



Gembloux Agro-Bio Tech
Université de Liège

Gembloux Agro-Bio Tech

Département BIOSE

Axe Gestion des Ressources forestières
et des Milieux naturels

INTEGRATION D'UN MONITORING DES SECTEURS DE COURS D'EAU
DANS LE CADRE DES PROGRAMME D' ACTIONS SUR LES RIVIERES PAR
UNE APPROCHE INTEGREE ET SECTORISEE (PARIS)

« IMAGEAU 3 »

Rapport final

Novembre 2015



Gembloux Agro-Bio Tech
Université de Liège

Gembloux Agro-Bio Tech

Département BIOSE

Axe Gestion des Ressources forestières
et des Milieux naturels

INTEGRATION D'UN MONITORING DES SECTEURS DE COURS D'EAU
DANS LE CADRE DES PROGRAMME D' ACTIONS SUR LES RIVIERES PAR
UNE APPROCHE INTEGREE ET SECTORISEE (PARIS)

« IMAGEAU 3 »

Rapport final

Novembre 2015

Encadrement scientifique : Hugues Claessens

Personnel sous contrat : Frédéric Henrotay
Coralie Mengal
Adrien Michez



Convention financée par le Service public de Wallonie - DG03
Direction des Cours d'Eau Non-Navigables (DCENN)



TABLE DES MATIÈRES

0. Préambule	4
1. Introduction.....	5
2. Développement d'outils pour la surveillance des cours d'eau au niveau local à l'aide de drones	7
2.1. <i>Méthodologie</i>	7
2.1.1. Sites	8
2.1.2. Acquisition des images drone	10
2.1.3. Chaîne de traitement photogrammétrique.....	10
2.1.4. Jeux de données de référence	11
2.1.5. Segmentation.....	11
2.1.6. Extraction de variables descriptives	11
2.1.7. Classification supervisée	11
2.2. <i>Résultats</i>	12
2.3. <i>Discussion</i>	13
3. Caractérisation des bandes riveraines à l'échelle régionale	14
3.1. <i>Production et qualité des données utilisées pour la construction des indicateurs</i>	16
3.1.1. Génération des Modèles Numériques de Surface photogrammétriques 2006 2009 2012 16	
Méthodologie.....	16
Evaluation de la qualité de l'aérotriangulation.....	21
Résultats	21
Aérotriangulation :	21
Génération d'un modèle 3D (corrélation dense) à l'échelle régionale.....	22
3.1.2. Cartographie de la hauteur de la végétation à l'échelle régionale - Production de Modèles Numériques de Hauteur	22
Méthodologie.....	22
Production de la donnée	22
Evaluation de la qualité	23
Résultats	24
MNH LiDAR.....	24

MNH hybride 2012	27
Comparaison MNH hybride 2012 et MNH LiDAR	27
MNH hybride 2009 et 2006.....	28
Conclusions - section « cartographie de la hauteur des forêts à l'échelle régionale »	30
3.1.3. Cartographie des cours d'eau à l'aide de la donnée LiDAR	31
Cartographie du tracé des secteurs de 2 ^{ème} et 3 ^{ème} catégories	31
Méthodologie.....	31
Résultats	33
Cartographie du tracé des cours d'eau non-classés : cas de la vallée de la Lesse	35
Méthodologie.....	35
Résultats	36
Cartographie des secteurs de 1 ^{ère} catégorie et navigables.....	39
Méthodologie.....	39
Résultats	43
Conclusions - section « Cartographie des cours d'eau à l'aide de la donnée LiDAR »	47
3.2. Caractérisation des secteurs à l'échelle régionale	48
3.2.1. Méthodologie.....	48
Construction des indicateurs hydromorphologiques	48
Procédure de désagrégation et réagrégation	48
Extraction de variables morphologiques	52
Extraction de variables « ripisylves ».....	57
Extraction de variables dérivées de données vectorielles.....	60
Utilisation d'indicateurs multitemporels	60
Relations entre les indicateurs (analyses ACP)	60
Développement d'outil de visualisation des caractéristiques des secteur individuel	61
Visualisation de profils à l'échelle du secteur : profil en travers et profil en long.....	61
Visualisation de l'évolution amont/aval à l'échelle du secteur individuel	61
Synthèse à l'échelle du secteur.....	61
3.2.2. Résultats	62
Calcul des variables descriptives à l'échelle régionale	62
Cas de la largeur de l'aléa et de la largeur des cours d'eau.....	62
Production d'un axe de vallée	64
Analyse multivariée et pertinence des indicateurs	64
Réagrégation pour une visualisation de paramètre à l'échelle régionale : cas des masses d'eau et des variables 'ripisylves'	69
Analyse multitemporelle : cas de la continuité longitudinale.....	72

Développement d’outil de visualisation des caractéristiques des secteur individuel	74
Visualisation de profils à l’échelle du secteur : profil en travers et profil en long	74
Visualisation de l’évolution amont/aval à l’échelle du secteur individuel	76
Synthèse à l’échelle du secteur	79
4. Appareillage des secteurs ‘GUYON’ et potentialité d’automatisation de l’évaluation des masses d’eau	81
Appareillage des sectorisations PARIS et GUYON:.....	81
5. Conclusions / Synthèse des principaux résultats	84
Surveillance des cours d'eau au niveau local à l'aide de drones	84
Caractérisation des bandes riveraines à l’échelle régionale	84
Cartographie de la hauteur de la végétation à l’échelle régionale	84
Cartographie des cours d’eau à l’aide de la donnée LiDAR	85
Caractérisation des secteurs à l’échelle régionale	85
6. Perspectives	86
7. Publications scientifiques	87
8. Collaborations.....	88
9. Colloques, voyages d'études.....	88

0. PRÉAMBULE

Le présent rapport est le rapport final du projet Imageau 3 (01/06/2014 au 30/11/2015). Les recherches ont été menées par Adrien Michez, bioingénieur, avec l'appui technique de Frédéric Henrotay et Coralie Mengal, gradués. Elles bénéficient de l'encadrement scientifique du Professeur Hugues Claessens et sont placées sous la direction du Professeur Philippe Lejeune. La convention s'inscrit dans une suite logique de collaborations entre la DCENN et la Faculté Gembloux Agro-Bio Tech (ULg) en matière de caractérisation des cours d'eau à l'aide de la télédétection.

Après une première phase prospective¹, le premier projet Imageau² a évalué, sur différents sites pilotes, le potentiel de la télédétection pour la caractérisation des bandes riveraines, tant à l'échelle locale (usage des drones) qu'à l'échelle régionale (LiDAR aérien). Le projet Imageau 2³ a été quant à lui consacré au développement d'une méthode de caractérisation des secteurs à l'aide de données tri-dimensionnelles au sein de deux zones pilotes : les vallées du Viroin et de la Houille. Le présent projet, Imageau 3, vient finaliser la démarche en proposant l'implémentation des méthodologies développées sur l'ensemble du territoire wallon.

Le présent rapport se veut un document de synthèse des recherches ayant abouti aux résultats engrangés lors du projet Imageau 3. Certains éléments sont issus des précédents rapports dans le but de rendre ce document 'auto-portant'.

¹ Marché de services « *Potentialités de l'analyse d'images pour la sectorisation des cours d'eau wallons : cas des données de type LIDAR aéroporté* » (3,5 mois : 01/01/2012 - 15/04/2012).

² Convention « *Potentialités de l'outil « analyse d'images » dans le cadre de la gestion intégrée des cours d'eau wallons : PROJET IMAGEAU* » (12 mois : 01/06/2012 – 01/07/2013)

³ Convention « *Exploitation des données aéroportées (lidar et drone) dans le cadre des programmes d'actions sur les rivières par une approche intégrée et sectorisée (PARIS) : projet IMAGEAU 2* » (8 mois : 01/07/2013 - 28/02/2014)

1. INTRODUCTION

La Wallonie a entériné (séance du 8 mars 2012 du Gouvernement wallon) la future application des Programmes d'Actions sur les Rivières par une approche Intégrée et Sectorisée (PARIS). Les PARIS ont pour but l'intégration dans le temps et dans l'espace, de l'ensemble des mesures de gestion spécifiques du linéaire de cours d'eau en fonction d'enjeux prioritaires identifiés à l'échelle d'unités de gestion homogènes ("secteurs"). La mise en place et le suivi de ces plans de gestion implique le développement d'outils de suivi efficaces, permettant d'établir les états des lieux nécessaires à la planification des actes de gestion, et à terme, d'évaluer l'efficacité desdits plans de gestion. Les outils de suivi des PARIS devront permettre des évaluations régulières et standardisées afin de pouvoir être appliqués à l'ensemble des cours d'eau classés wallons (12.700 km).

Dans ce contexte, une collaboration a été initiée entre Gembloux Agro-Bio Tech et la DCENN afin d'évaluer la potentialité de la télédétection, notamment comme source efficace et économique d'informations sur les secteurs de gestion. Le premier projet Imageau a permis de mettre en évidence le potentiel de la télédétection pour la gestion de cours d'eau à travers l'évaluation en différentes zones de test de deux types de données : les données produites à partir d'images acquises avec un micro-drone ainsi que les données extraites d'un nuage de points « LiDAR ». Les résultats engrangés ont permis de mettre en évidence le potentiel des données LiDAR pour la caractérisation des cours d'eau à l'échelle régionale (plusieurs milliers de km de cours d'eau) ainsi que le potentiel des drones pour des caractérisations au niveau local (quelques dizaines de km). A travers les informations cruciales qu'elle fournit à l'échelle de l'ensemble du réseau surveillé (continuité et hauteur des cordons rivulaires, distribution, enrésinement, proximité de l'eau, ...), l'exploitation de l'information fournie par les données LiDAR pourrait constituer un élément essentiel du suivi des PARIS, et d'une manière générale de l'impact des politiques de gestion.

Vu qu'une couverture régulière de la Wallonie avec une donnée de type LiDAR haute densité n'est pas à l'ordre du jour malgré un intérêt indéniable, l'objectif principal du projet Imageau 2 était le développement d'alternatives méthodologiques au LiDAR haute densité. Selon une approche pragmatique et pour garantir une plus grande transférabilité des résultats, les méthodes développées ont été dérivées de données tridimensionnelles disponibles sur l'ensemble du territoire wallon et dont l'acquisition était garantie dans un futur proche. Le projet Imageau 2 a permis de définir les bases des différents aspects de l'utilisation opérationnelle de la donnée tridimensionnelle à l'échelle du territoire wallon, de la génération des modèles numériques de surfaces photogrammétriques aux routines géomatiques permettant de valoriser la grande quantité de données. Imageau 2 ayant été centré sur les vallées pilotes du Viroin et de la Houille, le principal objectif du projet Imageau 3 était d'implémenter les méthodes développées précédemment à l'ensemble du territoire wallon. L'aboutissement de cette démarche mènera à l'établissement d'un système de référence et de monitoring de la qualité hydromorphologique des cours d'eau, en lien direct avec les PARIS et en relation avec les besoins en information des gestionnaires de cours d'eau.

Plus techniquement, le projet Imageau 3 peut être décliné selon 5 objectifs :

- valider/modifier avec les gestionnaires de terrain les indicateurs développés dans la zone pilote lors du projet IMAGEAU 2 et application à l'ensemble du linéaire des 13.000 km de cours d'eau classés de Wallonie ;
- intégrer ces indicateurs à l'application informatique PARIS (phase de test imminente) de la manière la plus automatisée possible ;
- intégrer une composante temporelle, permettant la réactualisation automatique et systématique des indicateurs (3 ans, soit un "demi" PARIS pour les indicateurs "ripisylve") ;
- étudier la possibilité de sectoriser certains linéaires de cours d'eau non classés dans des zones prioritaires à déterminer en accord avec la DCENN (adaptation de la méthodologie de la sectorisation, de la typologie des secteurs...) ;
- maintenir une veille technologique et scientifique concernant les outils de surveillance des cours d'eau à l'aide de drones.

2. DÉVELOPPEMENT D'OUTILS POUR LA SURVEILLANCE DES COURS D'EAU AU NIVEAU LOCAL À L'AIDE DE DRONES

Au départ, cet axe secondaire avait été envisagé comme une veille scientifique sur la question de l'apport des drones pour la gestion des cours d'eau. Le temps dégagé par les retards de livraison des fichiers .LAS a permis de réaliser une réflexion synthétique sur la question de la cartographie des plantes invasives. Cette activité était initialement prévue au sein du projet Imageau 2 mais avait été laissée en suspens, en accord avec la DCENN, en raison de choix stratégiques en termes d'allocation du temps de travail (réponse à l'appel Belspo Stereo III).

Le premier projet Imageau ayant investigué les potentialités du drone en matière de cartographie de la balsamine de l'Himalaya et de la berce du Caucase, le projet Imageau 2 s'est attelé à une troisième espèce ayant fortement colonisé le réseau hydrographique wallon : la renouée du Japon (*Fallopia japonica*). Un jeu de données de référence a été acquis sur l'ensemble du linéaire de l'Orneau (9 vols nécessaires), avec une acquisition simultanée de données de référence au sol. Dans le cadre du présent projet, une analyse globale et croisée des résultats obtenus pour ces 3 invasives a été réalisée. Ces résultats font l'objet d'une publication en phase finale de rédaction.

2.1. MÉTHODOLOGIE

La méthodologie développée (Figure 1) est basée sur l'approche mise en œuvre dans le cadre du volet « drone » du projet Imageau 1. Cette approche a été retravaillée et affinée, avec une vocation plus opérationnelle, afin de pouvoir faire le bilan de l'applicabilité des drones en termes de potentiel outil de gestion de ces espèces. Elle s'appuie sur différentes plateformes telles que ArcGIS ou des outils plus spécifiques tels que eCognition (segmentation des images), PhotoScan (photogrammétrie) et R (statistiques et construction des modèles de classification).

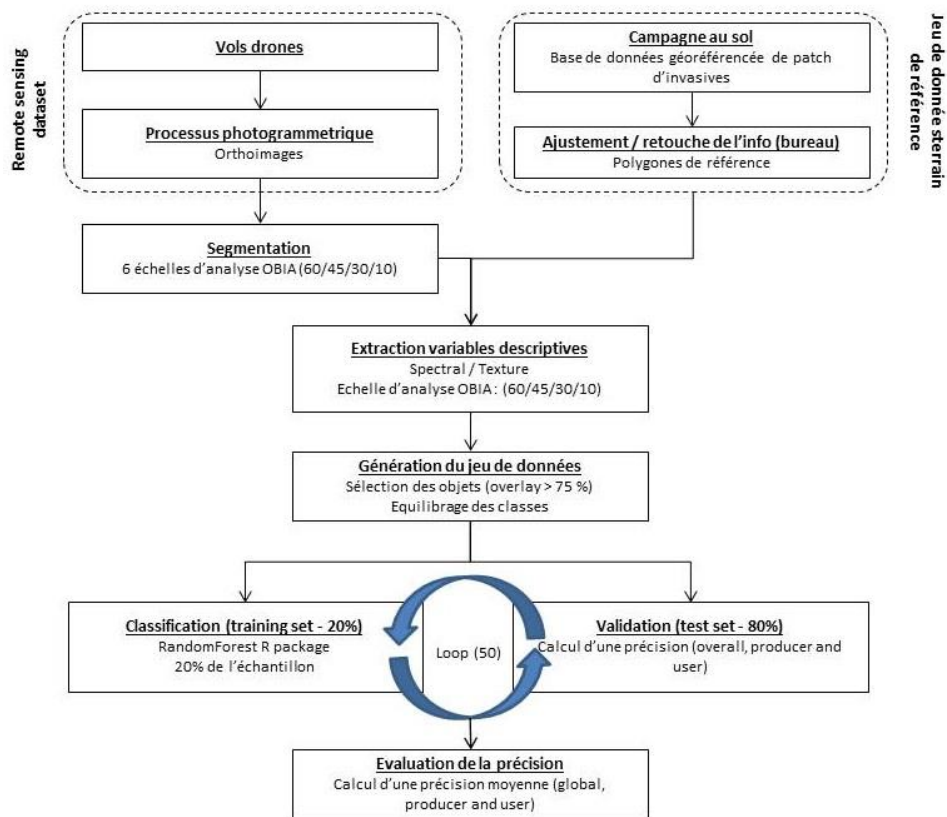


FIGURE 1: SCHÉMA GÉNÉRAL DE LA MÉTHODOLOGIE UTILISÉE POUR LA CONSTRUCTION DES MODÈLES DE CLASSIFICATION

2.1.1. SITES

Les sites étudiés sont centrés sur les bandes riveraines de 2 vallées, la Berwinne (zone de Berneau) et la basse vallée de l'Orneau (Figure 2 et Figure 3). La Berwinne a été choisie pour l'étude des populations de Balsamine et de renouées, tandis que l'Orneau a été choisi pour ses importantes populations de renouées.

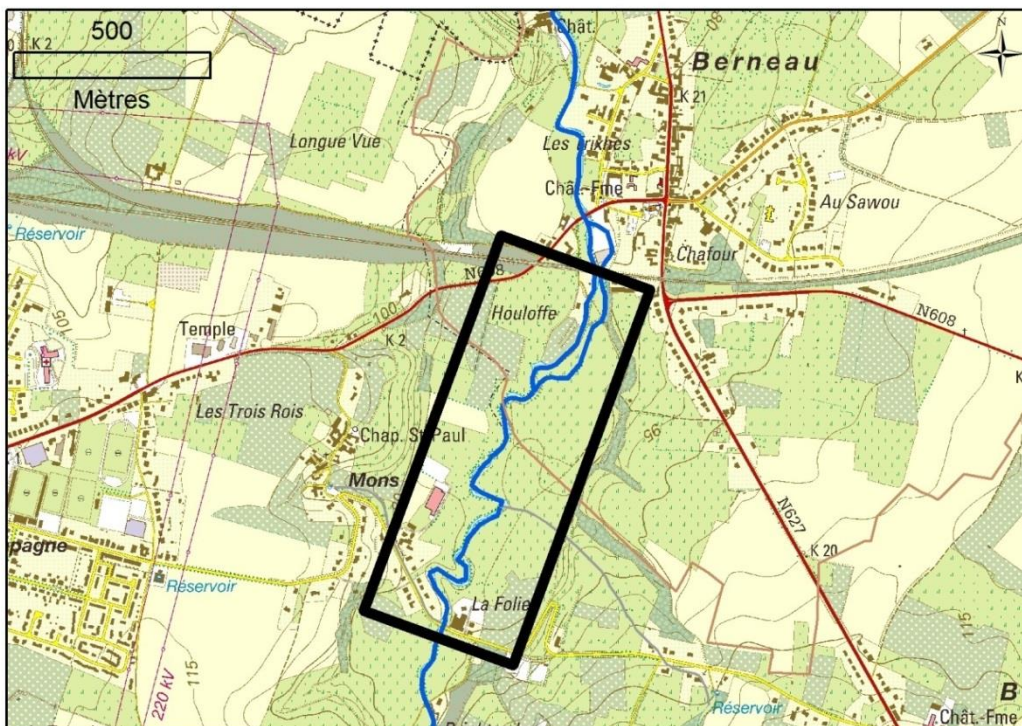


FIGURE 2 : DRONE ET CARTOGRAPHIE DES PLANTES INVASIVES : VALLÉE DE LA BERWINNE

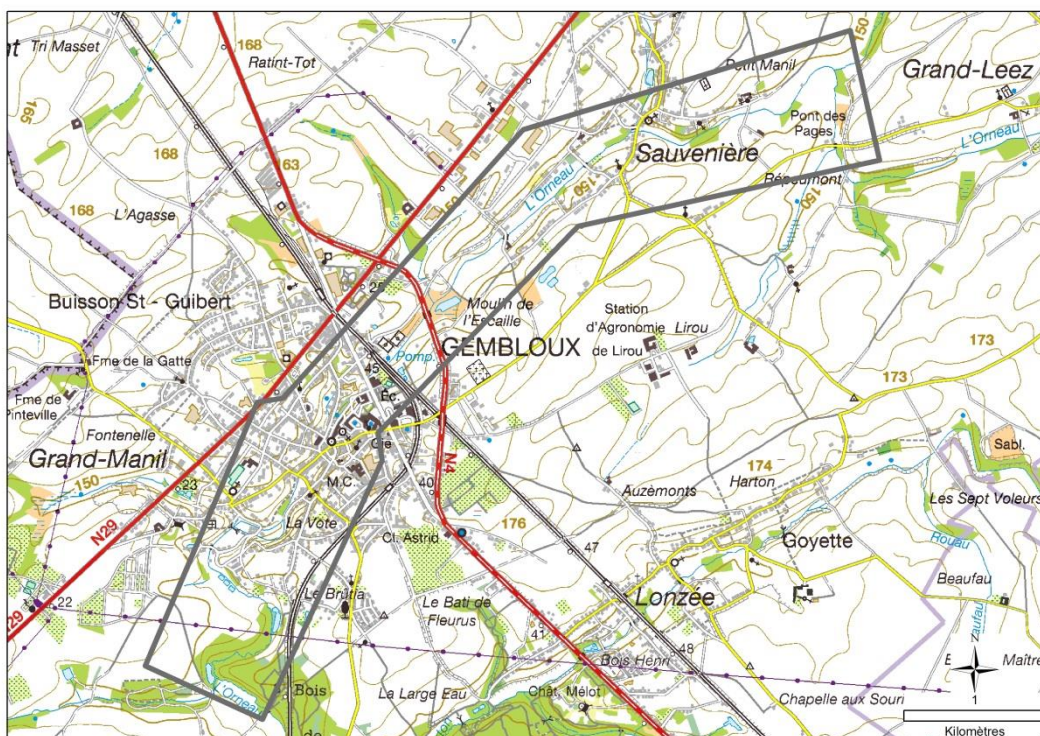


FIGURE 3 : DRONE ET CARTOGRAPHIE DES PLANTES INVASIVES : VALLÉE DE L'ORNEAU

2.1.2. ACQUISITION DES IMAGES DRONE

Les acquisitions ont été réalisées à l'aide du drone Gatewing X100 (portée : 1 m ; poids : 2 kg ; vitesse : 80 km/h ; hauteur de vols : 100 m to 750 m). De plus amples informations sur les caractéristiques ainsi que l'utilisation du drone X100 sont disponibles au sein du rapport du premier projet Imageau.

