseEle_start that NOT intersects rhw_lidaxes_reverseEle_end -> rhw_start_SS
- QGIS Select by location rhw_lidaxes_reverseEle_end that NOT intersects rhw_lidaxes_reverseEleS_start -> rhw_end_EE

Jointure

Joindre par attribut (ID) les ID des points SS et EE à rhw_lidaxes_reverseEle. -> rhw_lidaxes_convergence

Changement de sens suivant la convergence

- input: rhw_lidaxes_convergence
- output: rhw_lidaxes_convergenceReverse
- outil: ogr2ogr avec ST_Reverse
- script: ByLogic/setWaterflowSenseByLogic.py

Récupération des altitudes en min_ele et max_ele

QGIS Field calculator:

- max_ele = max(start_ele, end_ele)
- min_ele = min(start_ele, end_ele)

Annexe 3 : Copie des fichiers readme des rasters produits

1. Flowacc_sinks.tif
* Nom: Accumulation de flux LIDAXES2
* Description: Raster d'accumulation de flux sur base d'un MNT où les dépressions ne débordant pas avec une pluie d'une période de retour de 100 ans ont été effacés. L'algorithme d'accumulation de flux est l'algorithme convergent D8 implémenté sous SAGA dans l'outil "Flow Accumulation (Top-Down)", option "Deterministic 8" (saga_cmd ta_hydrology 0 -METHOD 0)
* Système de coordonnées: Lambert Belge 1972 (EPSG:31370)
* Unité: mètre
* Étendue: 32011.000, 20011.000, 295991.000, 173991.000
* Résolution: 2
* Compression du fichier: algorithme DEFLATE, prédicteur 2 (corrélation spatiale), Z-level 9 (compression élevée)
* Format BigTIFF
* Raster tuilé
* Type de données: UInt32
* Valeur no-data: 0
* Valeurs: Accumulation de flux en m². La valeur la plus basse est 4 m².

2. Flowacc_sinks_rhw.tif
* Nom: Accumulation de flux (sans rhw) LIDAXES2
* Description: Raster d'accumulation de flux sur base d'un MNT où les dépressions ne débordant pas avec une pluie d'une période de retour de 100 ans et les axes des cours d'eau (RHW) ont été effacés. L'algorithme d'accumulation de flux est l'algorithme convergent D8 implémenté sous SAGA dans l'outil "Flow Accumulation (Top-Down)", option "Deterministic 8" (saga_cmd ta_hydrology 0 -METHOD 0)
* Système de coordonnées: Lambert Belge 1972 (EPSG:31370)
* Unité: mètre
* Étendue: 32011.000, 20011.000, 295991.000, 173991.000
* Résolution: 2
* Compression du fichier: algorithme DEFLATE, prédicteur 2 (corrélation spatiale), Z-level 9 (compression élevée)
* Format BigTIFF
* Raster tuilé
* Type de données: UInt32
* Valeur no-data: 0
* Valeurs: Accumulation de flux en m². La valeur la plus basse est 4 m².

3. Flowacc_sinks_rhw_berges.tif
* Nom: Accumulation de flux (sans rhw ni berges) LIDAXES2
* Description: Raster d'accumulation de flux sur base d'un MNT où les dépressions ne débordant pas avec une pluie d'une période de retour de 100 ans, les axes des cours d'eau (RHW) et les surfaces des grands cours d'eau (berges) ont été effacés. L'algorithme d'accumulation de flux est l'algorithme convergent D8 implémenté sous SAGA dans l'outil "Flow Accumulation (Top-Down)", option "Deterministic 8" (saga_cmd ta_hydrology 0 -METHOD 0)
* Système de coordonnées: Lambert Belge 1972 (EPSG:31370)
* Unité: mètre
* Étendue: 32011.000, 20011.000, 295991.000, 173991.000
* Résolution: 2
* Compression du fichier: algorithme DEFLATE, prédicteur 2 (corrélation spatiale), Z-level 9 (compression élevée)
* Format BigTIFF
* Raster tuilé
* Type de données: UInt32
* Valeur no-data: 0
* Valeurs: Accumulation de flux en m². La valeur la plus basse est 4 m².