Sept vols ont été exploités dans le cadre de cette analyse (Table 1). Chaque vol correspond à un stade phénologique au cours duquel la détectabilité de l'espèce au sein de son environnement est supposée maximale. La floraison a été choisie pour les cas des berces du Caucase et des balsamines, tandis que l'automne et le jaunissement des feuilles ont été choisis pour les renouées.

TABLE 1: ACQUISITIONS RÉALISÉES À L'AIDE DU X100 (GSD: GROUND SAMPLING DISTANCE (ORTHO PHOTO); PHÉNOLOGIE : STADE PHÉNOLOGIQUE DE L'ESPÈCE CIBLÉE)

Date	Espèce ciblée	Phénologie	Capteur	Images (n)	Altitude (m)	Superficie (km ²)	GSD (m)
12/06/2012	Berce du Caucase	Floraison	RGB	501	200	0.75	0.05
12/06/2012	Berce du Caucase	Floraison	RGNIR	426	200	0.75	0.05
24/07/2012	Balsamine	Floraison (début)	RGB	643	150	0.75	0.05
24/07/2012	Balsamine	Floraison (début)	RGNIR	465	150	0.75	0.05
5/09/2012	Balsamine	Floraison (fin)	RGB	371	150	0.75	0.05
5/09/2012	Balsamine	Floraison (fin)	RGNIR	373	150	0.75	0.05
1/10/2012	Renouées (site 1)	Jaunissement feuilles	RGB	1115	300	8	0.10
24/10/2012	Renouées (site 2)	Jaunissement feuilles	RGB	407	300	2	0.10

2.1.3. CHAÎNE DE TRAITEMENT PHOTOGRAMMÉTRIQUE

L'ensemble de la chaîne de traitement photogrammétrique a été développée avec Agisoft Photoscan 1.0 professional. Chaque vol a été traité selon le schéma simplifié présenté en Figure 4.

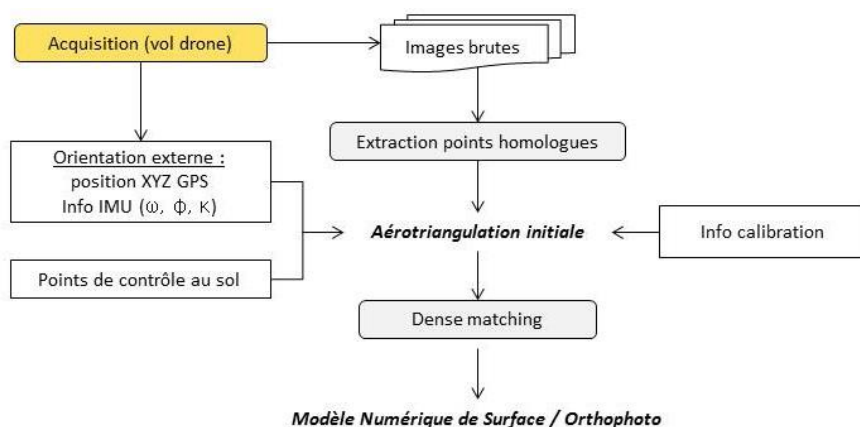


FIGURE 4: PROCESSUS PHOTOGRAMMÉTRIQUE

Une orthophoto ainsi qu'un modèle numérique de surface ont été générés pour chacun des vols. La génération des orthophoto a été réalisée avec l'option « correction des couleurs » active ainsi que le blending mode « Mosaic ».

2.1.4. JEUX DE DONNÉES DE RÉFÉRENCE

Une base de données d'objets de référence a été constituée pour les 3 espèces étudiées (Table 2). Cette base de données est composée de polygones délimités sur base de visites terrain ainsi que d'un ajustement et/ou d'une délimitation au bureau, sur base des orthos réalisées à l'aide des images du drone.

TABLE 2 : BASE DE DONNÉES DE RÉFÉRENCE

Espèces	Superficie	Objet	Date du relevé terrain
H. mantegazzianum	34.4	Ombelles	12/06/2012
I. glandilifera	586.4	Populations en fleur	22/08/2012
Japanese knotweed	5646.2	Plages de renouées	15/10/2012

2.1.5. SEGMENTATION

La segmentation des orthoimages a été réalisée dans le logiciel eCognition, sur base des informations spectrales disponibles pour la date considérée. L'algorithme utilisé est un algorithme de type « region growing » qui, au départ d'un pixel initial, fusionne les pixels voisins en fonction de leur similarité jusqu'à une taille seuil paramétrée au préalable. Le processus résulte en une division de l'image en objets, dont la taille et la forme sont dépendantes des paramètres introduits par l'utilisateur (paramètre d'échelle et d'homogénéité) ainsi que des données images en entrée. Afin d'identifier l'échelle d'analyse la plus pertinente, plusieurs valeurs du paramètre d'échelle ont été testées (10, 30, 45 et 60). Les paramètres liés à l'homogénéité des objets ont été maintenus aux valeurs par défaut (*shape* = 0.1 et *compactness* = 0.5).

2.1.6. EXTRACTION DE VARIABLES DESCRIPTIVES

Les variables descriptives sont, dans notre cas, extraites à partir de statistiques dérivées de l'imagerie drone à une échelle d'analyse correspondant à un objet segmenté. En plus des variables directement dérivées de l'information spectrale, eCognition permet le calcul d'indices texturaux. Ces indices permettent notamment de mettre évidence d'éventuels motifs ou formes au sein d'une image. Cette information est moins sensible aux différences entre images liées à l'ensoleillement différentiel.

Cinq indices de texture dérivés de la matrice GLCM (*Grey Level Co-occurrence Matrix*) ont été calculés dans le cadre de cette étude : *Entropy*, *Standard deviation*, *Correlation*, *Mean* et *Contrast*.

2.1.7. CLASSIFICATION SUPERVISÉE

Les algorithmes de type « forêts aléatoires / *random forests* » (RF), implémentés dans R, ont été utilisés pour réaliser les différents projets de classification supervisée et identifier les variables les plus pertinentes pour mener à bien ces projets. Les RF permettent de gérer des jeux de données d'une grande complexité, la diversité des arbres de classification construits permet de construire des modèles robustes, même en présence de variables « bruitées ».

Pour chaque échelle d'analyse OBIA (10, 30, 45 et 60), les objets « plantes invasives » sont sélectionnés parmi l'ensemble des objets segmentés sur base de leur recouvrement (> 75%) avec la base de données d'objets de référence (Figure 5). Un échantillonnage aléatoire sans remise est

réalisé afin de retrouver un nombre d'objets similaires au sein des différentes classes. Ce jeu de données initial est par la suite divisé en un jeu d'apprentissage (20%) et de validation (80%).

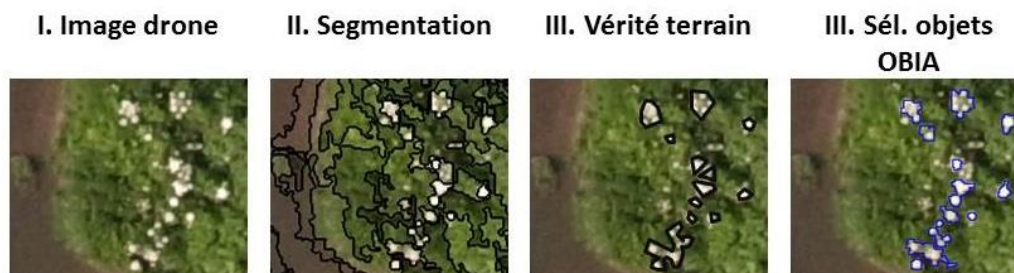


FIGURE 5: GENERATION DE LA BASE DE DONNÉES DE RÉFÉRENCE (CAS DE LA BERCE)
I. ORTHO (RGB); II. SEGMENTATION; III. VÉRITÉ TERRAIN ; IV. OBJETS SEGMENTÉS SÉLECTIONNÉS

La précision globale est évaluée sur base d'un processus de validation croisée. Le modèle RF construit sur base du jeu d'entraînement est appliqué et validé sur le jeu de données de validation. Etant donné le caractère partiellement aléatoire de la construction des RF, le processus est répété (50 x) afin de calculer des valeurs moyennes (+/- écart type) de précision relatives aux différents scénarios de classification.

2.2. RÉSULTATS

Le Table 3 reprend l'ensemble des résultats et ce, pour les 3 espèces aux différentes dates de vols. L'échelle d'analyse OBIA 10 (paramètre *scale*) fournit les meilleurs résultats pour la balsamine et la renouée, tandis que l'échelle OBIA 30 produit les meilleurs résultats en termes de classification de la berce du Caucase.

TABLE 3: ETUDE LA PRÉCISION EN FONCTION DE L'ÉCHELLE D'ANALYSE.
GLOBAL ACCURACY (GA) MOYENNE +/- S.D. ; INDICE DE KAPPA (KI) MOYEN +/- S.D. * SCORE MAXIMAL POUR CHAQUE CLASSIFICATION

Réf classification	Echelle d'analyse OBIA							
	60		45		30		10	
	KI	GA	KI	GA	KI	GA	KI	GA
<i>I. glandilifera</i> (07/2012)	17 +/- 13	58 +/- 6.5	24 +/- 8	62 +/- 4	31 +/- 5	66 +/- 3	37 +/- 2	68 +/- 1 *
<i>I. glandilifera</i> (09/2012)	23 +/- 12	62 +/- 6	22 +/- 11	61 +/- 6	30 +/- 6	65 +/- 3	45 +/- 2	72 +/- 1 *
<i>H. mantegazzianum</i> (06/2012)	91 +/- 6	96 +/- 3	92 +/- 5	96 +/- 3	93 +/- 5	97 +/- 2 *	89 +/- 2	95 +/- 1
Japanese knotweed (10/2012)	17 +/- 16	58 +/- 8	32 +/- 13.1	66 +/- 7	29 +/- 10	64 +/- 5	38 +/- 3	69 +/- 2 *

La balsamine ne présentant pas de véritable pic de floraison, deux vols ont été réalisés pendant la période de floraison. L'acquisition en période tardive est la plus efficace. Ceci correspond également au ressenti des opérateurs quant à la meilleure distinction des balsamines par rapport à leur environnement lors de la visite terrain contemporaine à l'acquisition drone.

La synthèse (Table 4) permet d'identifier les variables les plus utilisées dans les différents projets de classification. On peut noter que les variables texturales sont effectivement utilisées dans l'ensemble des scénarios.

TABLE 4: VARIABLES SÉLECTIONNÉES (TOP 3 GINI INDEX) POUR LES MODÈLES LES PLUS PERFORMANTS
* VARIABLE DÉRIVÉE D'IMAGERIE DRONE AVEC PROCHE INFRA-ROUGE

<i>I. glandilufera</i> (07/2012)	GLCM contrast	GLCM homogeneity	GLCM homogeneity *
<i>I. glandilufera</i> (09/2012)	S.D. Green *	S.D. NIR *	GLCM Mean
<i>H. mantegazzianum</i> (06/2012)	GLCM Homogeneity	S.D. Red	S.D. Green *
Japanese knotweed (10/2012)	Mean Red	Mean Blue	Brightness

2.3. DISCUSSION

L'analyse croisée de l'ensemble des résultats atteints permet de faire un bilan des projets de cartographie des plantes invasives des bandes riveraines de Wallonie à l'aide d'imagerie drone. Les résultats atteints pour la balsamine et la renouée ne permettent pas d'envisager d'application immédiate et opérationnelle en raison du niveau trop faible de la précision des classifications. Les performances plus faibles observées pour ces 2 espèces peuvent notamment être expliquées par les conditions in situ de ces 2 espèces. Les populations de balsamine, même en fleur, ne forment pas un couvert continu, laissant généralement une part importante à la végétation indigène pouvant « polluer » le signal attribué à la balsamine. Les moins bons résultats de la renouée sont quant à eux probablement à attribuer à une trop grande hétérogénéité des orthoimages acquises. En effet, la période d'acquisition étant automnale, les rapides baisses de luminosité entraînent une plus grande variabilité des conditions d'acquisition au sein d'une même journée. Les renouées formant des populations denses, avec des taux de recouvrement proches de 100%, de meilleurs scores peuvent très certainement être obtenus en améliorant les conditions d'acquisition, quitte à acquérir ces images en dehors d'un stade phénologique supposé discriminant. Les renouées ayant un taux de recouvrement important tout au long de la saison de végétation, l'utilisation des couvertures Ortho du SPW pourrait permettre de travailler à une échelle régionale.

Les résultats obtenus (Kappa index > 90%) pour la berce du Caucase sont beaucoup plus prometteurs, et laissent entrevoir la possibilité d'applications opérationnelles. En effet, dans notre cas d'étude, le modèle de classification présente une très grande performance malgré un entraînement de l'algorithme sur un sous échantillon de 20%, ce qui représente 10 ombelles digitalisées. Les modèles de classification pour cette espèce peuvent donc être construits avec un jeu de données d'entraînement qui peut être rapidement acquis, permettant d'utiliser cet outil pour des tâches de planification/ suivi / évaluation de chantiers de gestion de cette espèce prioritaire.

3. CARACTÉRISATION DES BANDES RIVERAINES À L'ÉCHELLE RÉGIONALE

Les différents projets Imageau ont permis le développement d'indicateurs de la qualité des bandes riveraines associées aux secteurs de gestion PARIS. La Table 5 liste les indicateurs proposés à la fin du projet Imageau 2 dont l'implémentation à l'échelle régionale était au cœur du projet Imageau 3. A la demande de la DCENN, une réflexion sur la possibilité d'ajouts d'indicateurs et/ou d'outil à vocation plus morphologique a été menée. Ces indicateurs sont présentés à la section 3.2.1 - *Construction des indicateurs hydromorphologiques*. La vocation des projets Imageau étant une caractérisation automatisée de l'ensemble des secteurs de gestion PARIS, les indicateurs développés ont tous été dérivés de données tridimensionnelles disponibles sur l'ensemble de la région.

TABLE 5: INDICATEURS "IMAGEAU 2", DONNÉES SOURCE ET FRÉQUENCE DE MISE À JOUR POTENTIELLE

Variable	Echelles d'analyse	Description	Données sources			Fréquence de mise à jour potentielle
			MNH Hybride	LiDAR	Autre	
H_{mean}		Hauteur moyenne de la ripisylve	X			Trisannuelle (annuelle en 2017)
MeanCont	Lit mineur +6m, +12m ; Lit majeur	Continuité longitudinale moyenne	X			Trisannuelle (annuelle en 2017)
MeanCont _{global}		Continuité longitudinale globale	X			Trisannuelle (annuelle en 2017)
CV_ripi		Coefficient de variation de la hauteur	X			Trisannuelle (annuelle en 2017)
Dist _{road}	Lit majeur	Distance moyenne au réseau routier			X	Inconnue (mise à jour BD routière) mais peu nécessaire
H_{rel_glob}	Lit mineur +6m, +12m ; Lit majeur	Hauteur relative globale		X		Inconnue (nouvelle acquisition LiDAR)
Largeur _{C1}	Lit mineur	Largeur indicative (1 ^{ère} catégorie uniquement)		X		Inconnue (nouvelle acquisition LiDAR)
H_{rel_ripi}	Lit mineur +6m, +12m ; Lit majeur	Hauteur relative de la ripisylve	X	X		Inconnue (nouvelle acquisition LiDAR)
Ferraris _{prop}	Lit majeur	Portion du linéaire faisant partie de massifs forestiers sur la carte de Ferraris (18 ^{ème} siècle)			X	Sans objet, donnée historique

La disponibilité en données issues de la télédétection est importante en Wallonie, avec notamment une couverture LiDAR acquise au cours des hivers 2013 et 2014. Cette couverture étant de type « basse densité » (0.8 point / m²), une réplique « à l'identique » de la méthode développée lors du premier projet Imageau ne peut donc pas être envisagée notamment en raison des lacunes observées localement au sein du Modèle Numérique de Hauteur. Le projet Imageau 2 a permis de tester la possibilité de compléter l'information lacunaire du jeu de donnée LiDAR à l'aide de données issues de la photogrammétrie. Les progrès récents en matière de photogrammétrie, notamment l'émergence des technologies de vision par ordinateur, ont permis le développement de nouvelles solutions logicielles permettant l'extraction d'informations tridimensionnelles dérivées d'images prises avec un recouvrement spatial. En Wallonie, grâce à une initiative conjointe de l'IGN et du SPW, les couvertures ortho sont acquises avec un recouvrement entre images depuis 2006. Cette caractéristique permet d'envisager la reconstruction de Modèles Numériques de Surface pour les différentes « campagnes orthos » depuis cette date.

La combinaison des Modèles Numériques de Surface (photogrammétriques) au Modèle Numérique de Terrain (LiDAR basse-densité) permet la génération de Modèles Numériques de Hauteur à l'échelle régionale (Figure 6) et ce, pour les 3 périodes couvertes par les campagnes ortho du SPW.

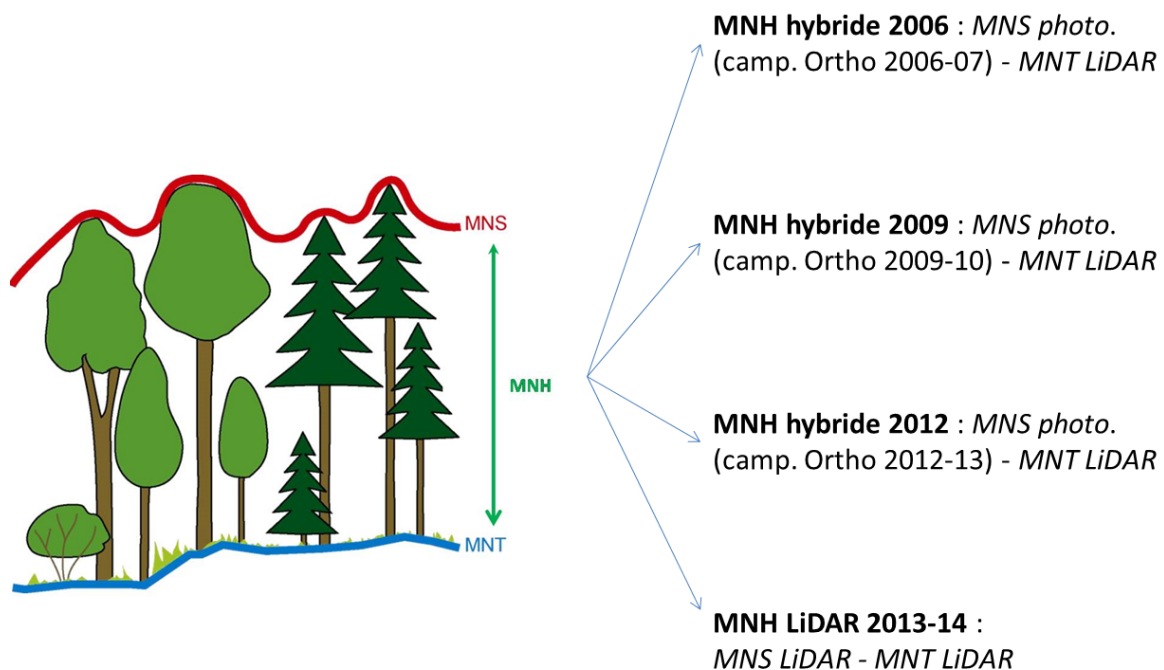


FIGURE 6 : MODÈLES NUMÉRIQUES DE HAUTEUR POTENTIELLEMENT DISPONIBLE À L'ÉCHELLE RÉGIONALE DÉRIVÉS DE DIFFÉRENTS NUMÉRIQUES DE SURFACE ET D'UN MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN LIDAR UNIQUE

Les principales données de référence utilisées dans le cadre de la caractérisation des secteurs PARIS sont de 3 types :

- **Modèles Numériques de Hauteur** (cf. Figure 6) sont utilisés principalement dans le cadre de la caractérisation (multi-temporelle) des ripisylves ;
- **Modèle Numérique de Terrain** : dérivé du nuage de points LiDAR ;

- **Position et emprise du cours d'eau** : issus du nuage de points LiDAR brut.

Ces données constituent la principale source de données utilisées lors de la construction des indicateurs. En suivant les approches méthodologiques développées au sein des précédents projets, les indicateurs ne font pas l'objet d'une validation en tant que telle, mais à travers la validation des données de référence à partir desquelles ils sont construits.

3.1. PRODUCTION ET QUALITÉ DES DONNÉES UTILISÉES POUR LA CONSTRUCTION DES INDICATEURS

3.1.1. GÉNÉRATION DES MODÈLES NUMÉRIQUES DE SURFACE PHOTOGRAMMÉTRIQUES 2006 2009 2012

Le projet Imageau 2 a permis le développement d'une méthode de génération d'un modèle numérique de surface au sein de la plateforme open source MicMac développée par l'Institut Géographique National français. L'option de la réutilisation des orientations externes des images individuelles réalisées par le prestataire ayant fourni la couverture ortho avait alors été privilégiée. Même si elle s'était révélée opportune dans le cadre de la génération d'un MNS photogrammétrique à l'échelle du bloc (couverture 2012), cette option méthodologique n'a pu être renouvelée. En effet, l'utilisation comme donnée d'entrée des orientations réalisées par le prestataire rend la qualité du produit final tributaire de la qualité des orientations utilisées. Cette qualité étant variable au sein des différentes couvertures ortho, une nouvelle méthodologie a donc été élaborée.

MÉTHODOLOGIE

L'approche développée pour la gestion de projets photogrammétriques dérivés des images brutes acquises lors des couvertures « orthos » du SPW s'inscrit dans une approche novatrice de la photogrammétrie. Cette "nouvelle photogrammétrie" ("*sfm*" - *Structure From Motion*) se base sur une gestion et une analyse entièrement automatisées de chantiers photogrammétriques importants (dans notre cas, plusieurs milliers de photographies aériennes). Dans le cadre du projet Imageau 3, l'intégralité de la chaîne de traitement photogrammétrique a été transférée de la suite MicMac (utilisée dans le cadre de Imageau 2) vers le logiciel PhotoScan Pro. Ce changement a principalement été motivé par une plus grande facilité d'usage ainsi qu'une grande réactivité des développeurs, amenant PhotoScan vers des performances toujours améliorées, notamment en termes de rapidité de calcul. Vu l'ampleur de la tâche que représente la génération des modèles numériques de surfaces photogrammétriques, le facteur temps de traitement est devenu particulièrement important.

La chaîne de production du Modèle Numérique de Surface est résumée au sein de la Figure 7. Celle-ci synthétise la chaîne de traitement photogrammétrique classique, qui a été appliquée, à quelques détails près, lors de la reconstruction du MNS photogrammétrique. Hormis le changement de plateforme et les adaptations en découlant, la principale modification par rapport à la chaîne de traitement développée pour le projet Imageau 2 se situe au niveau de l'orientation externe qui est intégralement recalculée.

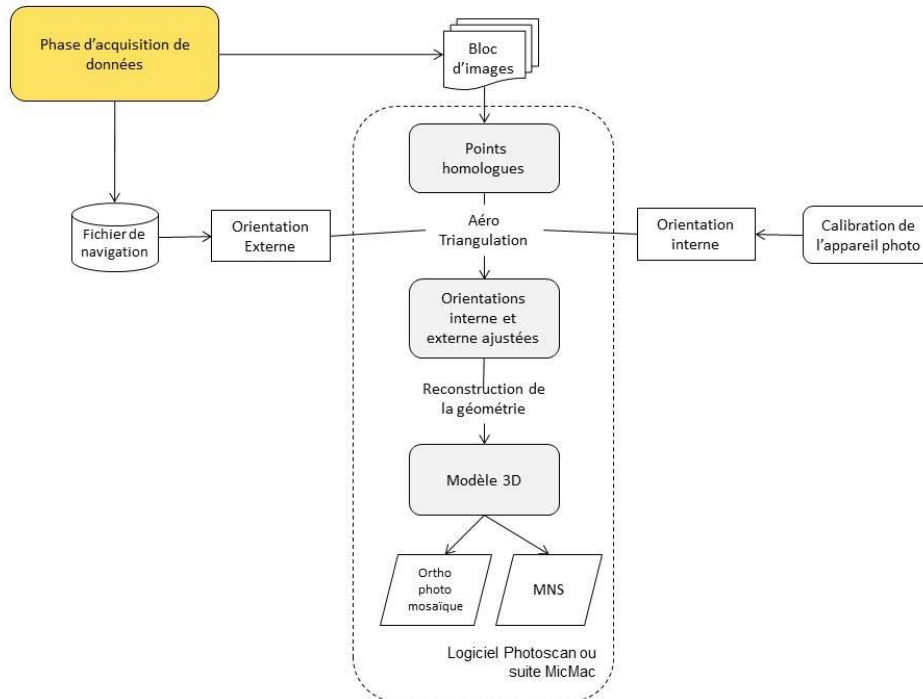


FIGURE 7 : CHAÎNE CLASSIQUE DE TRAITEMENT PHOTOGRAMMÉTRIQUE

Les images acquises lors des vols d'acquisition sont assemblées et positionnées les unes par rapport aux autres lors du processus d'**aérottriangulation** (Figure 8). Celui-ci détermine pour chaque photo la position exacte de la caméra au moment de la prise de vue aérienne. Ce calcul est réalisé notamment sur base des informations enregistrées lors des prises de vue individuelles, à savoir la position GPS de l'appareil ainsi que son inclinaison (selon les axes de tangage (ϕ), de roulis (ω) et de lacet (κ), cf. Figure 9) mais également sur base de la détermination de points homologues (points caractéristiques sur différentes images et correspondant au même point sur le terrain). Cette étape permet donc d'obtenir un premier résultat constitué d'un nuage de points caractéristiques partagés sur plusieurs images (points homologues - Figure 8). Ce résultat est relativement peu dense car constitué de points caractéristiques qui ont été repérés par l'algorithme sur plusieurs images avec une très grande certitude relative.

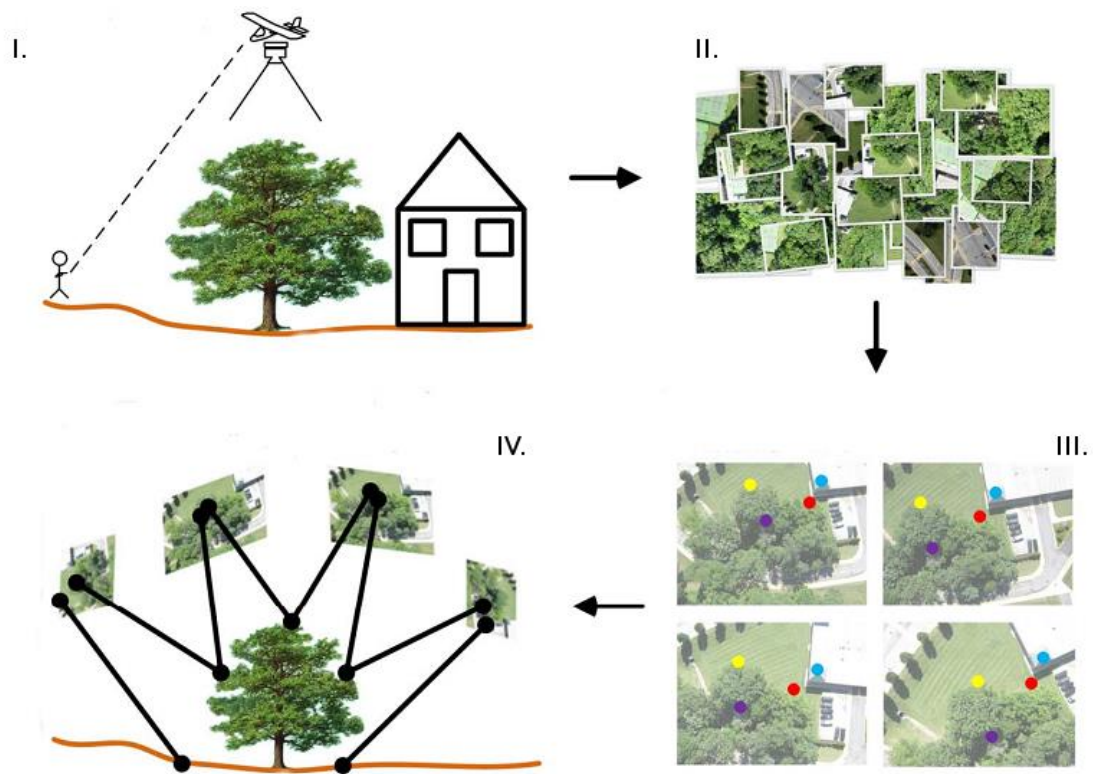


FIGURE 8 : RECONSTRUCTION 3D D'UNE SURFACE À PARTIR D'IMAGES AÉRIENNES – CAS D'UNE ACQUISITION DRONE (ADAPTÉ DE DANDOIS AND ELLIS, 2013 ⁴)

I. ACQUISITION D'IMAGES II. ENSEMBLE DES IMAGES BRUTES (SUPERPOSITION) III. RECHERCHE DE POINTS CARACTÉRISTIQUES (POINTS HOMOLOGUES) IV. ALIGNEMENT DU BLOC D'IMAGES

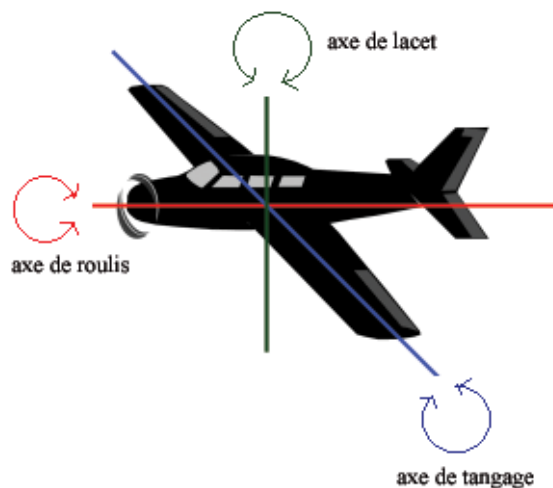


FIGURE 9 : AXES DE TANGAGE, DE ROULIS, DE LACET

⁴ Dandois, J. P., & Ellis, E. C. (2013). High spatial resolution three-dimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. *Remote Sensing of Environment*, 136, 259-276.

L'orientation externe est recalculée sur base de la base de données de points de référence utilisée par l'IGN Belgique. Cette base de données couvre l'ensemble du territoire wallon, représentant une base de données de près de 2000 points (Figure 10). Ces points sont des éléments particuliers du paysage visibles sur une image aérienne et dont la position a été relevée de manière précise (GPS différentiel) sur le terrain.



FIGURE 10 : BASE DE DONNÉES "POINTS DE RÉFÉRENCE" FOURNIE PAR L'IGN

PhotoScan dispose d'une interface aisée pour la saisie de ces points de référence au sol (GCP - Ground Control Points), les points étant pré-positionnés sur base de l'information de position XYZ de l'avion au moment de la prise de vue (Figure 11). Chaque point de référence doit être positionné avec précision par un opérateur sur les différentes images individuelles sur lesquelles il est visible (en moyenne ≈ 3 images). L'encodage de ces points de référence permet aux algorithmes d'avoir des « points d'ancrage » sur base desquels le modèle produit est localisé et optimisé.



FIGURE 11 : SAISIE DES POINTS DE RÉFÉRENCE POUR LA RÉALISATION DE L'ORIENTATION AVEC LE LOGICIEL PHOTOSCAN

Une fois cette étape réalisée, le relief de la surface peut alors être reconstruit grâce à la superposition entre les images, obtenue via le recouvrement le long d'une ligne de vol et entre les différentes lignes de vol. Lors de cette étape, dite de **corrélation dense**, l'algorithme va calculer la position dans l'espace de l'ensemble des éléments constitutifs du projet, dans notre cas, l'ensemble des pixels de la scène analysée. Une fois triangulé, le nuage de points dense obtenu permet le calcul d'un Modèle Numérique de Surface (Figure 12) qui dans notre cas, aura une résolution spatiale finale de 1 m.

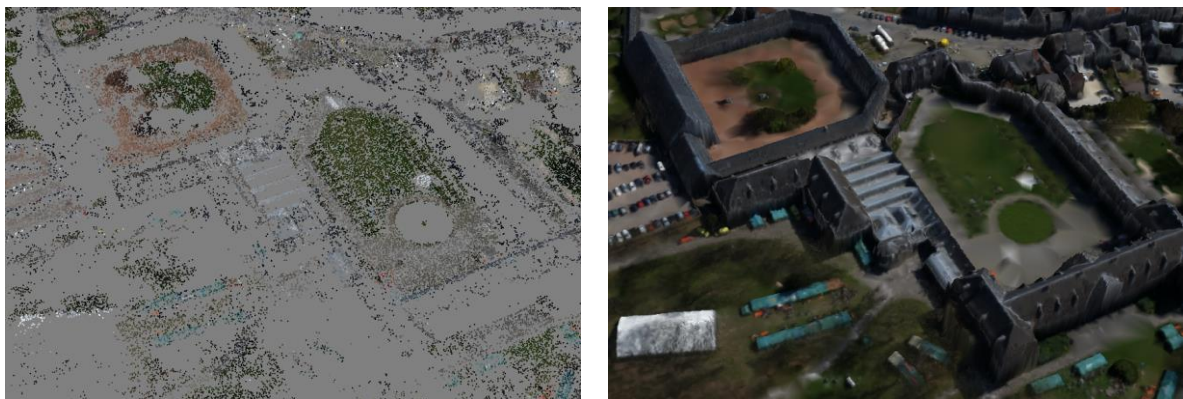


FIGURE 12 : PROJET PHOTOGRAMMÉTRIQUE DÉRIVÉS D'IMAGES CAPTURÉES À L'AIDE DU DRONE X100 – À GAUCHE : NUAGE DE POINTS HOMOLOGUES (OBTENU EN FIN DE PHASE D'ORIENTATION/AÉROTRIANGULATION) ; À DROITE : MODÈLE NUMÉRIQUE DE SURFACE (DÉRIVÉ DU NUAGE DE POINTS DENSE)

EVALUATION DE LA QUALITÉ DE L'AÉROTRIANGULATION

La phase d'optimisation de l'aérotriangulation peut être abordée selon une diversité de modalités. Afin d'obtenir un modèle le plus homogène possible sur l'intégralité du territoire, les processus d'aérotriangulation ont été réalisés à cette même échelle. Après une première aérotriangulation, un processus d'optimisation de l'orientation obtenue peut être entrepris. Ce processus est réalisé sur base de points de référence, qui dans notre cas sont la base de données des centres de photos (provenant des GPS et station inertielle embarqués) et les points de référence de l'IGN. L'optimisation de l'aérotriangulation intervient principalement sur la géométrie du modèle ainsi que les paramètres de calibration des capteurs.

Afin d'évaluer différentes stratégies d'optimisation de l'aérotriangulation, un réseau de points de référence a été sélectionné au sein des points de références de l'IGN. Cette sélection est de type « aléatoire spatialement stratifiée » avec la sélection de 10 points de référence sélectionnés aléatoirement au sein de chaque bloc. Un critère supplémentaire de distance minimale de 5 km entre chacun des points de référence sélectionnés a été également appliqué. Le résultat de l'étape de corrélation dense (\approx Modèle Numérique de Surface) n'est pas évalué en tant que tel. Cette option est justifiée par le caractère intermédiaire de ce produit. Seul le produit final, à savoir le Modèle Numérique de Hauteur hybride fera l'objet d'une évaluation.

RÉSULTATS

AÉROTRIANGULATION :

La phase d'alignement des images a été réalisée pour l'ensemble des images brutes des 3 couvertures Ortho-SPW (Table 6). La taille du jeu de données ainsi que la complexité de son stockage (réparti dans de nombreux dossiers et sur plusieurs disques durs) a nécessité une programmation adaptée des routines d'importation dans le langage python géré par PhotoScan.

TABLE 6 : RÉSULTAT DES ALIGNEMENTS DES 3 CAMPAGNES ORTHO-SPW DISPONIBLES

Référence campagne	Nbre images alignées	Taille ind. (Mo)	Taille totale (To)
2006	4630	329	1,52
2009	7063	750	5,3
2012	6493	750	4,86

La Table 7 reprend l'évaluation de la qualité de l'aérotriangulation selon les différents scénarios. L'impact des stratégies d'optimisation sur l'erreur globale est similaire pour les 3 projets photogrammétriques, avec toutefois une erreur supérieure associée au projet de la campagne 2006. Sur base de ces résultats, la stratégie d'optimisation de l'aérotriangulation retenue pour les 3 projets utilisera à la fois la base de données des centres ainsi que les points de référence au sol fournis par l'IGN.

TABLE 7: QUALITÉ DE L'AÉROTRIANGULATION (ÉCHELLE RÉGIONALE) SELON DIFFÉRENTS SCÉNARIOS D'OPTIMISATION ; EN ITALIQUE, LE SCÉNARIO RETENU MINISANT L'ERREUR GLOBAL ; BDC : BASE DE DONNÉES DES CENTRES DE PHOTOS

	Param.	Source		Erreur (m)			
	Calib	BDC	Réf. IGN	Globale	Erreur X	Erreur Y	Erreur Z
2012	FIGES	x	x	0.526	-0.059	-0.088	0.181
	FIGES		x	0.688	-0.011	-0.062	-0.132
	LIBRES	x	x	0.498	-0.065	-0.069	0.003
	LIBRES		x	0.56	-0.002	-0.006	0.026
2009	FIGES	x	x	0.566	0.062	-0.024	-0.225
	FIGES		x	0.64	0.001	0.027	-0.08
	LIBRES	x	x	0.512	-0.022	-0.015	-0.008
	LIBRES		x	0.543	-0.001	0.035	-0.001
2006	FIGES	x	x	1.719	0.238	0.034	0.96
	FIGES		x	1.2	-0.02	-0.013	0.461
	LIBRES	x	x	0.632	-0.474	-0.052	0.124
	LIBRES		x	0.774	-0.002	-0.012	0.258

GÉNÉRATION D'UN MODÈLE 3D (CORRÉLATION DENSE) À L'ÉCHELLE RÉGIONALE

Un modèle tri-dimensionnel photogrammétrique a été généré pour sur l'ensemble du territoire wallon et ce, pour les 3 couvertures. Les images individuelles des campagnes ortho 2009 et 2012 ont été dégradées à un niveau pouvant dans ce cas à être approximé à une résolution spatiale au sol de 0.5m. Les images individuelles de la campagne 2006 n'ont quant à elle pas fait l'objet de dégradation et ont donc été exploitée avec leur résolution originale. Afin de gérer la superficie importante du projet photogrammétrique, le processus de corrélation dense a été subdivisé en tuiles carrées de 4 km² à laquelle une zone tampon de 50 m était ajoutée.

3.1.2. CARTOGRAPHIE DE LA HAUTEUR DE LA VÉGÉTATION À L'ÉCHELLE RÉGIONALE - PRODUCTION DE MODÈLES NUMÉRIQUES DE HAUTEUR

MÉTHODOLOGIE

PRODUCTION DE LA DONNÉE

Quatre MNH ont été générés à l'échelle régionale : 1 MNH LiDAR et 3 MNH hybrides correspondant aux 3 campagnes ortho 2006 / 2009 / 2012 (Table 8). Le MNH LiDAR a été générés selon une approche 'raster', sur base des MNT et MNS fournis par le SPW. Les MNH hybrides ont quant à eux été générés à l'aide de la suite LAStools. L'ensemble de la région a été traitée en tuile de 4 km². Pour chaque tuile individuelle, les nuages de points résultant de la dernière étape du processus photogrammétrique sont traités à l'aide de l'outil 'lasheight' dans le but de calculer leur hauteur par rapport au MNT LiDAR. Une fois la hauteur de l'ensemble des points calculée, un dernier usage de LAStools via l'application 'lasgrid' permet de retenir le point le plus haut au sein d'une grille de 1m. Cette dernière étape conduit à la production d'un raster correspondant au Modèle Numérique de

Hauteur. Ce processus est répété pour l'ensemble des tuiles du territoire wallon (4549) aux trois dates considérées.

TABLE 8 : MODÈLES NUMÉRIQUES DE HAUTEUR (4) PRODUITS ET ÉVALUÉS DANS LE CADRE DU PROJET IMAGEAU 3

Intitulé	Fenêtre temporelle	MNS	MNT
LiDAR	déc. 2012 -> avr. 2013 déc. 2013 -> mars 2014	LiDAR SPW	
Hybride 2012	mai 2012 mai -> juillet 2013	MNS photo.	LiDAR SPW
Hybride 2009	mai -> août 2009 juin 2010 -> août 2010	MNS photo.	
Hybride 2006	juin -> sept. 2006 avril 2007	MNS photo.	

EVALUATION DE LA QUALITÉ

La production de produits photogrammétriques en zone forestière est une thématique de recherche en elle-même, tant cette surface est difficile à reconstruire. En effet, la canopée forestière est une surface très complexe, présentant des variations en hauteur abruptes et de nombreuses zones sous exposées. L'évaluation de la précision des produits photogrammétriques hors zone forestière peut être abordée via des procédures telles que celles utilisées lors de l'évaluation de la qualité de l'aérotriangulation. Cependant, l'évaluation de la qualité des modèles, spécialement les Modèles Numériques de Hauteur hybrides, en zone forestière, et *a fortiori* en zone de ripisylve, présente quant à elle une plus grande complexité. L'erreur associée à la reconstruction tridimensionnelle de la surface complexe telle que la canopée forestière est par défaut supérieure à celle liée à la reconstruction de surfaces simples. De plus, le projet Imageau 2 a permis de mettre en évidence la problématique liée aux dates de prises de vues des campagnes ortho. Celles-ci s'étalant d'avril à septembre, des zones forestières situées en altitude peuvent être photographiées alors qu'une majorité des essences feuillues n'a pas encore débourré. Ces zones forestières seront alors particulièrement difficiles à reconstruire par les chaînes de traitements photogrammétriques.

Une évaluation rigoureuse et régionale de la qualité des MNH hybrides en forêt s'avère donc nécessaire. L'Inventaire Permanent des Ressources Forestières Wallonnes (IPRFW) a été identifié comme une base de données de qualité, permettant d'obtenir des données de hauteur des peuplements forestiers de manière contemporaine aux différentes acquisitions. Le protocole d'acquisition de l'IPRFW prévoit une répartition spatiale des unités inventoriées au cours d'une année sur l'ensemble du territoire wallon. Il permet donc d'obtenir un jeu de données de référence régional pour chaque saison de végétation couverte.

Pour une partie des arbres inventoriés, l'équipe de l'IPRFW relève la hauteur ainsi que sa position relative au centre de placette (distance / azimuth). Cette base de données de hauteurs d'arbres peut donc être comparée aux hauteurs extraites des modèles numériques de hauteur. Le positionnement des centres de placettes de l'IPRFW est désormais réalisé à l'aide d'un GPS « tout public », permettant d'atteindre une précision relative de l'ordre de 10 à 20m. Cette précision ne permet

toutefois pas d'envisager un usage direct des positions individuelles des arbres inventoriés. La hauteur dominante, qui peut être définie comme la hauteur moyenne des 100 plus gros arbres à l'hectare, est calculée pour un nombre important de placettes de l'IPRFW. Elle présente l'avantage d'être une variable 'peuplement'. Elle est de ce fait beaucoup moins variable localement que les hauteurs individuelles et est donc moins influencée par la qualité du positionnement des placettes de l'IPRFW. Cette donnée est donc la meilleur source de validation disponible en matière de hauteur des arbres grâce à sa disponibilité contemporaine aux différentes acquisitions et ce, sur l'ensemble de la région.