4. Axes_r_sinks.tif
* Nom: Axes de Ruissellement concentré LIDAXES2
* Description: Raster des axes de ruissellement concentré (reclassification de l'accumulation de flux) sur base d'un MNT où les dépressions ne débordant pas avec une pluie d'une période de retour de 100 ans ont été effacés. L'algorithme d'accumulation de flux est l'algorithme convergent D8 implémenté sous SAGA dans l'outil "Flow Accumulation (Top-Down)", option "Deterministic 8" (saga_cmd ta_hydrology 0 -METHOD 0)
* Système de coordonnées: Lambert Belge 1972 (EPSG:31370)
* Unité: mètre
* Étendue: 32011.000, 20011.000, 295991.000, 173991.000
* Résolution: 2
* Compression du fichier: algorithme DEFLATE, prédicteur 2 (corrélation spatiale), Z-level 9 (compression élevée)
* Format BigTIFF
* Raster tuilé
* Type de données: Byte
* Valeur no-data: 255
* Valeurs: Accumulation de flux reclassifiés comme suit:
  * 0 : flowacc < 5000 m²
  * 1 : 5000 <= flowacc < 10000 m² (1 ha)
  * 2 : 10000 <= flowacc < 100000 m²
  * 3 : 100000 <= flowacc < 200000 m²
  * 4 : 200000 <= flowacc < 500000 m²
  * 5 : 500000 <= flowacc < 1000000 m²
* 6 : flowacc >= 1000000 m² (100 ha)

5. Axes_r_sinks_rhw.tif
* Nom: Axes de Ruissellement concentré (sans rhw) LIDAXES2
* Description: Raster des axes de ruissellement concentré (reclassification de l'accumulation de flux) sur base d'un MNT où les dépressions ne débordant pas avec une pluie d'une période de retour de 100 ans et les axes des cours d'eau (RHW) ont été effacés. L'algorithme d'accumulation de flux est l'algorithme convergent D8 implémenté sous SAGA dans l'outil "Flow Accumulation (Top-Down)", option "Deterministic 8" (saga_cmd ta_hydrology 0 -METHOD 0)
* Système de coordonnées: Lambert Belge 1972 (EPSG:31370)
* Unité: mètre
* Étendue: 32011.000, 20011.000, 295991.000, 173991.000
* Résolution: 2
* Compression du fichier: algorithme DEFLATE, prédicteur 2 (corrélation spatiale), Z-level 9 (compression élevée)
* Format BigTIFF
* Raster tuilé
* Type de données: Byte
* Valeur no-data: 255
* Valeurs: Accumulation de flux reclassifiés comme suit:
  * 0 : flowacc < 5000 m²
  * 1 : 5000 <= flowacc < 10000 m² (1 ha)
  * 2 : 10000 <= flowacc < 100000 m²
  * 3 : 100000 <= flowacc < 200000 m²
  * 4 : 200000 <= flowacc < 500000 m²
  * 5 : 500000 <= flowacc < 1000000 m²
  * 6 : flowacc >= 1000000 m² (100 ha)

6. Axes_r_sinks_rhw_berges.tif
* Nom: Axes de Ruissellement concentré (sans rhw + clip berges) LIDAXES2
* Description: Raster des axes de ruissellement concentré (reclassification de l'accumulation de flux) sur base d'un MNT où les dépressions ne débordant pas avec une pluie d'une période de retour de 100 ans, les axes des cours d'eau (RHW) et les surfaces des grands cours d'eau (berges) ont été effacés. L'algorithme d'accumulation de flux est l'algorithme convergent D8 implémenté sous SAGA dans l'outil "Flow Accumulation (Top-Down)", option "Deterministic 8" (saga_cmd ta_hydrology 0 -METHOD 0)
* Système de coordonnées: Lambert Belge 1972 (EPSG:31370)
* Unité: mètre
* Étendue: 32011.000, 20011.000, 295991.000, 173991.000
* Résolution: 2
* Compression du fichier: algorithme DEFLATE, prédicteur 2 (corrélation spatiale), Z-level 9 (compression élevée)
* Format BigTIFF
* Raster tuilé
* Type de données: Byte
* Valeur no-data: 255
* Valeurs: Accumulation de flux reclassifiés comme suit:
  * 0 : flowacc < 5000 m²
  * 1 : 5000 <= flowacc < 10000 m² (1 ha)
  * 2 : 10000 <= flowacc < 100000 m²
  * 3 : 100000 <= flowacc < 200000 m²
  * 4 : 200000 <= flowacc < 500000 m²
  * 5 : 500000 <= flowacc < 1000000 m²
  * 6 : flowacc >= 1000000 m² (100 ha)