La hauteur dominante contemporaine calculée pour les placettes IPRFW est donc comparée à une hauteur dominante extraite des différents MNH (MNH hybrides et MNH LiDAR). Cette hauteur dominante est extraite à partir de statistiques simples (de type quantile) sur l'ensemble des pixels se situant dans la placette IPRFW. La qualité de l'information 'hauteur' issues des différents MNH sera évaluée à l'aide du logiciel R en analysant la performance des modèles ajustés.

L'évaluation du MNH LiDAR est réalisée en parallèle à celle du MNH hybride 2012. Une comparaison entre ces deux couvertures appartenant à des fenêtres d'acquisition relativement proches sera également réalisée. En effet, le projet Imageau 2 a permis de mettre en évidence les lacunes du MNH LiDAR extrait à partir de la première campagne mesure LiDAR (hiver 2012-2013). Toutefois, la deuxième campagne d'acquisition (hiver 2013-2014, cf. Figure 13) qui a permis de couvrir le reste du territoire semble visuellement être de bien meilleure qualité en terme de MNH.

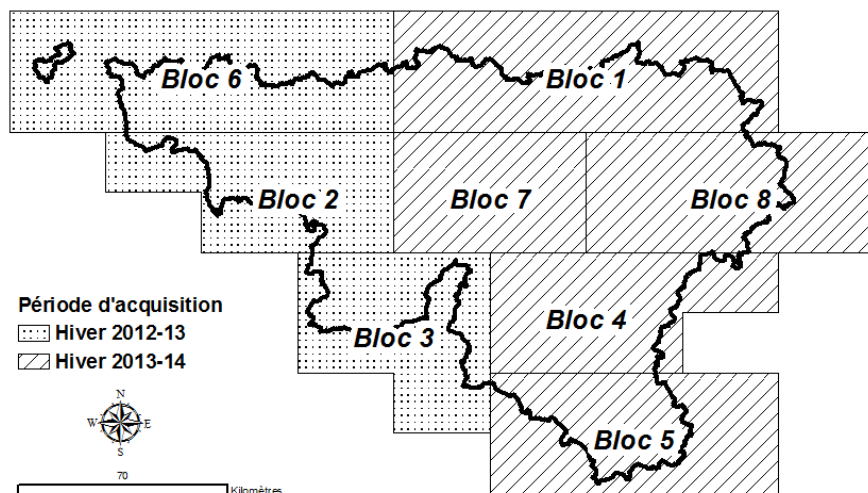


FIGURE 13 : PLANNING DES ACQUISITION LIDAR PAR LE SPW

RÉSULTATS

MNH LIDAR

Une première évaluation visuelle (cf. Figure 14) a été réalisée sur le MNH LiDAR des différents blocs. Le MNH LiDAR des blocs 2 et 3, volés en 2013, sont globalement de mauvaise qualité. Le bloc 6, également volé en 2013 permet de construire un MNH de qualité moyenne. Les autres blocs, acquis en 2014 fournissent des MNH d'assez bonne qualité visuelle.

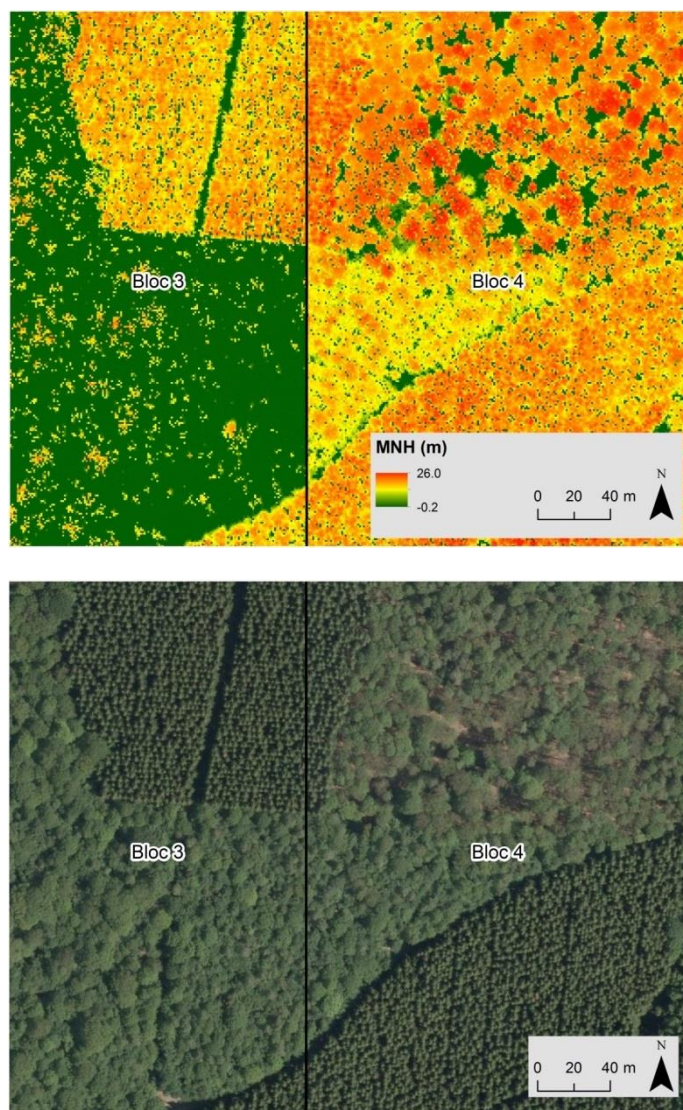


FIGURE 14 : ILLUSTRATION DES VARIATIONS DE QUALITÉ DU MNH LIDAR EN FONCTION DE LA DATE D'ACQUISITION. EN HAUT, LE MNH LIDAR DANS LES BLOCS 3 ET 4. EN BAS, L'ORTHO-IMAGE DE 2012 POUR LA MÊME ZONE.

Afin d'objectiver cette première estimation visuelle, la fonction glm (logiciel R) a été utilisée pour construire un modèle d'estimation de la hauteur dominante « terrain » sur base des données MNH LiDAR et des données de l'IPRFW. Ce modèle comporte deux variables explicatives : H_{dom}^{LiDAR} et bloc, cette dernière correspondant au n° du bloc d'acquisition (Figure 13). Les résultats de cet ajustement (Table 9) confirment l'analyse visuelle, les blocs 2, 3 et 6 présentent des différences très hautement significatives pour l'ordonnée à l'origine du modèle correspondant à une sous-estimation très importante de la hauteur. Ces résultats confirment également l'option prise lors du projet Imageau d'utiliser un MNS photogrammétrique pour compléter l'information lacunaire du LiDAR basse densité. Par contre, la qualité du MNH LiDAR pour les blocs volés lors de l'hiver 2013-14 constitue une 'bonne surprise' et permet leur intégration comme MNH de référence pour les blocs concernés.

TABLE 9 : RÉSULTAT DE L'AJUSTEMENT DU MODÈLE DE PRÉDICTION DE LA HAUTEUR DOMINANTE

Coefficients	Estimate	Std. Error	t-value	Pr(> t)
(Intercept)	-1,11	0,58	-1,93	0,054270658
Hdom _{LIDAR}	0,96	0,02	56,25	1,0366E-223 ***
Bloc2	4,83	0,63	7,68	7,87569E-14 ***
Bloc3	1,52	0,50	3,09	0,002143015 **
Bloc4	0,37	0,45	0,82	0,41026057
Bloc5	0,60	0,52	1,16	0,247073284
Bloc6	2,22	0,70	3,15	0,001739869 **
Bloc7	0,52	0,51	1,02	0,30897346
Bloc8	-0,001	0,45	-0,003	0,997474295

Une fois retirées du jeu de données les placettes relatives aux 3 blocs volés la première année, un modèle de hauteur dominante peut être construit (Table 10) avec une performance très satisfaisante. Ces résultats permettent de valider l'usage direct du jeu de données LiDAR du SPW sous forme de MNH pour les blocs volés la deuxième année d'acquisition.

TABLE 10 : MODÉLISATION DE LA HAUTEUR DOMINANTE SUR BASE DU MNH LIDAR, CAS DES PLACETTES HORS BLOCS 2,3 ET 6. UN TIERS DU NOMBRE TOTAL DE PLACETTES (n PLACETTES) EST UTILISÉ EN VALIDATION (ÉCHANTILLONAGE ALÉATOIRE) DU MODÈLE CALIBRÉ (SUR BASE DE 2/3 * n PLACETTES)

	CALIBRATION		VALIDATION
	n placettes	r ²	RMSE (m) Erreur (moyenne +/- écart type)
Feuillus	127	0,71	3,45 0,56 +/- 2,52
Résineux	178	0,88	2,31 0,06 +/- 2,07
F + R	305	0,82	2,87 0,51 +/- 2,12

MNH HYBRIDE 2012

Une analyse similaire a été menée sur base du MNH hybride 2012 avec cette fois, aucune application de restriction sur la répartition spatiale des placettes (Table 11).

TABLE 11 : MODÉLISATION DE LA HAUTEUR DOMINANTE SUR BASE DU MNH HYBRIDE 2012 UN TIERS DU NOMBRE TOTAL DE PLACETTES (n PLACETTES) EST UTILISÉ EN VALIDATION (ÉCHANTILLONAGE ALÉATOIRE) DU MODÈLE CALIBRÉ (SUR BASE DE 2/3 * n PLACETTES)

	CALIBRATION			VALIDATION
	n placettes	r ²	RMSE (m)	Erreur (moyenne +/- écart type)
Feuillus	217	0,76	3,02	0,51 +/- 2,91
Résineux	314	0,86	2,69	-0,06 +/- 2,00
F + R	531	0,82	2,81	0 +/- 2,65

Les résultats obtenus sont très satisfaisants, avec des performances atteintes par un modèle numérique de hauteur « hybride » photogrammétrique / LiDAR tout à fait comparables à celles atteintes par un MNH 100% LiDAR. Ces bons résultats confirment la pertinence de l'usage du MNH hybride en complément du MNH LiDAR dans le cadre de la caractérisation des hauteurs.

COMPARAISON MNH HYBRIDE 2012 ET MNH LiDAR

Vu leur caractère relativement contemporain (cf. Table 8), une comparaison directe entre les deux sources de données peut être réalisée en matière d'estimation de hauteur dominante. Ce test a été réalisé via un *test t* de student par paire. Celui-ci a permis de mettre en évidence l'absence de différence significative entre les estimations de hauteur dominante à partir des données LiDAR et celles obtenues à partir du MNH photogrammétrique hybride 2012 (p-value = 0,83, différence moyenne = 0.02 m, IC : [-0.21 , 0.26]). La Figure 15 illustre la relation entre les estimations photogrammétriques et LiDAR pour l'estimation de la hauteur dominante. Cette comparaison confirme le caractère complémentaire au MNH LiDAR du MNH hybride 2012.

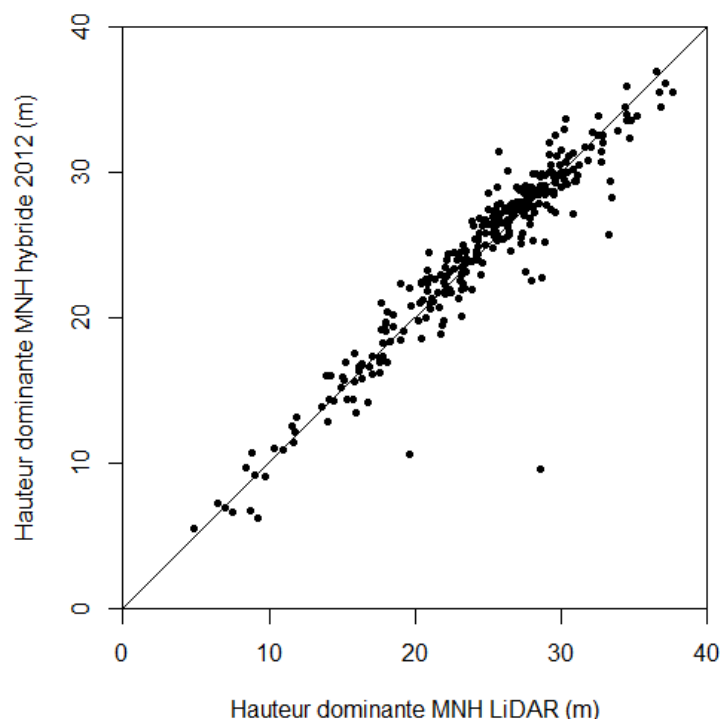


FIGURE 15 : HAUTEUR DOMINANTE ESTIMÉE À PARTIR DU MNH HYBRIDE 2012 VS HAUTEUR DOMINANTE ESTIMÉE À PARTIR DU MNH LIDAR - PLACETTES HORS BLOCS 2, 3 ET 6

MNH HYBRIDE 2009 ET 2006

Les résultats obtenus pour le MNH hybride 2009 (Table 12) sont comparables à ceux obtenus en matière de caractérisation de la hauteur dominante à l'aide des MNH LiDAR et hybride 2012 (cf. Table 10 et Table 11).

Les résultats obtenus dans le cadre de la modélisation de la hauteur dominante sur base du MNH hybride 2006 se démarquent de manière clairement négative (Table 13). Cette plus faible performance peut être attribuée à la fois à la résolution inférieure des images individuelles ainsi qu'aux dates de vols. En effet, certaines portions du territoire ont été volées en avril 2007, période à laquelle de nombreux peuplements forestiers feuillus n'ont pas encore atteint leur plein développement. Le projet Imageau 2 a permis de mettre en évidence les difficultés liées à la reconstruction photogrammétrique de peuplement partiellement « hors feuilles », ce qui entraîne localement de fortes sous estimations de la hauteur, a fortiori de la hauteur dominante.

Ces résultats permettent de confirmer la pertinence de l'usage du MNH hybride 2009 dans une perspective d'analyse multitemporelle des indicateurs. Les faibles performances du MNH hybride 2006 sont telles que l'analyse multitemporelle n'utilisera pas les données du MNH hybride 2006. En effet, la probabilité est trop importante que les différences à mettre en évidence en termes de hauteur soient d'une intensité plus faible que celles liées à l'erreur propre à la donnée.

TABLE 12 : MODÉLISATION DE LA HAUTEUR DOMINANTE SUR BASE DU MNH HYBRIDE 2009 UN TIERS DU NOMBRE TOTAL DE PLACETTES (n PLACETTES) EST UTILISÉ EN VALIDATION (ÉCHANTILLONAGE ALÉATOIRE) DU MODÈLE CALIBRÉ (SUR BASE DE 2/3 * n PLACETTES)

	CALIBRATION			VALIDATION
	n placettes	r ²	RMSE (m)	Erreur (moyenne +/- écart type)
Feuillus	246	0,81	2,58	0,22 +/- 2,93
Résineux	311	0,93	1,49	0,05 +/- 1,67
F + R	557	0,88	2,03	0,13 +/- 2,64

TABLE 13 : MODÉLISATION DE LA HAUTEUR DOMINANTE SUR BASE DU MNH HYBRIDE 2006 UN TIERS DU NOMBRE TOTAL DE PLACETTES (n PLACETTES) EST UTILISÉ EN VALIDATION (ÉCHANTILLONAGE ALÉATOIRE) DU MODÈLE CALIBRÉ (SUR BASE DE 2/3 * n PLACETTES)

	CALIBRATION			VALIDATION
	n placettes	r ²	RMSE (m)	Erreur (moyenne +/- écart type)
Feuillus	231	0,73	3,39	0,016 +/- 3,19
Résineux	188	0,67	3,48	-0,77 +/- 2,46
F + R	419	0,72	3,43	-0,23 +/- 2,85

CONCLUSIONS - SECTION « CARTOGRAPHIE DE LA HAUTEUR DES FORÊTS À L'ÉCHELLE RÉGIONALE »

Les différents MNH produits sont disponibles au sein du support remis à la DCENN (répertoire MNH).

Les MNH LiDAR et hybrides 2012 et 2009 peuvent donc être exploités pour la caractérisation des ripisylves à l'échelle régionale. Les MNH LiDAR et hybride 2012 correspondant à la même saison de végétation, leur combinaison à l'échelle régionale permet d'obtenir un MNH de référence pour les saisons de végétation 2012 et 2013. Pour les zones où les MNH LiDAR et hybrides 2012 sont simultanément disponibles, le MNH LiDAR a été retenu en raison d'une robustesse ainsi qu'une homogénéité spatiale plus importante. Pour la suite du document, le MNH résultant de la fusion de ces deux sources de données sera mentionné comme 'MNH mixte 2012'.

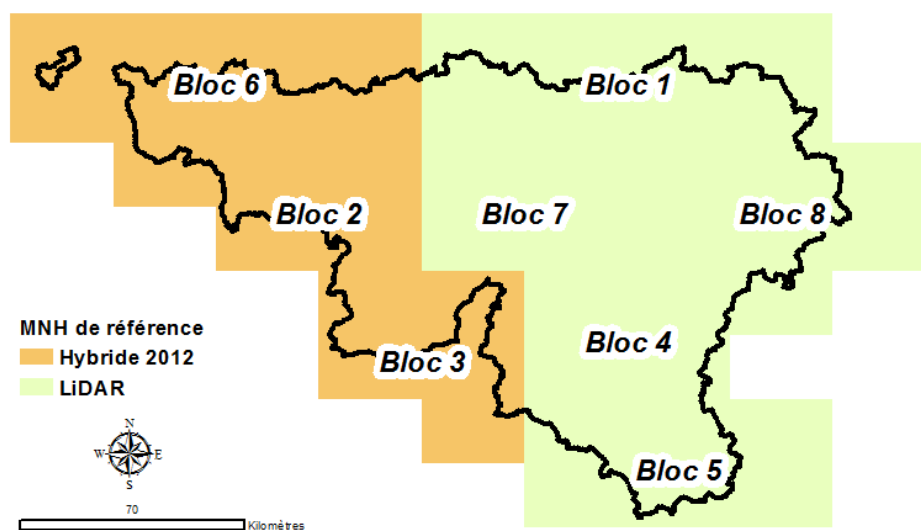


FIGURE 16 : CONSTITUTION D'UN MODÈLE NUMÉRIQUE DE HAUTEUR POUR LES SAISONS DE VÉGÉTATION 2012 ET 2013

Le MNH hybride 2009 disponible sur l'ensemble de la région permettra une première caractérisation multitemporelle des indicateurs 'ripisylves' sur l'ensemble du territoire. Le pas de temps entre les 2 MNH varie de deux à trois années, soit un 'demi PARIS', permettant la simulation pour les indicateurs 'ripisylves' d'une évaluation à mi-parcours des PARIS. L'utilisation du MNH hybride 2006 n'est à ce stade pas envisagée en raison des résultats négatifs de la validation de la donnée.

3.1.3. CARTOGRAPHIE DES COURS D'EAU À L'AIDE DE LA DONNÉE LiDAR

Les différents projets Imageau ont permis de mettre en évidence le potentiel des données LiDAR, basse et haute densité, quant à la cartographie du tracé des cours d'eau. Ces premières analyses ont été réalisées sur base du réseau hydro associé à la base de données des secteurs PARIS. La géométrie de cette base de données est directement issue de l'atlas des cours d'eau en cours de révision et la qualité de celle-ci posait problème pour la caractérisation fine des bandes riveraines. L'apport des données LiDAR quant à la cartographie des cours d'eau a été testé en tant qu'alternative nécessaire à l'atlas en cours de révision, mais également dans une approche exploratoire afin d'évaluer l'apport de données LiDAR en tant que source (parmi d'autre) de mise à jour pour l'atlas des cours d'eau du SPW.

La cartographie des cours d'eau a été envisagée sur base de deux approches : surfacique et linéaire. Dans le premier cas, la méthode consiste en une détection directe de la surface en eau, résultant en un polygone représentant la surface en eau au moment du vol. La seconde approche délimite un tracé de cours d'eau théorique/topographique sur base du seul Modèle Numérique de Terrain LiDAR. Le projet Imageau 2 a permis de mettre en évidence l'impossibilité d'utiliser l'approche surfacique pour les cours d'eau de plus faible profondeur. Les approches sont donc spatialement complémentaires, les cours d'eau de première catégorie (et les navigables) étant abordés de manière surfacique, les autres de manière linéaire sur base du MNT LiDAR.

A titre expérimental et sur demande de la DCENN, un test a été réalisé pour le réseau hydrographique non classé de la vallée de la Lesse, au sein des zones dites de contraintes légales : affluents de zones de baignades, Natura 2000 et zones de protection de captage.

CARTOGRAPHIE DU TRACÉ DES SECTEURS DE 2^{ÈME} ET 3^{ÈME} CATÉGORIES

Le linéaire concerné par ce projet est considérable et concerne potentiellement plus de 10.000 km de cours d'eau. L'objectif de cette analyse est de valider la possibilité d'une utilisation du tracé dérivé du MNT LiDAR en lieu et place de la donnée vectorielle actuellement associée à la BD des secteurs PARIS.

MÉTHODOLOGIE

PRODUCTION DE LA DONNÉE

Les fonctions « hydro » de la toolbox *Spatial Analyst* de ArcGIS ont été utilisées pour dériver à partir du MNT des axes de ruissellement présentant une aire contributive équivalente au seuil de classement (Figure 17). L'ensemble des traitements ont été gérés par sous bassin hydrographique et par la suite mosaïqués à l'échelle régionale.

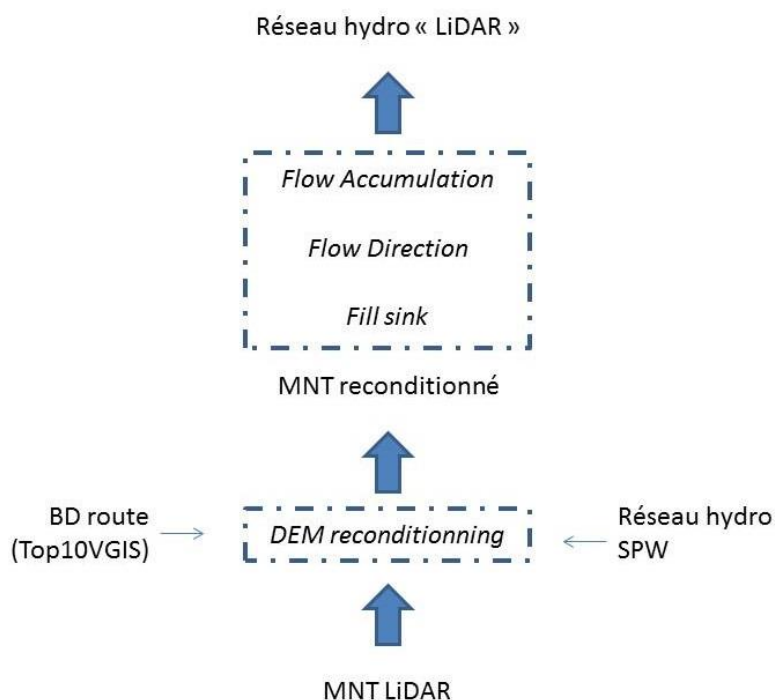


FIGURE 17 : PRODUCTION D'UN RÉSEAU HYDRO À PARTIR DU MNT LIDAR - CHAÎNE DE TRAITEMENT (EN ENCADRÉ, LES TOOLBOX "ARCHYDRO" UTILISÉES)

Le MNT reflétant le niveau du sol, il ne permet pas de gérer les passages où l'eau coule sous la surface identifiée, notamment au niveau des ponts, qui représentent alors des digues artificielles interrompant les axes calculés. L'outil « DEM reconditionning » de la toolbox « ArchHYDRO » a été utilisé afin de modifier le MNT afin d'appliquer une soustraction définie par l'utilisateur (Figure 18) dans les zones identifiées. L'utilisation de cet outil revient littéralement à « creuser » dans le MNT, afin de considérer que l'eau peut effectivement passer au milieu de cette structure.



FIGURE 18 : "DIGUE" ARTIFICIELLE DANS LE MNT LIDAR - CAS DU VIROIN (OLLOY-SUR-VIROIN)

VALIDATION DU TRACÉ

L'approche utilisée lors du projet Imageau 2 n'a pu être transposée directement pour des raisons logistiques (> 10.000 km de linéaire concerné). Une méthode d'estimation visuelle de l'adéquation du tracé théorique LiDAR avec le tracé issu de la BD secto a été réalisée. Cette estimation a permis d'aborder une grande variété de situations, tant en termes de localisation dans le territoire wallon qu'en termes de typologie d'occupation du sol (Table 14). Pour chaque secteur analysé, l'opérateur évalue visuellement l'adéquation du tracé LiDAR avec le tracé issu de la BD secteurs PARIS et ce, à l'échelle du secteur (Figure 19). Un seuil de concordance de 90% du linéaire de la BD secteurs PARIS

est fixé. L'opérateur dispose d'informations connexes telles que le rapport des longueurs provenant des deux sources de données ainsi que la distance moyenne entre le tracé issu de la BD secteurs PARIS et le tracé LiDAR MNT considéré.

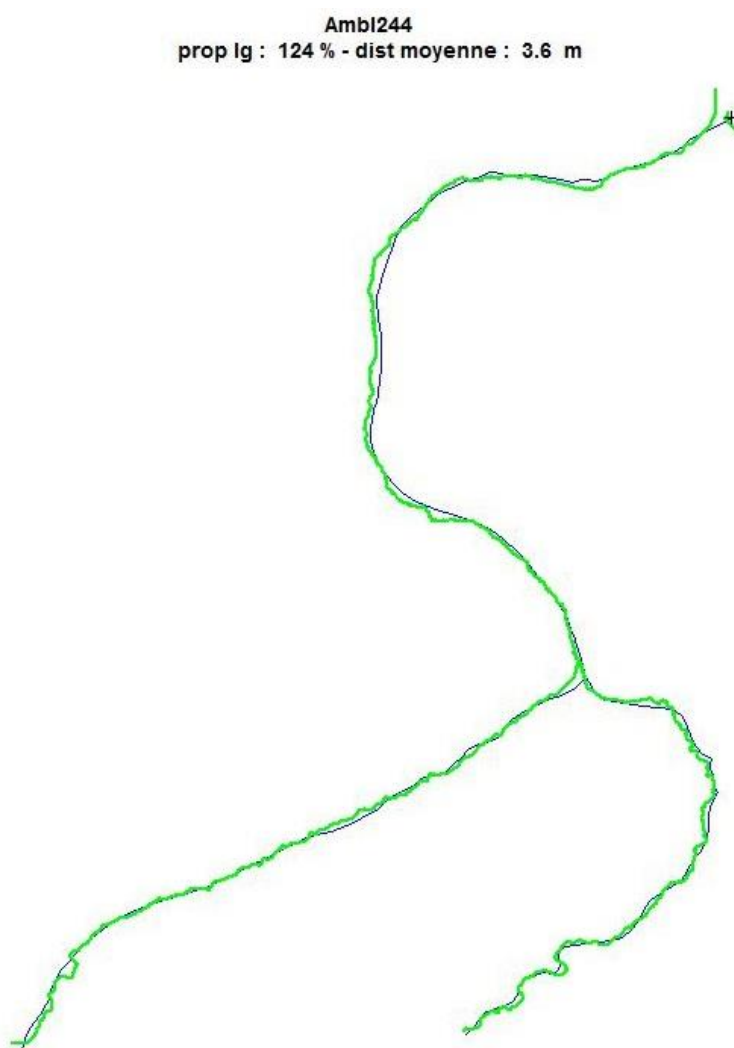


FIGURE 19 : FICHE D'ÉVALUATION DU TRACÉ LIDAR DÉRIVÉ DU MNT POUR LE SECTEUR 'AMBL244'. EN VERT, LE TRACÉ LIDAR MNT, EN NOIR, LE TRACÉ ISSU DE LA BD SECTEURS PARIS.

PROP Lg = 100 * Lg TRACÉ LIDAR / Lg SECTEUR ; DIST MOYENNE : DISTANCE MOYENNE ENTRE LE TRACÉ LIDAR ET LE TRACÉ BD SECTEURS PARIS. LA VALIDATION EST POSITIVE DANS LE CAS DU SECTEUR CONSIDÉRÉ

RÉSULTATS

Les résultats (synthèse par typologie en Table 14) sont assez négatifs, en comparaison à ceux obtenus par une approche terrain par le projet Imageau 2. Cette différence peut s'expliquer notamment par les différences entre les vallées du Virain, de la Houille et du reste de la Wallonie, mais également par la méthodologie elle-même. La méthodologie utilisée lors du projet Imageau 2 n'a employé comme référence que des points terrain, relevé par un opérateur dans des zones non complexes, à distance des voiries. Les différences entre les zones d'études se marquent notamment au niveau de la typologie de l'occupation du sol, mais également au niveau de la topographie des bassins versants. D'une manière générale, la méthode des axes dérivés du MNT témoigne d'une moins grande efficacité pour les zones de pentes faibles (cas de l'ensemble de la zone limoneuse). La présence d'infrastructures telles que les voiries, drainages agricoles, aménagements hydrauliques sont autant

d'éléments qui modifient la topographie du lit majeur et entraînent la génération d'axes mal positionnés. La seule typologie qui atteint un niveau de performance appréciable est la typologie forestière, où dans une majorité des cas, les perturbations au niveau de la topographie des bassins versants est moins grande.

Ces résultats empêchent toute utilisation directe du tracé dérivé du MNT LiDAR à l'échelle régionale pour les secteurs 2^{ème} et 3^{ème} catégorie. A titre informatif, les résultats de cette section sont disponibles sous forme d'un shapefile au sein du support fournis à la DCENN (dossier TRACE). Ces résultats peuvent notamment être localement une source supplémentaire de mise à jour du réseau hydro. Certaines typologies, notamment les secteurs « Forêts », « Prairies » et « Prairies et forêts » ont des niveaux de performance intéressants. Le cas des secteurs forestiers est particulièrement intéressant. En effet, ce type de secteur est très fréquent, particulièrement au sud du sillon Sambre et Meuse, et est caractérisé par une plus faible disponibilité en information connexe sur leur tracé (peu de levés topo, pas de visibilité sur les images aériennes). Combiné au fait que la performance au sud du sillon Sambre et Meuse dans cette typologie de secteurs est proche des 100%, l'application de cette méthodologie est prometteuse et permettrait d'envisager la mise à jour d'une partie non négligeable du réseau hydro classé (≈ 4500 km).

TABLE 14 : TYPOLOGIE DES SECTEURS ET ÉVALUATION DU TRACÉ DÉRIVÉ DU MNT LIDAR (ÉCH. RÉGIONALE)

N TOT : Nbre TOTAL DE SECTEUR C2 ET C3, n VALIDÉ : Nbre DE SECTEURS VALIDÉS, n CORRECT : Nbre DE SECTEURS AYANT RÉPONDUS AUX CRITÈRES D'ÉVALUATION

Typologie	n tot	n validé	n correct	% correct
Bâtiments continus	287	24	4	17%
Bâtiments discontinus	518	47	12	26%
Carrières	25	2	0	0%
Cultures	228	22	6	27%
Cultures et forêts	84	8	3	38%
Espaces verts	354	33	6	18%
Forêts	1161	113	80	71*
Friches agricoles	35	3	0	0%
Friches industrielles	17	1	0	0%
Prairies	1003	99	46	46%
Prairies et cultures	366	36	9	25%
Prairies et forêts	876	84	44	52%
Zones humides	146	14	7	50%
Total	5100	486		

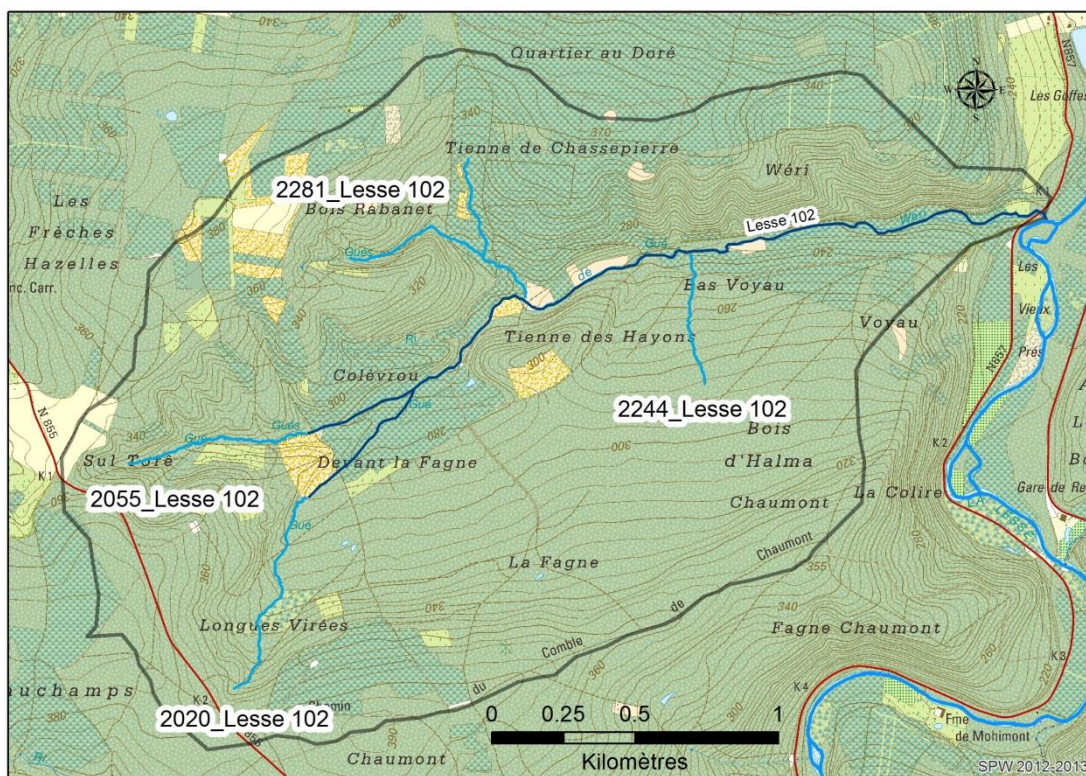


FIGURE 21 : SECTEURS NON-CLASSÉS AFFLUENTS DU SECTEUR 'LESSE 102'. UNE RÉFÉRENCE UNIQUE EST ASSOCIÉE À TOUT LES AXES D'UN MÊME SOUS BASSIN VERSANT AFFLUENT

Une fois ce premier travail d'identification de secteurs non classés réalisé à l'échelle du bassin versant de la Lesse, une sélection a été réalisée sur base de la présence au sein du linéaire d'une des contraintes légales identifiées, à savoir la présence de périmètre Natura 2000, la présence au sein d'une zone de protection de zone de baignade ou de captage. Cette sélection s'est portée sur l'ensemble des secteurs non classés du bassin de la Lesse dont au moins 50% du linéaire était inclus au sein de ces zones de contraintes (sans distinction).

VALIDATION DU TRACÉ

Une première validation du tracé produit a été réalisée sur base des données existantes en la matière (ancien réseau hydro et réseau hydro « SCENIC »). Un contrôle visuel de la présence de signe de l'existence d'un cours d'eau (ripisylve, marques dans la végétation, eau, ...) a également été réalisé sur base de l'ortho 2012-13.

RÉSULTATS

Près de 431 secteurs non classés présentant au moins une des 3 contraintes légales identifiées sur 50% de leur linéaire ont été identifiés pour la vallée de la Lesse, pour un linéaire de près de 645 km. Le réseau non classé produit par cette méthode, si la condition de présence de contrainte légale est retirée, représente un total de 1865 km. Cette somme est indicatrice du travail conséquent que constitue la gestion ou du moins la caractérisation du réseau non classé. A titre de comparaison, le linéaire classé pour le même bassin versant représente près de 1000 km. Ces résultats sont à mettre en regard avec le fait que ces approches mentionnent des axes, sans lien automatique avec la présence effective du cours d'eau. De nombreux facteurs peuvent justifier la présence ou l'absence d'un cours d'eau dans ces zones situées à l'amont des bassins versants. Des aménagements mineurs, tels que des drainages agricoles peuvent rapidement effacer toute trace de ces écoulements

mineurs. En conséquence, à aires contributives égales, les situations sur le terrain peuvent être très contrastées.

En termes de nombre de contraintes légales, la plupart des secteurs concernés ne relève que d'un seul type (Figure 22). Dans le cas de la vallée de la Lesse, la contrainte légale la plus fréquente est de loin celle de la présence de périmètres Natura 2000 qui concerne plus de 80% des secteurs non classés identifiés. (Figure 22).

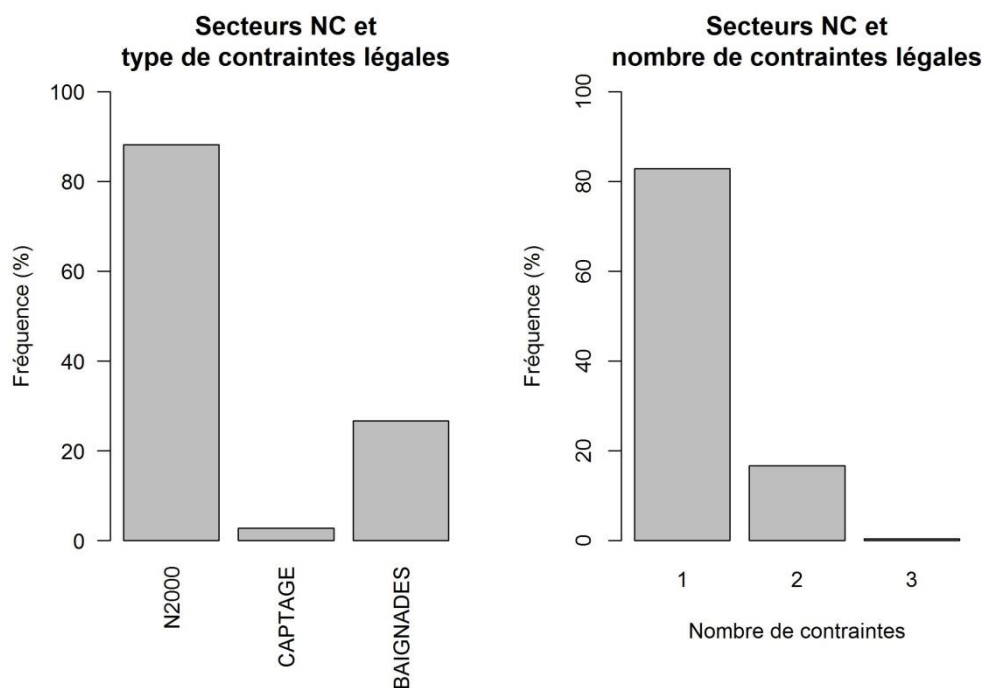


FIGURE 22 : TYPE ET NOMBRE DE CONTRAINTES LÉGALES DES SECTEURS NON CLASSÉS DE LA VALLÉE LA LESSE

En termes de longueur, la Figure 23 met en évidence la présence de secteurs anormalement longs, liés notamment à la mauvaise gestion de passage sous routier, entraînant la création d'axe théorique longeant pendant plusieurs kilomètres des voies de communication. La longueur moyenne des secteurs non classés est de 1.5 +/- 1.2 km.

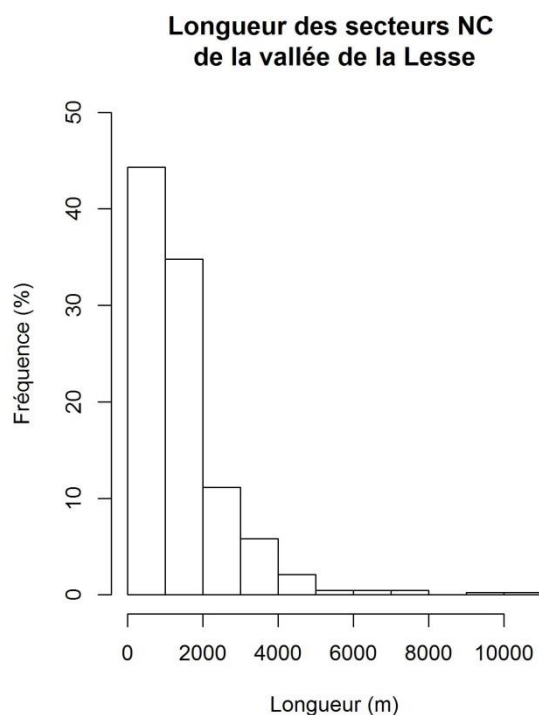


FIGURE 23 : LONGUEUR DES SECTEURS NON CLASSÉS DU BASSIN DE LA LESSE PRÉSENTANT DES CONTRAINTES LÉGALES

Cette première analyse met en évidence l'importance de disposer d'une donnée cohérente et homogène afin d'évaluer au mieux les enjeux présents sur le réseau non classé. L'avantage de la donnée cartographique issue du MNT LiDAR est justement de présenter cette cohérence, mais son utilisation doit être adaptée, en intégrant les aspects liés au passage sous les obstacles constitués par les différentes voiries. Ces questions de cartographie des axes rejoignent des questions recherche-développement d'autres services du SPW, notamment ceux impliqués dans la cartographie du risque d'inondation par ruissellement. Un projet financé par la Direction du développement rural auprès de l'Université Catholique de Louvain est en cours sur ce sujet et devrait être riche en enseignements pour cette thématique.

CARTOGRAPHIE DES SECTEURS DE 1^{ÈRE} CATÉGORIE ET NAVIGABLES

Le projet Imageau 2 a permis de mettre en évidence l'impossibilité d'appliquer la méthode surfacique pour les cours de faible gabarit. La 'réponse' de ces cours d'eau au sein du jeu de données est variable, tant spatialement que temporellement, en fonction des paramètres hydrauliques de ces cours d'eau (turbidité, profondeur et largeur du lit). L'option de travailler sur les secteurs de première catégorie a donc été maintenue dans le cadre de l'analyse régionale et étendue au linéaire de cours d'eau navigables.

MÉTHODOLOGIE

CARTOGRAPHIE DU POLYGONE « LIT MINEUR LiDAR »

Sur base de la méthode développée lors du premier projet Imageau et adaptée lors du projet Imageau 2, la méthodologie de cartographie du polygone lit mineur exploite la très forte absorption du rayonnement LiDAR par l'eau. La technologie LiDAR émettant en infrarouge proche, son rayonnement est quasi intégralement absorbé par les zones en eau.

A partir d'un raster dérivé du nuage de points LiDAR basse densité, qui représente à l'échelle de chaque pixel le nombre de points LiDAR classé « sol », une chaîne de traitement (*rule set*) a été développée dans *eCognition developer* (Figure 24) à l'échelle des 14 sous bassins hydrographiques concernés. L'approche est de type « orientée objet », c'est-à-dire que l'unité de base d'analyse n'est pas le pixel mais un objet, constitué d'un groupe de pixels jugés homogènes. Ce logiciel utilise un algorithme de segmentation de type *Region Growing*, multi-résolution (c'est-à-dire qui permet d'intégrer diverses sources d'information) et multi-échelle (qui permet de mettre en œuvre plusieurs échelles de segmentations hiérarchisées sur une même image, ce qui offre la possibilité d'exploiter le niveau le plus adéquat selon l'élément à cartographier). Le *Region Growing* démarre d'un pixel source et va l'agréger au pixel voisin le plus similaire, pour former un segment ou objet qui va grandir au fur et à mesure, jusqu'à atteindre la limite d'homogénéité définie par un seuil fixé par l'utilisateur. Le traitement d'une image dans *eCognition developer* est organisé sous forme d'un *Process Tree*, ou *Rule set*. Il s'agit de l'ensemble des étapes de travail structurées pas à pas, selon le principe d'un organigramme.