10. Flowdir_sinks.tif
* Nom: Direction des écoulements (flowdir) LIDAXES2
* Description: Raster de direction des écoulements sur base d'un MNT où les dépressions ne débordant pas avec une pluie d'une période de retour de 100 ans ont été effacés. L'algorithme de direction de flux est l'algorithme implémenté sous SAGA dans l'outil "Channel Network (saga_cmd ta_channels 5)
* Système de coordonnées: Lambert Belge 1972 (EPSG:31370)
* Unité: mètre
* Étendue: 32011.000, 20011.000, 295991.000, 173991.000
* Résolution: 2
* Compression du fichier: algorithme DEFLATE, prédicteur 2 (corrélation spatiale), Z-level 9 (compression élevée)
* Format BigTIFF
* Raster tuilé
* Type de données: Byte
* Valeur no-data: 255
* Valeurs: Direction de flux classifiée selon le schéma d'ArcGIS
  * 1: E
  * 2: S-E
  * 4: S
  * 8: S-W
  * 16: W
  * 32: N-W
  * 64: N
  * 128 : N-E

11. MNT_sinks.tif
* Nom: Modèle numérique de terrain LIDAXES2
* Description: Raster du modèle numérique de terrain (MNT) où les dépressions ne débordant pas avec une pluie d'une période de retour de 100 ans ont été effacés.
* Système de coordonnées: Lambert Belge 1972 (EPSG:31370)
* Unité: mètre
* Étendue: 31999.000, 20001.000, 295999.000, 174001.000
* Résolution: 2
* Compression du fichier: algorithme DEFLATE, prédicteur 2 (corrélation spatiale), Z-level 9 (compression élevée)
* Format BigTIFF
* Raster tuilé
* Type de données: Float32
* Valeur no-data: 0
* Valeurs: Altitude en mètre.

12. MNT_sinks_rhw.tif
* Nom: Modèle numérique de terrain LIDAXES2 (sans rhw)
* Description: Raster du modèle numérique de terrain (MNT) où les dépressions ne débordant pas avec une pluie d'une période de retour de 100 ans et les axes des cours d'eau (RHW) ont été effacés.
* Système de coordonnées: Lambert Belge 1972 (EPSG:31370)
* Unité: mètre
* Étendue: 31999.000, 20001.000, 295999.000, 174001.000
* Résolution: 2
* Compression du fichier: algorithme DEFLATE, prédicteur 2 (corrélation spatiale), Z-level 9 (compression élevée)
* Format BigTIFF
* Raster tuilé
* Type de données: Float32
* Valeur no-data: 0
* Valeurs: Altitude en mètre.

13. MNT_sinks_rhw_berges.tif
* Nom: Modèle numérique de terrain LIDAXES2 (sans rhw ni berges)
* Description: Raster du modèle numérique de terrain (MNT) où les dépressions ne débordant pas avec une pluie d'une période de retour de 100 ans, les axes des cours d'eau (RHW) et les surfaces des grands cours d'eau (berges) ont été effacés.
* Système de coordonnées: Lambert Belge 1972 (EPSG:31370)
* Unité: mètre
* Étendue: 31999.000, 20001.000, 295999.000, 174001.000
* Résolution: 2
* Compression du fichier: algorithme DEFLATE, prédicteur 2 (corrélation spatiale), Z-level 9 (compression élevée)
* Format BigTIFF
* Raster tuilé
* Type de données: Float32
* Valeur no-data: 0
* Valeurs: Altitude en mètre.

14. GMPD.tif
* Nom: Modèle numérique de terrain LIDAXES2 (sans rhw ni berges)
* Description: Raster du modèle numérique de terrain (MNT) où les dépressions ne débordant pas avec une pluie d'une période de retour de 100 ans, les axes des cours d'eau (RHW) et les surfaces des grands cours d'eau (berges) ont été effacés.
* Système de coordonnées: Lambert Belge 1972 (EPSG:31370)
* Unité: mètre
* Étendue: 31999.000, 20001.000, 295999.000, 174001.000
* Résolution: 2
* Compression du fichier: algorithme DEFLATE, prédicteur 2 (corrélation spatiale), Z-level 9 (compression élevée)
* Format BigTIFF
* Raster tuilé
* Type de données: Float32
* Valeur no-data: 0
* Valeurs: Altitude en mètre.