Le principal défi relevé avec *eCognition* consiste à distinguer les absences de points sols relatives à la présence d'une rivière de celles liées à d'autres occupations de sols (massifs forestiers denses, maison, ...). En comparaison à l'approche développée lors du projet Imageau 1, la tâche est rendue plus compliquée par la faible densité de points ($16 \text{ pts/m}^2 \rightarrow 0.8 \text{ pt/m}^2$) qui entraîne de plus nombreuses zones d'absence de points et donc de plus nombreux cas de figure à analyser. Cette classification se réalise sur base de critères de forme et de taille des objets, ainsi que sur le nombre de points du nuage de points LiDAR classé en tant que '*points eau*'.

En 'post-production', un nettoyage rapide est réalisé par un opérateur afin d'éliminer les polygones résiduels qui, selon toute vraisemblance, ne font pas partie de la zone en eau (Figure 24). Cette opération est réalisée sur base des ortho (campagne 2012-13), le tracé de la BD secteurs PARIS et le raster 'nombre de points LiDAR classé eau'.

EXTRACTION D'UN LINÉAIRE DÉRIVÉ DU POLYGONE « LIT MINEUR LiDAR »

A partir du polygone lit mineur obtenu, la production d'un tracé linéaire peut être obtenue à partir de l'extraction d'un axe central. Afin de réaliser une donnée continue sur l'ensemble des secteurs de 1^{ère} catégorie, un travail de post-production a été réalisé afin de compléter la donnée sur l'ensemble

du linéaire. Cette correction a été réalisée sur base du réseau hydro fourni par le projet SCENIC (Figure 25). Toute modification du linéaire dépassant la longueur de 50 mètres a été répertoriée, afin de pouvoir évaluer les capacités de la méthodologie à être appliquée sur l'ensemble du réseau hydro de 1^{ère} catégorie.

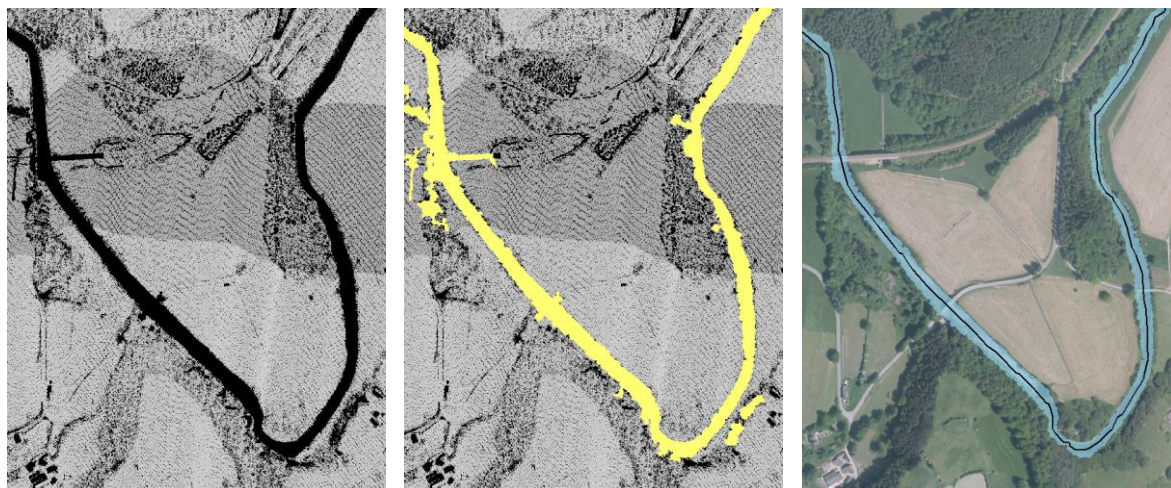


FIGURE 24 : VALLÉE DE L'AMBLÈVE À STOUMONT.
DE GAUCHE À DROITE - RASTER NOMBRE DE POINTS "SOLS" ; POLYGONE "LIT MINEUR" EXTRAIT AVEC ECOGNITION ; ORTHO 2012 AVEC POLYGONE NETTOYÉ +TRACÉ CENTRAL



FIGURE 25 : VALLÉE DE L'AMBLÈVE À STOUMONT. DE GAUCHE À DROITE : ORTHO 2012 ET TRACÉ SCENIC ; SURFACE EN EAU LIDAR ET TRACÉ DÉRIVÉ ; TRACÉ CONTINU APRÈS PASSAGE EN POST PRODUCTION (ICI MODIFICATION MINEURE, INFÉRIEUR AU SEUIL DE 50M)

VALIDATION

Une nouvelle fois, le passage à l'échelle régionale empêche toute réplique à l'identique des méthodes utilisées lors des projets Imageau 1 et 2 qui avaient validé les produits cartographiques à partir de relevés spécifiques sur le terrain. Dans le cadre de la validation régionale de la largeur des cours d'eau, la donnée de largeur provenant des opérations de jaugeages du réseau limnimétrique AQUALIM de la DCENN a été retenue. Cette 'largeur AQUALIM' est comparée à une 'largeur LiDAR' calculée pour le linéaire de cours d'eau associé à la station AQUALIM. L'information de largeur du cours d'eau extraite du jeu de données LiDAR équivaut à la valeur médiane des largeurs calculées tous les 50m pour un linéaire de cours d'eau approximatif de 1 km centré autour de la station AQUALIM. Ce linéaire de 1 km centré sur la station AQUALIM a toutefois pu faire l'objet de déplacement afin de limiter la présence d'un affluent majeur qui pourrait influencer la morphologie

du lit. La méthodologie d'extraction de la largeur de cours d'eau extraite des données LiDAR est basée sur le processus de désaggrégation/réaggrégation développé plus en détails dans la section 3.2.1 - *Procédure de désaggrégation et reaggrégation*.

Le réseau AQUALIM couvre l'ensemble du territoire wallon et fait l'objet de jaugeages réguliers, à différentes périodes de l'année et dans des conditions hydrologiques qui, par définition, doivent être les plus variées possibles. Lors de ces opérations de jaugeages, de nombreux paramètres sont relevés, dont la largeur du cours d'eau au moment du jaugeage. Pour une station AQUALIM donnée, le choix du jaugeage de référence pour la validation est réalisé sur base d'un critère de proximité en terme chronologique (année civile du jaugeage > 2010) couplé à un critère d'équivalence des débits entre le débit au moment du jaugeage sur le terrain et le débit au moment du vol LiDAR (max 10% entre les débits comparés). La largeur issue du jaugeage sélectionné sera comparée à la largeur extraite du nuage de points LiDAR.

Le caractère contemporain de l'information de largeur est particulièrement important pour une comparaison objective des largeurs. L'acquisition des données LiDAR ayant été réalisée dans des fenêtres chronologiques de hauts débits (déc. 2012 -> avril 2013 et déc. 2013 -> mars 2014), les conditions hydrologiques au sein d'un même bassin versant peuvent avoir été extrêmement différentes au cours des différentes campagnes (Figure 26).

Un total de 79 stations AQUALIM répondent aux critères identifiés et permettront de comparer une valeur de 'largeur AQUALIM' à une 'largeur LiDAR' (Figure 27).

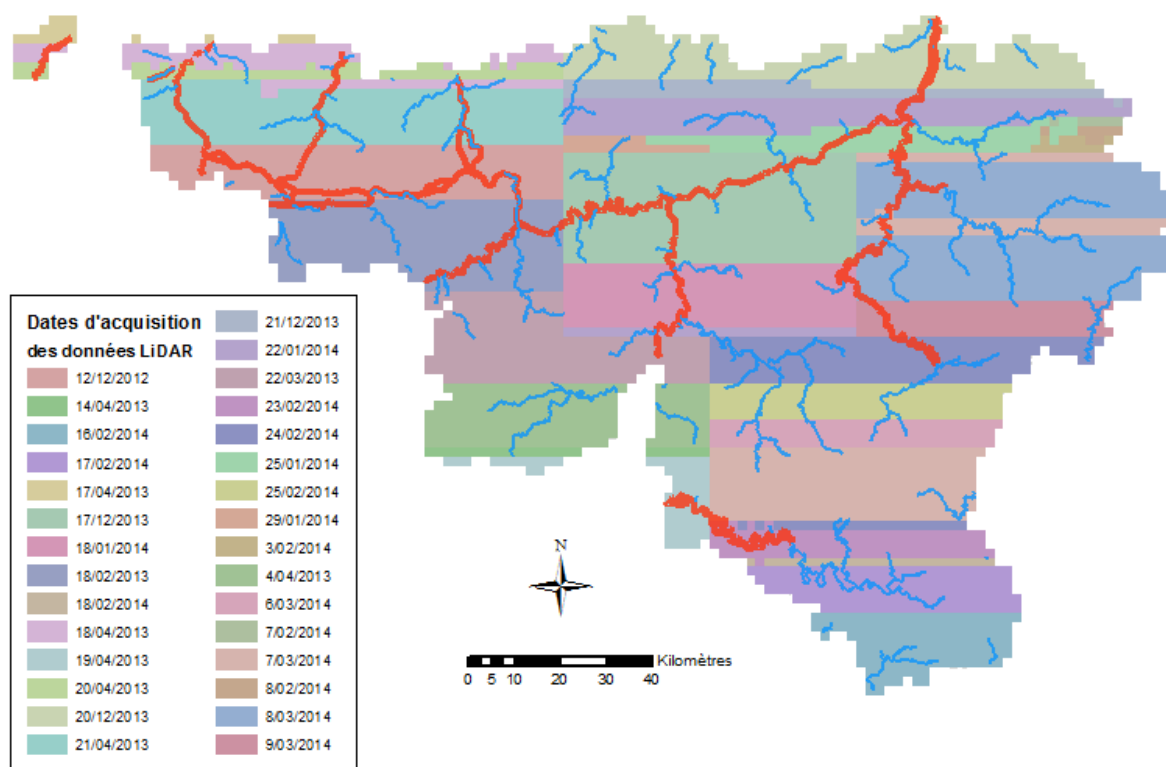


FIGURE 26 : DATE DES ACQUISITIONS DE LA CAMPAGNE LIDAR DU SPW. PRÈS DE 30 DATES D'ACQUISITION DIFFÉRENTES ONT ÉTÉ NÉCESSAIRES À LA COUVERTURE DU TERRITOIRE

Le linéaire produit à partir du polygone « lit mineur » LiDAR sur l'ensemble des secteurs (non souterrains) de première catégorie est évalué en comparaison au réseau hydrographique fourni par le projet SCENIC (précision inférieure au mètre). Ce niveau de précision est atteint pour les éléments du réseau hydro réalisé par le projet SCENIC, provenant du réseau hydrographique de l'IGN, ainsi que des données issues du PICC.

La partie exclusivement issue du polygone « lit mineur » LiDAR (non corrigée par l'opérateur) a été comparée avec les tronçons du réseau 'hydro SCENIC'. Cette comparaison a été réalisée exclusivement sur les parties 'communes' des deux réseaux et correspondant aux mêmes tronçons de cours d'eau.

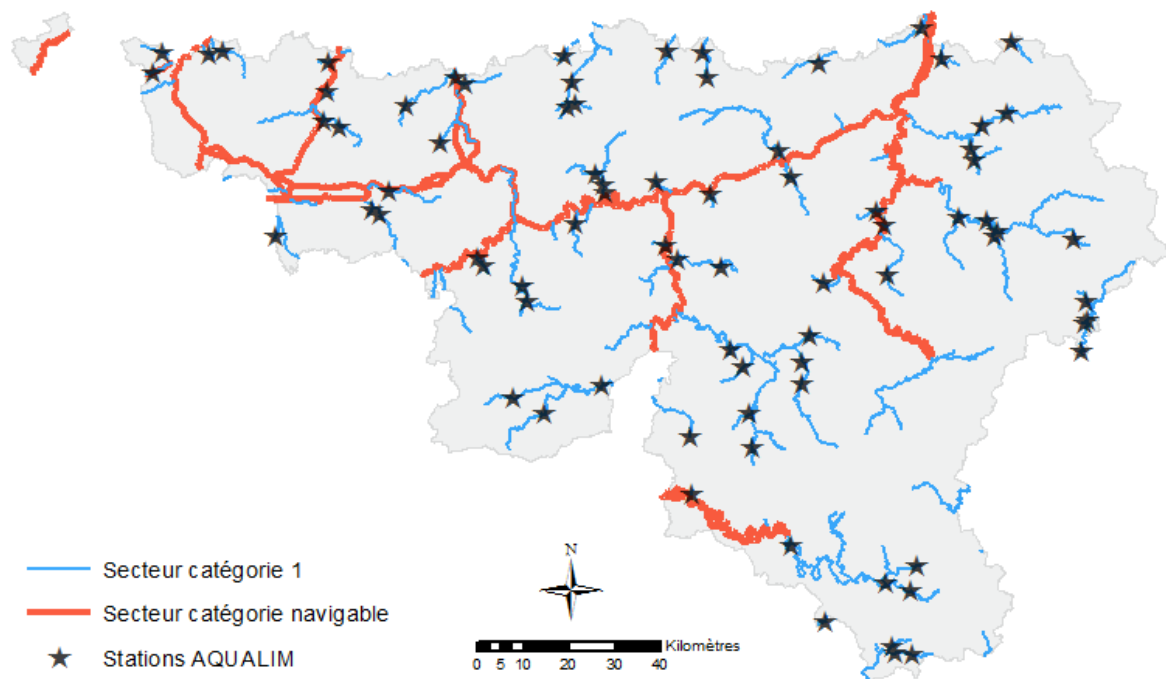


FIGURE 27 : RÉPARTITION SPATIALE DES STATIONS DU RÉSEAU AQUALIM UTILISÉE DANS LE CADRE DE LA VALIDATION DE LA LARGEUR DÉRIVÉE DU POLYGONE LIT MINEUR EXTRAIT DU NUAGE DE POINTS LIDAR

RÉSULTATS

POLYGONE « LIT MINEUR » LiDAR

Un polygone « lit mineur » LiDAR a été produit pour l'ensemble des secteurs navigables et 1^{ère} catégorie. Ce résultat est disponible sous format shapefile sur le support remis à la DCENN (dossier TRACE). Toutefois, cette donnée est localement lacunaire et ne pourra pas être utilisée directement pour la spatialisation des indicateurs. En effet, les projets Imageau 1 et 2 ont utilisé de manière directe les résultats du polygone lit mineur pour la délimitation des zones d'analyse. Dans le cadre de la caractérisation régionale des secteurs, le polygone obtenu sera utilisé indirectement, sur base d'un buffer appliqué au tracé dérivé du polygone lit mineur selon une largeur également dérivée du même polygone lit mineur LiDAR.

La comparaison des largeurs LiDAR à celles obtenues via les jaugeages du réseau AQUALIM a été réalisée à l'aide d'une régression linéaire (Figure 28). La performance est satisfaisante, avec un coefficient de corrélation R^2 dépassant les 90% (après passage forcé par l'ordonnée nulle). Cette validation souligne une tendance à la sous-estimation de la largeur par les données LiDAR (d'approximativement 10%). Cette sous-estimation avait également été constatée lors des validations de terrain des projets Imageau 1 et 2 et conforte le choix de cette alternative méthodologique.

La concentration des observations sur des largeurs de cours d'eau inférieures à 20m rend la distribution peu homogène et limite la pertinence de l'emploi du modèle construit pour corriger la largeur LiDAR qui sera utilisée pour la délimitation des zones d'analyses des secteurs. Par contre, elle permet de valider la cohérence entre les largeurs dérivées du polygone « lit mineur » LiDAR et les largeurs mesurées sur le terrain dans des conditions hydrologiques similaires.

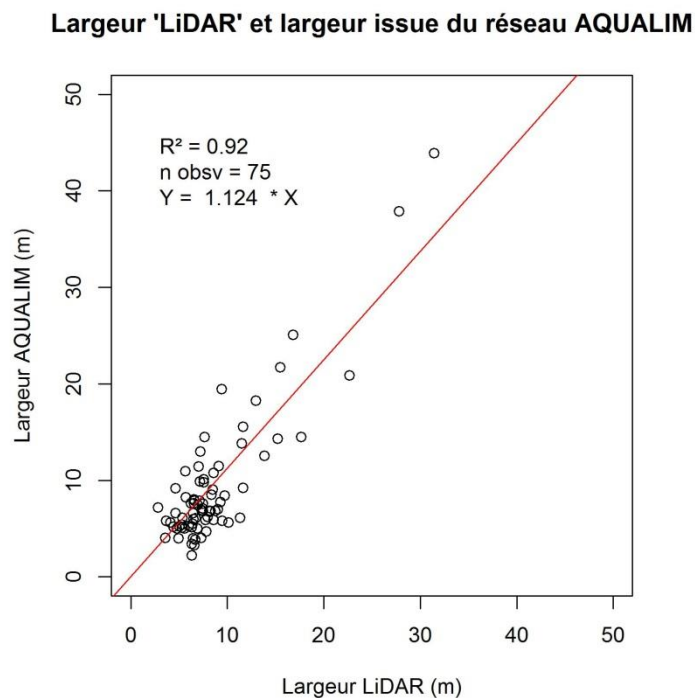


FIGURE 28 : AJUSTEMENT D'UNE RÉGRESSION LINÉAIRE ENTRE LA LARGEUR LiDAR ET LA LARGEUR ISSUE DES JAUGEAGES DU RÉSEAU AQUALIM DE LA DCENN

Différentes informations peuvent être extraites du processus de validation, tant sur les conditions hydrologiques des cours d'eau lors des acquisitions LiDAR que sur les limites de l'usage de la méthode. Sur un total de 79 stations potentiellement évaluées, seules 4 stations n'ont pu être caractérisées, faute de réponse suffisante au niveau du jeu de donnée LiDAR. La Figure 29 compare les paramètres des jaugeages pour différentes situations en lien avec l'échec ou non de la méthodologie à fournir une largeur de cours d'eau LiDAR pour le tronçon évalué. Il apparaît assez clairement que les 4 situations où la méthodologie n'a pas fonctionné correspondent à des cours d'eau de petite taille, tant en terme de profondeur que de largeur mesurée lors du jaugeage de référence. Les *box plots* de la Figure 29 permettent même de situer ces 4 stations comme appartenant au premier quartile (< 25% des valeurs les plus basses) pour les paramètres considérés. Ces observations confirment les limites de la méthode quant aux cours d'eau de plus faible gabarit. Elles confirment également l'option prise de limiter l'usage de cette méthode aux secteurs de catégorie navigable et de catégorie 1. La Figure 30 présente les débits des jaugeages classés en fonction des débits observés dans les stations AQUALIM considérées pour la période 2012-2014. Cette figure confirme que la campagne LiDAR a été menée en période essentiellement de « hautes eaux », la majorité des stations ayant été survolées alors qu'elles présentaient des débits supérieurs au module P50.

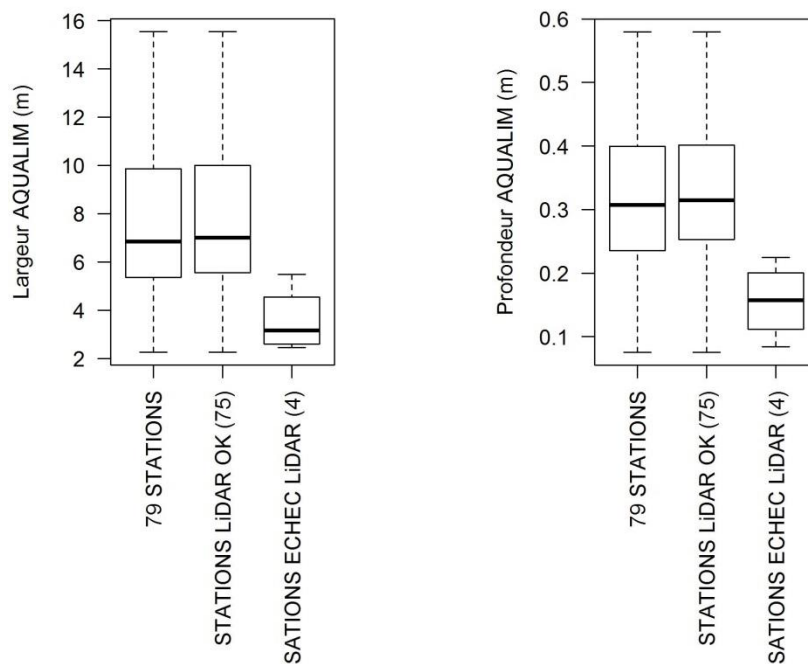


FIGURE 29 : DISTRIBUTION DES LARGEURS ET DES PROFONDEURS MESURÉES LORS DES JAUGEAGES DU RÉSEAU AQUALIM EN FONCTION DE LA RÉUSSITE ET DE L'ÉCHEC DE LA MÉTHODOLOGIE

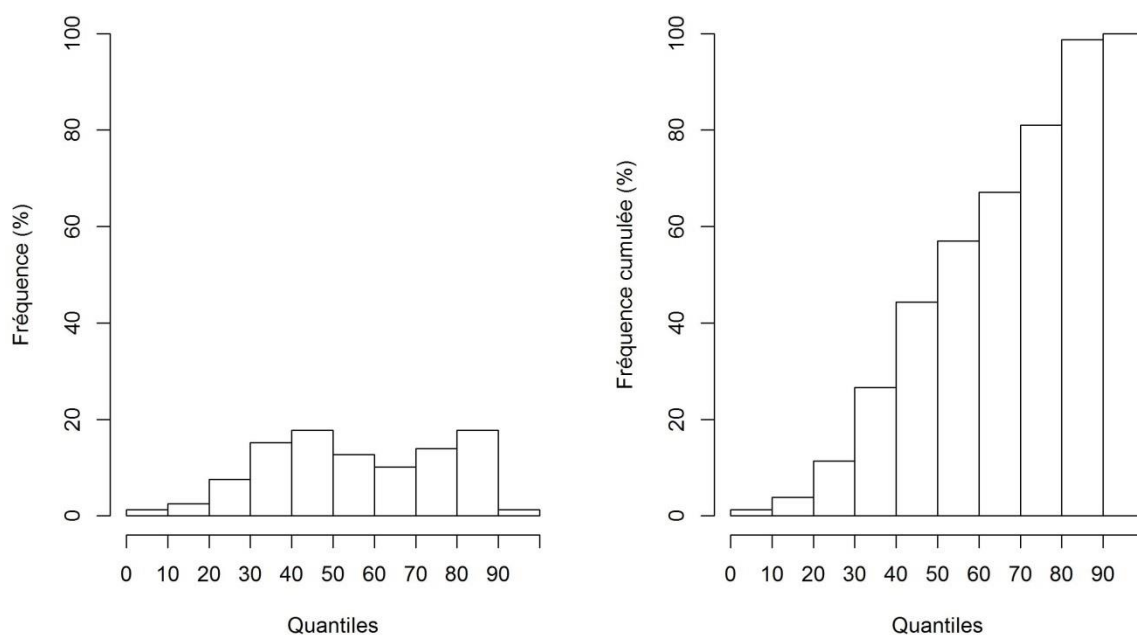


FIGURE 30 : DÉBITS JOURNALIERS CLASSÉS PAR QUANTILE DES STATIONS AQUALIM ET CONTEMPORAINS AUX ACQUISITIONS LIDAR DU SPW : FRÉQUENCE ET FRÉQUENCE CUMULÉE (79 STATIONS). LE CLASSEMENT DES DÉBITS EST RÉALISÉ SUR BASE DES DÉBITS JOURNALIERS DES ANNÉES 2012 À 2013 POUR LES STATIONS CONSIDÉRÉES.

TRACÉ LIDAR DES SECTEURS DE CATÉGORIE 1

Un tracé LiDAR a pu être produit pour près de 92% du linéaire des secteurs de 1^{ère} catégorie, représentant un total de 2013 km (Figure 31 et Table 15). A l'échelle du réseau hydrographique wallon concerné, les modifications apportées par l'opérateur via l'utilisation de données vectorielles (issues du projet SCENIC) ne se sont donc appliquées que localement et permettent de corriger la présence d'élément qui 'perturbent' l'algorithme de détection, tels que des éléments de voiries, voir des passages de plus faibles profondeurs (passage à gué, seuils, ...). La méthodologie semble fonctionner pour l'ensemble de réseau concerné aux seules exceptions près des cours d'eau de la Ligne, du ruisseau des Awirs, du ruisseau de Lembrée ainsi que de l'Aisne. Ces cours d'eau sont les seuls pour lesquelles l'approche a échoué pour l'ensemble du linéaire, en lien avec leur gabarit assez faible.

TABLE 15 : COMPLÉTUDE DU RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE ASSOCIÉ AUX SECTEURS DE 1^{ÈRE} CATÉGORIE DÉRIVÉ DU POLYGONE "LIT MINEUR" LIDAR

Source	Longueur (km)	Proportion (%)
Polygone « lit mineur » LiDAR	1852	92
Vectorielle	161	8
Total	2013	100

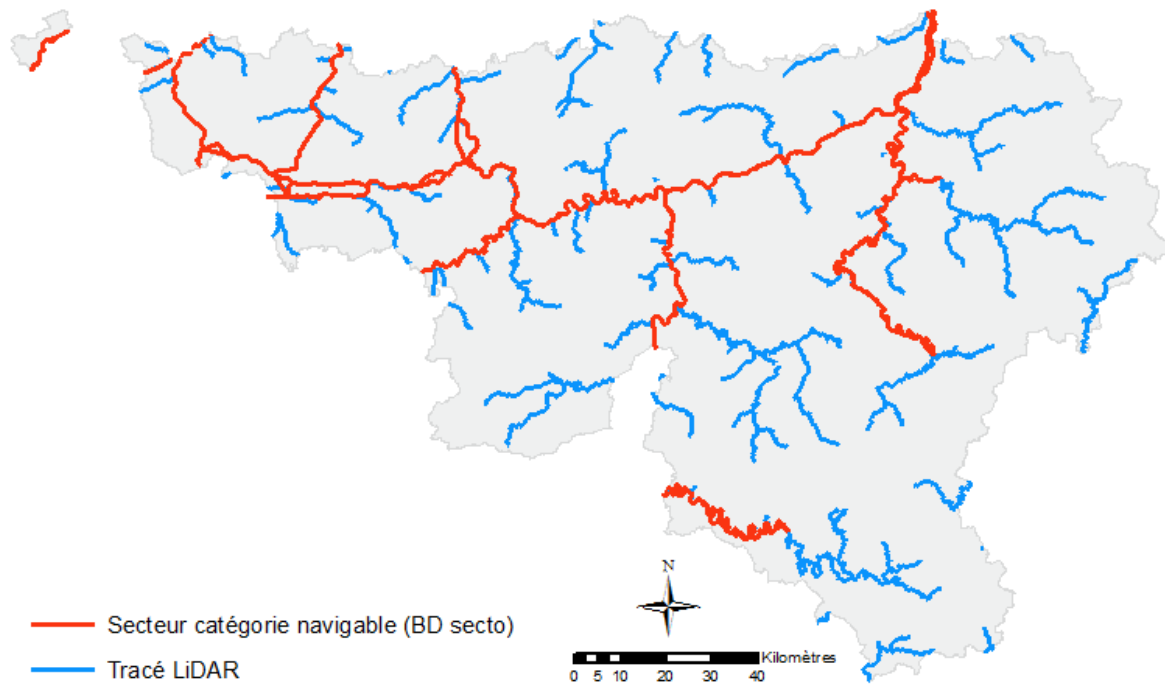


FIGURE 31 : CARTOGRAPHIE DU TRACÉ DES SECTEURS DE 1ÈRE CATÉGORIE À L'ÉCHELLE RÉGIONALE

La partie exclusivement issue du polygone « lit mineur » LiDAR a été comparée avec les tronçons du réseau 'hydro SCENIC' les plus précises et issues du réseau hydro de l'IGN ainsi que la BD du PICC. Cette comparaison a été réalisée exclusivement sur les parties 'communes' des deux réseaux et correspondant aux mêmes tronçons de cours d'eau. La distance moyenne entre les 2 sources de données est de 2.47m +/- 4.3 (moyenne +/- écart-type), ce qui témoigne d'une bonne similarité entre les 2 sources de données. Cette différence moyenne est relativement faible si on la met en relation avec la largeur moyenne relevée lors des jaugeages AQUALIM sélectionnés dans le cadre de la validation du polygone « lit mineur » LiDAR ($\approx 7\text{m}$, cf. Figure 29).

CONCLUSIONS - SECTION « CARTOGRAPHIE DES COURS D'EAU À L'AIDE DE LA DONNÉE LiDAR »

Les résultats de la régionalisation des approches développées lors des différents projets Imageau en matière de cartographie des cours d'eau est riche d'enseignements. Ces résultats confirment une information déjà relayée lors des projets précédents, la donnée LiDAR ne peut à elle seule permettre une mise à jour complète du réseau hydro. Elle révèle tout de même un grand potentiel en la matière, avec notamment la possibilité d'être utilisée comme source de mise à jour quasi complète (92%) et simultanée du réseau hydro à charge directe du SPW (1^{ère} catégorie et navigable) à partir d'une détection directe et fiable du cours d'eau. Le réseau hydrographique LiDAR produit par le projet Imageau 3 pour les secteurs de 1^{ère} catégorie constitue une source « prête à l'emploi » ayant fait l'objet d'une validation complète par un opérateur⁵. C'est ce réseau hydro de référence qui sera utilisé dans le cadre de la caractérisation des secteurs présentée plus loin dans le document.

Pour les cours d'eau classés de 2^{ème} et 3^{ème} catégorie, l'opération de validation a montré qu'on ne peut pas utiliser directement la donnée tracé dérivée du MNT LiDAR pour la caractérisation des secteurs. Toutefois, ces premiers tests ont permis d'établir le potentiel de la donnée LiDAR pour la mise à jour d'un linéaire des cours d'eau en zone forestière représentant près de la moitié du réseau hydro classé en 2^{ème} et 3^{ème} catégorie (> 4000 km). Tout comme la question de la cartographie du réseau hydrographique non-classés, cette thématique pourrait profiter de projets en cours au niveau du SPW, principalement à travers le projet de mise à jour de la cartographie du risque d'inondation par ruissellement.

La réflexion autour de la thématique de la cartographie des cours d'eau à partir de la donnée LiDAR a été menée en parallèle au chantier toujours en cours de mise à jour du réseau hydrographique. Cette refonte du réseau hydro a été menée notamment à travers le projet SCENIC, à la base du futur nouveau réseau hydro. Ce projet faisant le bilan de l'existant, le projet Imageau à travers son volet tracé des cours d'eau est donc tout à fait complémentaire et fournit une solution potentielle de mises à jour partielle du réseau hydro, sur base des données d'ores et déjà fournies par le projet Imageau 3. Les outils méthodologiques développés au cours des projets Imageau permettront également de répéter ces potentielles mises à jour du réseau hydro lors des futures campagnes d'acquisition LiDAR du SPW. Au niveau plus spécifique de la gestion de la base de données des secteurs, une solution géomatique devra également être élaborée afin d'associer la composante spatiale de cette BD à un réseau hydrographique revu et appelé à être modifié régulièrement. Au lieu d'être figée à la date de sa création, la composante spatiale de la base de données devra devenir dynamique.

⁵ Les données relatives au projet de cartographie des cours d'eau à partir de la donnée LiDAR sont disponibles sous format *shapefile* sur le support fourni à la DCENN (répertoire TRACE).

3.2. CARACTÉRISATION DES SECTEURS À L'ÉCHELLE RÉGIONALE

Une fois les données de bases produites et validées, l'analyse et la caractérisation des secteurs de gestion peut désormais être entreprise. Cette analyse est vaste et se structure successivement par la construction de paramètres indicateurs des secteurs de gestion PARIS, l'analyse de leur apport en terme d'explication de la diversité des secteurs wallons via une analyse en composantes principales (ACP) et enfin, une caractérisation régionale de ces paramètres indicateurs. Différents outils de visualisation de ces résultats et analyses sont également proposés, à travers l'extraction de profils longitudinaux et transversaux, la visualisation de l'évolution longitudinale amont/aval de certains paramètres à l'échelle du secteur individuel et enfin, la présentation de solution de mise en contexte des résultats individuels de chaque secteur avec une unité spatiale de référence (la masse d'eau).

3.2.1. MÉTHODOLOGIE

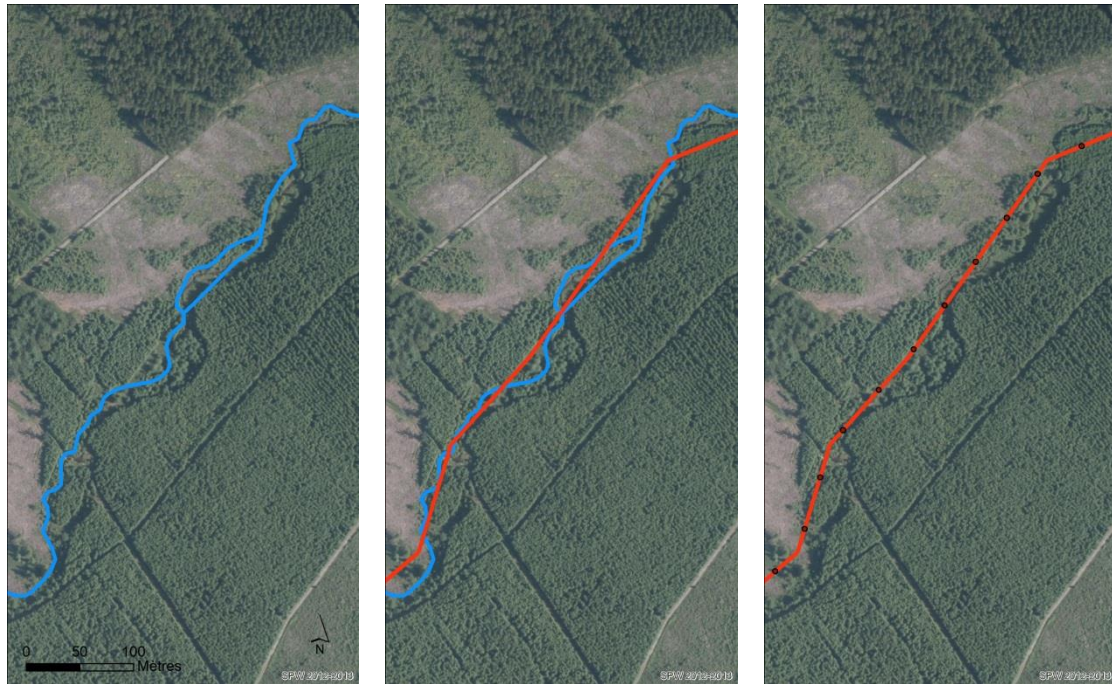
CONSTRUCTION DES INDICATEURS HYDROMORPHOLOGIQUES

PROCÉDURE DE DÉSAGRÉGATION ET RÉAGRÉGATION

Cette procédure a pour but de segmenter le réseau hydrographique ainsi que les plaines alluviales associées afin de pouvoir analyser l'évolution amont/aval des différents paramètres descriptifs et ensuite agréger cette information à différentes échelles d'analyses spatiales (secteurs > masse d'eau > sous bassin hydrographique).

GÉNÉRATION D'UN AXE DE VALLÉE

Pour chaque secteur, un axe principal est extrait à partir d'une simplification à l'extrême du tracé du cours d'eau considéré. Cette simplification est réalisée sur base individuelle pour chaque secteur à partir d'une ligne centrale extraite à l'aide d'ET Geowizzard d'un polygone issu d'un buffer de 100m sur le tracé du cours d'eau (Figure 32).



**FIGURE 32 : GÉNÉRATION D'UN AXE DE VALLÉE ASSOCIÉ AU SECTEUR 'AMBL168'.
DE GAUCHE À DROITE : TRACÉ DU COURS D'EAU ASSOCIÉ AU SECTEUR (BLEU) ; EXTRACTION D'UN AXE DE VALLÉE (EN ROUGE) ; POINTS GÉNÉRÉS TOUS LES 50M LE LONG DE L'AXE (-> GÉNÉRATION DES POLYGONES DE VORONOÏ)**

SEGMENTATION LONGITUDINALE ET LATÉRALE

Les polygones de Voronoï sont générés sur base des points répartis le long de l'axe de vallée du secteur considéré (cf. Figure 32). Ces polygones permettent de diviser l'espace tout en intégrant la complexité liée au caractère méandrique de la vallée. Se surimposant à l'échantillonnage longitudinal, un découpage latéral est également réalisé, afin d'analyser l'évolution des variables descriptives à différentes distances par rapport à l'axe principal du secteur étudié. Les différentes échelles d'analyses latérales (Figure 34) ont été fixées à 6 et 12m (par rapport au lit mineur) ainsi qu'au lit majeur. Pour les secteurs de 1^{ère} catégorie et navigables, une largeur de cours d'eau est calculée (voir méthode ci-après) et permet d'ajuster les échelles d'analyses latérales en fonction de la taille effective du cours d'eau. Le lit majeur est estimé comme correspondant à l'aléa faible (période de retour > 100 ans) de la cartographie de l'aléa inondation.

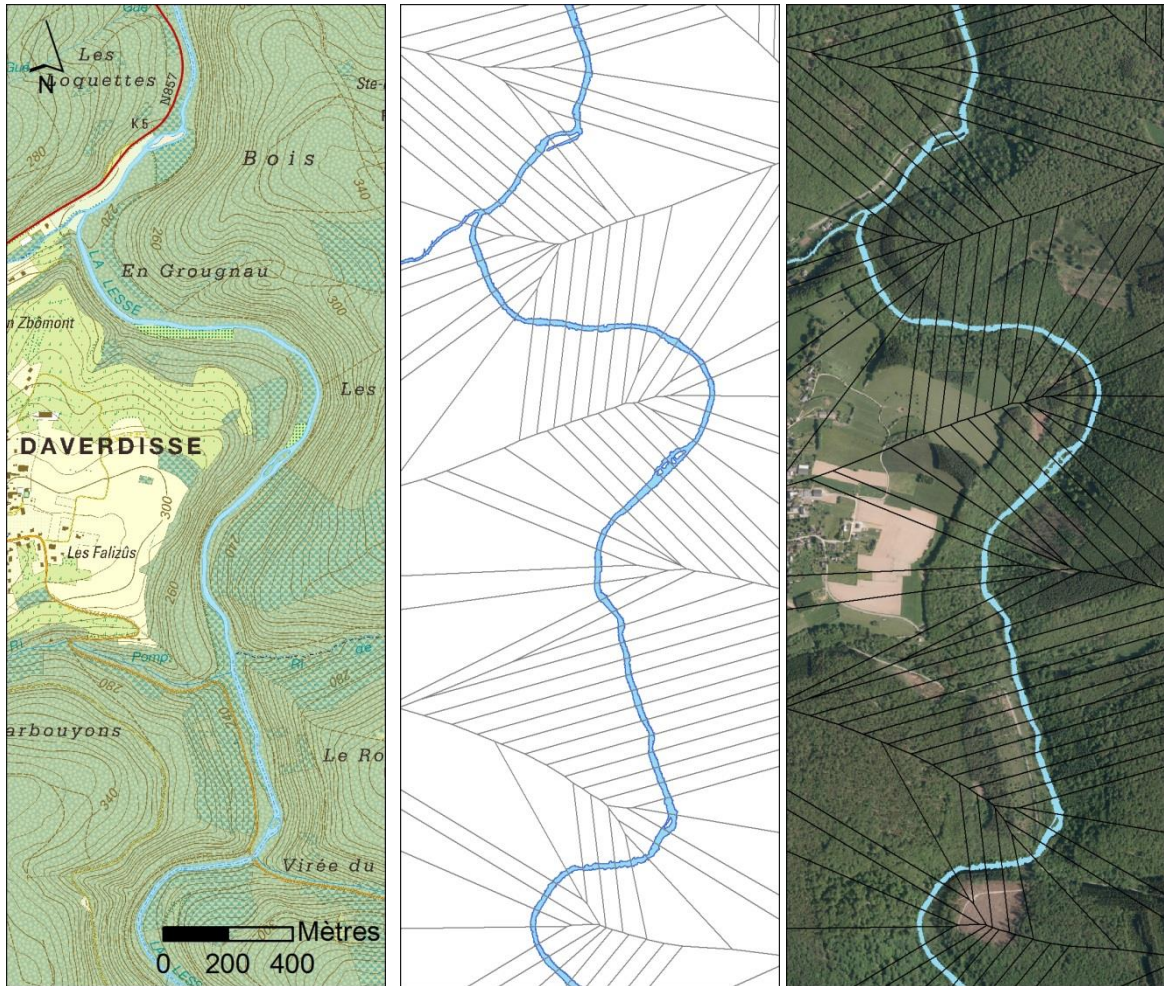


FIGURE 33: ECHANTILLONAGE LONGITUDINAL DE LA PLAINE ALLUVIALE : VUE AÉRIENNE DU SECTEUR « LESSE 007 » (ORTHO 2012) ET DÉCOUPAGE LONGITUDINAL VIA LES POLYGOUES DE VORONÏ

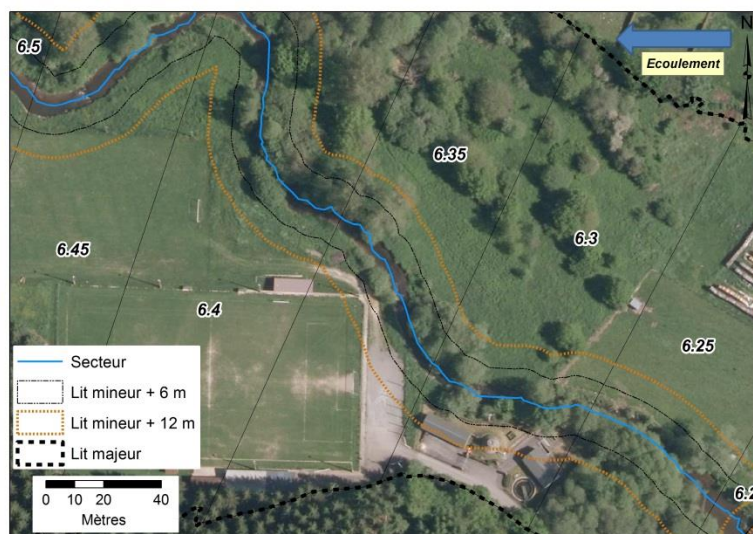


FIGURE 34 : ECHANTILLONAGE LONGITUDINAL ET LATÉRAL – LA HOUILLE EN AVAL DE VENCIMONT

Une fois les variables calculées à l'échelle de chaque segment de plaine alluviale (≈ 50 m selon l'axe de la vallée), une procédure de réagrégation (Figure 35) va permettre de synthétiser l'information à une échelle supérieure (secteur de gestion < masse d'eau < sous-bassins).