15. Incertitude.tif
* Nom: Incertitude des écoulements
* Description: Raster d'incertitude des écoulements issu du raster GMPD
* Système de coordonnées: Lambert Belge 1972 (EPSG:31370)
* Unité: mètre
* Étendue: 31999.000, 20001.000, 295999.000, 174001.000
* Résolution: 2
* Compression du fichier: algorithme DEFLATE, prédicteur 2 (corrélation spatiale), Z-level 9 (compression élevée)
* Format BigTIFF
* Raster tuilé
* Type de données: Byte
* Valeur no-data: 255
* Valeurs: 1 - possibilité d'accumulation de flux
  0 - pas de possibilité d'accumulation de flux

Annexe 4 : Arbre des scripts de production

Les scripts permettant de reproduire les couches livrées dans le cadre de ce projet sont organisés selon la hiérarchie ci-dessous :

```
├── Axes
│   ├── Procedure_creation_Axes_polylines.txt
│   ├── Procedure_Exutoire.txt
│   ├── procedure.md
│   └── Script
│       ├── loop_bv
│       │   ├── breach_wb.py
│       │   ├── delete_files.py
│       │   ├── mosaic_mnt.py
│       │   └── processByBv.py
│       ├── loop_mnt
│       │   ├── aggregate.py
│       │   └── burn_breach_wb.py
│       └── wal
│           ├── formatRaster.py
│           └── mosaicWallonie.py
├── BVs
│   ├── Agregation_BVs
│   │   ├── BVs_sectorisation.py
│   │   ├── BVs_superieurs_et_MESU.py
│   │   └── Delimitation_BVs.tbx
│   ├── MNT_hydro
│   │   ├── 1_Aggregate_5m.py
│   │   ├── 2_Mosaic_DEMs_RW.py
│   │   ├── 3_Hydrological_processing_RW.py
│   │   └── 4_Delimitation_BVs_sectorisation_RW.py
│   ├── Procedure_BVs.txt
│   └── ZIT_Aqualim_et_Zones_de_baignade
│       ├── Delimitation_BVs_Stations_Aqualim.py
│       ├── Delimitation_BVs_ZITs.py
│       └── Delimitation_BVs_Zones_de_Baignade.py
└── Streams
    ├── procedure.md
    └── Script
        ├── loop_bv
        │   ├── processByBv.py
        │   └── processZC.py
        ├── loop_mnt
        │   ├── burn_breach_wb.py
        │   └── filter.py
        └── wal
            ├── mergeDownslopeShp.py
            └── mergeShp.py
```

Annexe 5 : Liste des BVs demandant une attention particulière

ZIT :

- L6490 – Latour : pas d'axe de ruissellement modélisé
- L6820 et L6821 : identiques, doublon ?

Zones de baignade

- Code H05 – Le Centre sportif de Libramont : milieu fort urbanisé et pas de cours d'eau…
- Code E03 – Le grand large à Nimy : incertitude sur le sens d'écoulement et donc sur le BV

Stations Aqualim

- Pas calculés
    - Pas de coordonnées : L5070 et L5940
    - Pas à calculer : T0031 et T0032
    - En dehors du domaine de calcul : L7270 et L7330
- Différence entre nom du cours d'eau du RHW et de la station
    - L5050 : Ris d'AVE vs. Ruisseau de Wareille
    - L5960 : Verne de Bury vs. Verne blanche
    - L6730 : By vs. Wampe, recalé sur Wampe à 110 m
    - L6780 Ruisseau des Fonds de Foret vs. Magne
    - L5030 : Boyes vs. Ruisseau de Tellin
- Pas d'information précise et proche de la limite du domaine de calcul
    - L6740, L6750, L7250, L7940, L7950
- Pas d'information précise
    - T0019 : recalé au plus proche et déplacé de 460 m
- Coordonnées identiques
    - L5520 / L5521
    - L6860 /L6861
    - L7110 / L7111
    - T0008 / T0009 / T0010
    - T0033 / L7560
    - L5710 / L7180
    - T0013 / L8220
    - L5681 / L5680
    - L5181 / L7240 : recalés comme L5182
- Ambiguïté par rapport à la donnée modélisée (distance de déplacement lorsque significative)
    - L5830, L6530, L6640, L7400, L8000, L8350, L6610, L6890, L7610
    - L7160 (230 m)
    - L7420 (60 m)
    - L7570 (160 m)
    - T0022 (30 m)
    - L7210 (40 m)
    - L6360 (100 m)
    - L5182 (140 m)