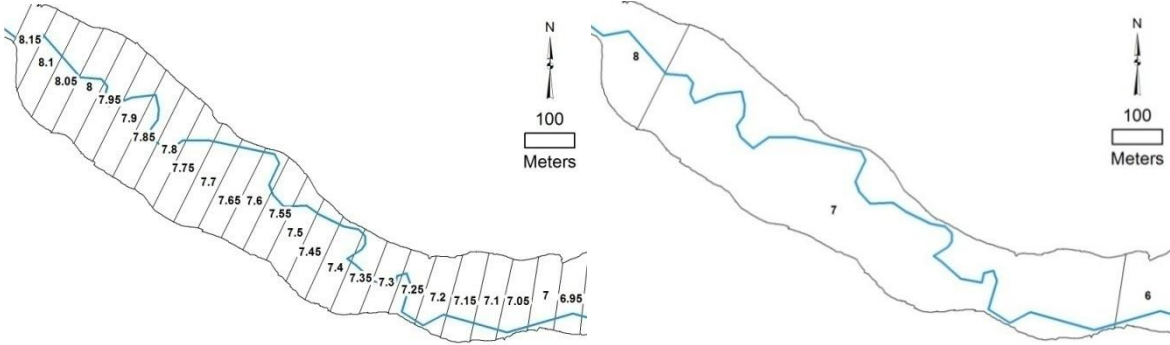


FIGURE 35 : PROCÉDURE DE RÉAGRÉGATION

EXTRACTION DE VARIABLES MORPHOLOGIQUES

La Table 16 liste les différents indicateurs proposés en matière de caractérisation de la morphologie des secteurs ainsi que des plaines alluviales associées. L'ensemble de ces indicateurs dépendent directement du jeu de donnée LiDAR (principalement le MNT) et ne peuvent être mise à jour sans un renouvellement de la couverture LiDAR.

TABLE 16 : LISTE DE PARAMÈTRES MORPHOLOGIQUES DÉRIVÉS PRINCIPALEMENT DU MNT LIDAR (OU DU NUAGE DE POINTS DIRECTEMENT)

Indicateur	Paramètre	Zone d'intérêt	Champs d'application	Intérêt
Hauteur relative au pied de berge	Moyenne / Ecart-type	Plaine alluviale	Tous les secteurs	Mise en évidence de renforcement de berge, caractère ripicole de la zone analysée, diversité spatiale de la topographie
Largeur du cours d'eau	Médiane / coefficient de variation	Lit mineur	Secteurs C1 et Nav	Appréhension de l'échelle spatiale du cours d'eau, diversité de la morphologie du lit
Largeur de la plaine alluviale	Largeur de l'aléa	Lit majeur	Tous les secteurs où l'info aléa est disponible	Appréhension de l'échelle spatiale du cours d'eau, mise en évidence de séquences d'évolution de l'ouverture d'une vallée
Sinuosité (VS axe vallée)	Coefficient de sinuosité	Tracé longitudinal du secteur et axe de la vallée	Tous les secteurs	Diversité spatiale longitudinale du cours d'eau, diversité des faciès hydromorphologiques
Altitude	Moyenne / pente	Plaine alluviale	Tous les secteurs	Paramètre synthétique, descriptif partiel des conditions locales
<i>Terrain Ruggedness Index (TRI) / Indice de rugosité</i>	Moyenne	Plaine alluviale	Tous les secteurs	Diversité spatiale de la topographie
<i>Topographic Position Index (TPI) / Indice de position topographique</i>	Moyenne	Plaine alluviale	Tous les secteurs	Mise en évidence de portions basses de la zone analysée, caractère ripicole/marécageux de la zone analysée

HAUTEUR RELATIVE AU PIED DE BERGE

La principale variable dérivée du Modèle Numérique de Terrain LiDAR basse densité est la hauteur relative au pied de berge. Déjà testée lors du premier projet Imageau, celle-ci permet d'étudier la morphologie du relief à proximité du cours d'eau et notamment d'identifier localement des zones d'incisions du cours d'eau (Figure 36).

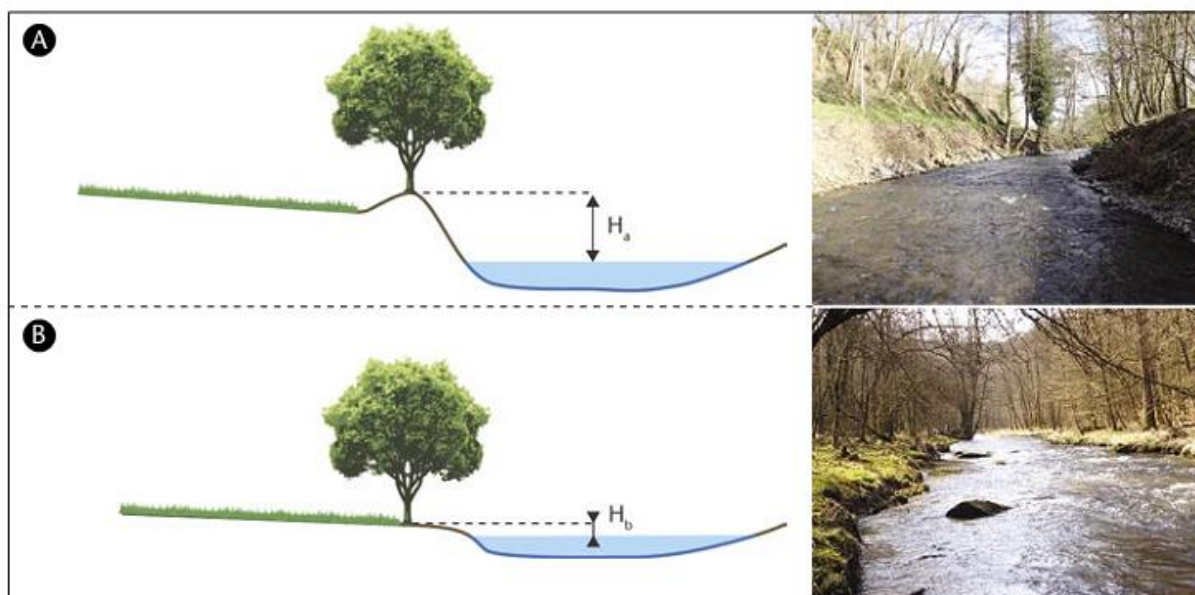


FIGURE 36 : DEUX CAS DE FIGURE DE HAUTEUR RELATIVE AU PIED DE BERGE : $H_A > H_B$

A : LA HOUILLE À FLOHIMONT (GIVET) ; B : LA HOUILLE EN AVAL DE VENCIMONT

Cette hauteur relative est calculée à partir d'un MNT relatif, donnant pour chaque pixel une hauteur par rapport à une référence, ici, l'altitude minimale à l'échelle de la zone d'analyse, que l'on approxime à l'altitude du pied de berge pour le tronçon considéré.

La méthode de construction du MNT relatif consiste à construire un plan de référence altimétrique dans le but d'évaluer les hauteurs rapportées au fond de vallée en tout point des sections orthogonales à l'axe médian des vallées (Figure 37). Les sections orthogonales à l'axe médian sont obtenues à partir des polygones de Voronoï préalablement délimités à partir de points répartis le long de cet axe médian (Figure 33). Pour chaque échantillon de plaine alluviale (Figure 37 - B), l'altitude de chaque pixel est soustraite à l'altitude minimale de l'échantillon considéré (\approx altitude minimale du pied de berge pour le tronçon donné). Le raster-résultat est donc un MNT relatif, donnant pour chaque pixel une hauteur relative à la surface de l'eau (Figure 37 - C).

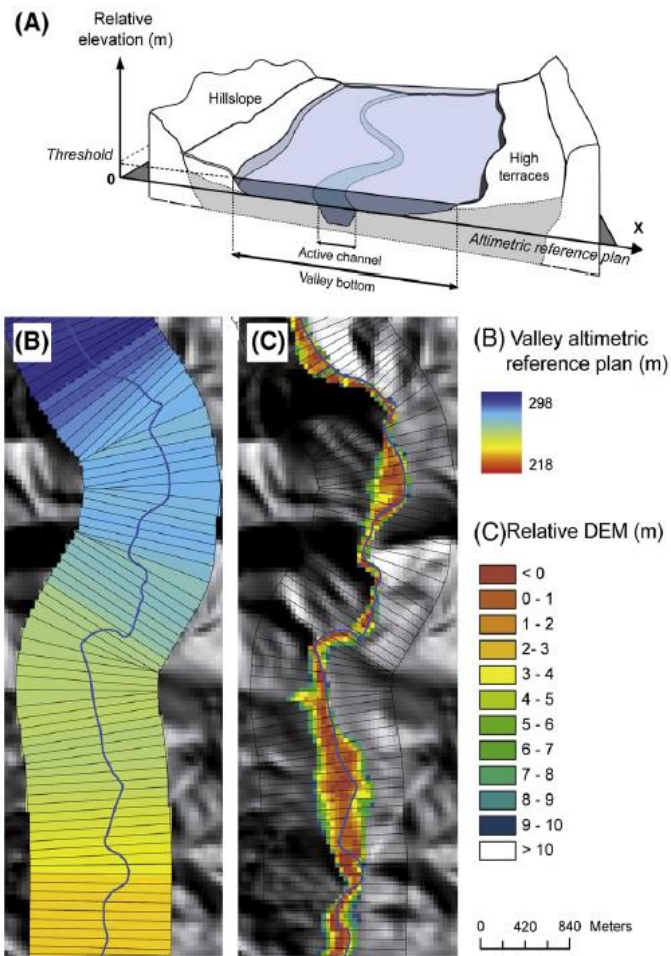


FIGURE 37 : A) PLAN DE RÉFÉRENCE ALTIMÉTRIQUE B) DÉCOUPAGE D'UN FOND DE VALLÉE THÉORIQUE (BUFFER THÉORIQUE AUTOUR DU CHENAL) C) CONSTRUCTION DU MNT RELATIF - D'APRÈS (ALBER AND PIÉGAY, 2011)⁶

Pour un échantillon de plaine alluviale X_i , la hauteur relative globale correspond à la hauteur relative moyenne calculée pour l'ensemble de l'échantillon X_i tandis que la hauteur relative au pied de berge de la ripisylve se rapportera à cette même hauteur, mais cette fois moyennée uniquement pour les pixels classés en tant que « ripisylve ». Dans le cadre de la caractérisation des secteurs, cet indicateur sera évalué à travers une moyenne et un écart type, calculé pour l'ensemble de la zone d'analyse ainsi que pour la ripisylve.

SINUOSITÉ

La sinuosité est calculée à l'échelle de chaque secteur et correspond au rapport de la longueur du tracé du secteur considéré sur la longueur de l'axe de vallée précédemment extrait. Ce paramètre permet une meilleure appréhension de la diversité longitudinale du tracé du cours d'eau. Au niveau local, la sinuosité peut permettre la mise en évidence des différences de diversité des tracés, pouvant être liée à des modifications/rectifications de tronçons.

⁶ Alber, A., & Piégay, H. (2011). Spatial disaggregation and aggregation procedures for characterizing fluvial features at the network-scale: Application to the Rhône basin (France). *Geomorphology*, 125(3), 343-360.

LARGEUR DU COURS D'EAU

Pour les secteurs de première catégorie où une cartographie du lit mineur a été réalisée à l'aide d'eCognition et sur base du jeu de données LiDAR basse densité (cf. section *Cartographie des secteurs de 1ère catégorie et navigables*), une largeur médiane du lit mineur est calculée et est ajoutée aux buffers délimitant les zones d'analyses latérales. Cette largeur est calculée via une intersection entre les polygones de Voronoï préalablement générés lors de l'étape de désagrégation et le polygone « lit mineur » extrait du jeu de données LiDAR basse densité. Cette donnée ne couvrant pas la totalité du réseau hydrographique classé concerné, un seuil de 50% du linéaire étudié est appliqué afin d'utiliser ou ne pas utiliser cette information. La médiane est utilisée pour sa plus grande robustesse aux valeurs parfois aberrantes pouvant être obtenues lors de l'extraction automatique du lit mineur. Afin d'évaluer la diversité de ce paramètre, le coefficient de variation est évalué à l'échelle du secteur de gestion.



FIGURE 38 : EXTRACTION DE SECTIONS TRANSVERSALES DU LIT MINEUR (CALCUL D'UNE LARGEUR MÉDIANE) EXTRAIT DU JEU DE DONNÉE LIDAR

LARGEUR DU LIT MAJEUR OU LARGEUR DE L'ALÉA

La largeur du lit majeur est appréhendée via l'analyse du polygone 'aléa faible' de la couche 'Aléa d'inondation par débordement de cours d'eau' produite par le SPW. Lorsque celui-ci est disponible sur un minimum de 50% du linéaire du secteur considéré, la largeur de l'aléa est extraite à partir de la médiane des largeurs individuelles extraites grâce à la segmentation longitudinale (polygones de Voronoï). Cette méthode permet une mise à jour automatique de l'information de largeur du lit majeur à chaque mise à jour de l'aléa inondation en Wallonie. A titre de comparaison, une largeur d'aléa est calculée selon la même méthode mais en utilisant comme donnée source une couche 'aléa' ayant été produite lors des conventions sectorisations. Le nettoyage réalisé lors des précédentes conventions 'sectorisation' consistait en une interprétation par un opérateur des limites du lit majeur pour chaque secteur individuel. Cette approche permet d'éliminer pour chaque secteur, les portions de plaine alluviale ne correspondant pas au linéaire considéré : lit majeur d'affluent ou de réseau non classé, surlargeur liée aux confluences, ... Cette opération est toutefois coûteuse en temps et nécessite d'être renouvelée à chacune des mises à jours de la couche aléa. Ces deux valeurs de largeur de l'aléa inondation sont comparées à la largeur de l'aléa telle que calculée lors des conventions sectorisation.

ALTITUDE MOYENNE ET PENTE

L'altitude moyenne est calculée à l'échelle des secteurs pour les différentes échelles d'analyses latérales. La pente est également calculée pour ces mêmes échelles. Ces paramètres sont intégratifs de toute une série de variables environnementales, notamment en lien avec les régions naturelles. Ils ne sont probablement pas d'une utilité directe pour les caractérisations fines à l'échelle du secteur, mais seront utilisés pour notamment évaluer leur transposition qui devrait être a priori homogène pour les différentes régions naturelles, voir les différentes typologies de masse d'eau.

INDICES TRI ET TPI : INDICE DE RUGOSITÉ ET DE POSITION TOPOGRAPHIQUE

Ces variables sont toutes deux directement calculées sur base du MNT LiDAR. Elles décrivent la diversité locale des portions de territoire analysées en les analysant à l'aide de fenêtres mobiles. Elles sont calculées dans R à l'aide de la fonction '*terrain*' du package '*raster*'. Toutefois, la construction de ces variables est relativement simple et pourrait être implémentée au sein d'ArcGIS. Le résultat est un raster dont chaque pixel est le résultat de l'analyse comparatif entre le pixel considéré et les pixels avoisinant (cf. Figure 39).

$Z_{(-1,1)}$	$Z_{(0,1)}$	$Z_{(1,1)}$
$Z_{(-1,0)}$	$Z_{(0,0)}$	$Z_{(1,0)}$
$Z_{(-1,-1)}$	$Z_{(0,-1)}$	$Z_{(1,-1)}$

FIGURE 39 : CONSTRUCTION DU TPI ET DU TRI SUR BASE DE FENÊTRE D'ANALYSE MOBILE, D'APRÈS WILSON ET AL. (2007)⁷

L'indice de rugosité (*Terrain Ruggedness Index*) est calculé pour chaque pixel et correspond à l'écart maximal (valeur absolue) entre l'altitude du pixel considéré et ses voisins directs. Une valeur importante du TRI reflétera donc une plus grande diversité locale de la topographie. Vu le caractère dynamique (érosion, inondation, ...) associé à des zones riveraines fonctionnelles et donc actives, ce paramètre peut être relié à une plus grande naturalité potentielle de la zone analysée.

L'indice de position topographique (*Topographic Position Index*) est quant à lui évalué pour chaque pixel en réalisant la différence entre la valeur de l'altitude du pixel considéré et la moyenne des pixels avoisinant. Une valeur faible du TPI signifie permet donc de mettre en évidence des portions basses du paysage, de manière plus grossière que l'estimation de la hauteur relative au pied de berge.

Ces deux paramètres seront évalués à l'échelle du secteur et pour les différentes échelles d'analyses latérales à travers une moyenne globale.

⁷ Wilson, M. F., O'Connell, B., Brown, C., Guinan, J. C., & Grehan, A. J. (2007). Multiscale terrain analysis of multibeam bathymetry data for habitat mapping on the continental slope. *Marine Geodesy*, 30(1-2), 3-35.

EXTRACTION DE VARIABLES « RIPISYLVES »

Le Modèle Numérique de Hauteur peut fournir des informations précieuses pour le gestionnaire de cours d'eau, notamment en termes d'état d'entretien des ripisylves occupant le domaine géré. Avec la perspective de pouvoir actualiser ces MNH lors de chaque vol ortho sur base trisannuelle, voir sur base annuelle, ces outils sont de nature à changer radicalement la gestion des ripisylves, notamment en améliorant la planification des entretiens via une objectivation de l'état des peuplements présents.

Pour une plus grande automatisation et pour limiter les échanges entre plateformes (un maximum de processus sont développés dans R), l'approche « objet » développée lors du premier projet Imageau a été remplacée par une approche « pixel » lors du second projet Imageau. L'approche pixel délimite les éléments « ripisylve » sur base d'un seuil de hauteur, fixé à 2 m, afin d'éviter un maximum la végétation herbacée basse. Afin de limiter les « faux positifs » liés aux bâtiments, le MNH est « nettoyé » sur base des informations issues de la TOP10VGIS de l'IGN en approximant ces zones à 0.

Les secteurs souterrains ont été exclus de l'analyse pour des raisons évidentes de cohérence de résultat.

TABLE 17 LISTE DE PARAMÈTRES DES RIPISYLVES PRINCIPALEMENT DÉRIVÉS DU MNH MIXTE 2012

Indicateur	Paramètre	Zone d'intérêt	Champs d'application	Intérêt
Continuité longitudinale	Moyenne	Patch ripisylve	Tous les secteurs	Structure longitudinale de la ripisylve, qualité de l'habitat bande riveraine
Hauteur des ripisylves	Moyenne / coefficient de variation	Patch ripisylve	Tous les secteurs	Diversité de la structure verticale de la ripisylve, mise en évidence des ripisylves matures (biodiversité), quantification de la ressource et/ou de l'effort d'entretien
Ripisylve en surplomb	Rapport $S_{\text{ripi en surPb}} / S_{\text{lit mineur}}$	Patch ripisylve / Pol. 'lit mineur' LiDAR	Secteurs C1 et navigables	Evaluation de l'effet d'ombrage, quantification de l'interface directe ripisylve/lit mineur
Hauteur relative au pied de berge	Moyenne	'Patch ripisylve'	Tous les secteurs	Caractère ripicole des ripisylves (<i>terrestrialization</i>), diversité spatiale de la topographie

CONTINUITÉ LONGITUDINALE

La continuité de la ripisylve est d'une importance majeure pour de nombreuses espèces mais également dans l'accomplissement du rôle de tampon des effluents agricoles. Elle est une composante fondamentale de la fonctionnalité des ripisylves, notamment en tant que réseau écologique, tant pour la dispersion des végétaux que pour le maintien et la migration d'espèces animales.

La cartographie de la continuité longitudinale revient à localiser, pour une zone d'intérêt donnée, les zones de présence et d'absence de la ripisylve. La méthodologie développée est donc construite autour de ces deux éléments : la définition d'une zone d'intérêt (plusieurs cas de figure étudiés dans l'approche développée) et la cartographie de la ripisylve et de ses trouées.

Pour un échantillon de plaine alluviale X_i , la continuité longitudinale sera évaluée à travers le rapport entre la superficie de la ripisylve présente dans l'échantillon X_i et la superficie totale de l'échantillon X_i :

$$\text{Continuité longitudinale } X_i (\%) = 100 * S_{\text{ripisylve } X_i} / S_{\text{tot } X_i}$$

avec $S_{\text{ripisylve } X_i}$: superficie occupée par la ripisylve pour l'échelle d'analyse considérée

$S_{\text{tot } X_i}$: superficie de l'échantillon considéré

HAUTEUR DES RIPISYLVES

L'étude de la hauteur des ripisylves a pour vocation la localisation d'éléments favorables à la qualité des ripisylves en tant qu'habitat, telle la présence d'individus matures et sénescents, voire la diversité structurelle liée à la présence de différents stades de développement des ripisylves. La hauteur des ripisylves peut également être un bon indicateur dans la planification des coupes et des interventions sur celle-ci dans le cadre des PARIS.

La hauteur des ripisylves sera abordée via deux variables simples : la hauteur moyenne et le coefficient de variation à l'échelle de l'unité spatiale analysée. Les données de hauteur ne permettant pas une mesure directe de la circonférence des arbres, la présence d'individus matures peut être envisagée via l'étude de la hauteur moyenne des ripisylves. Tandis que la diversité structurelle de la ripisylve peut quant à elle être abordée via le calcul du coefficient de variation de la hauteur pour un échantillon donné.

RIPISYLVE EN SURPLOMB

Par ripisylve en surplomb, on entend la surface de ripisylve en surplomb par rapport au polygone 'lit mineur' estimé à l'aide du jeu de donnée LiDAR (cf. section *Cartographie des secteurs de 1ère catégorie et navigables*). Cette variable n'est donc estimée que pour les secteurs de 1^{ère} catégorie ainsi que les navigables.

Au-delà de l'impact majeur de la ripisylve sur la régulation des températures de l'eau ripisylve à proximité directe du cours d'eau joue un rôle crucial dans la création et le maintien d'habitats favorables à la faune piscicole. Elle a également un rôle "nourricier" extrêmement important pour la biocénose de la rivière. Sous-berges, racines, branches immergées, embâcles, sont autant d'habitats liés à la présence d'une ripisylve adjacente qui constituent des abris nécessaires à la faune piscicole.

Cette variable est évaluée à l'échelle du secteur, sous forme d'indice reflétant le pourcentage du polygone 'lit mineur' se surimposant au patch 'ripisylve' ($MNH > 2m$).

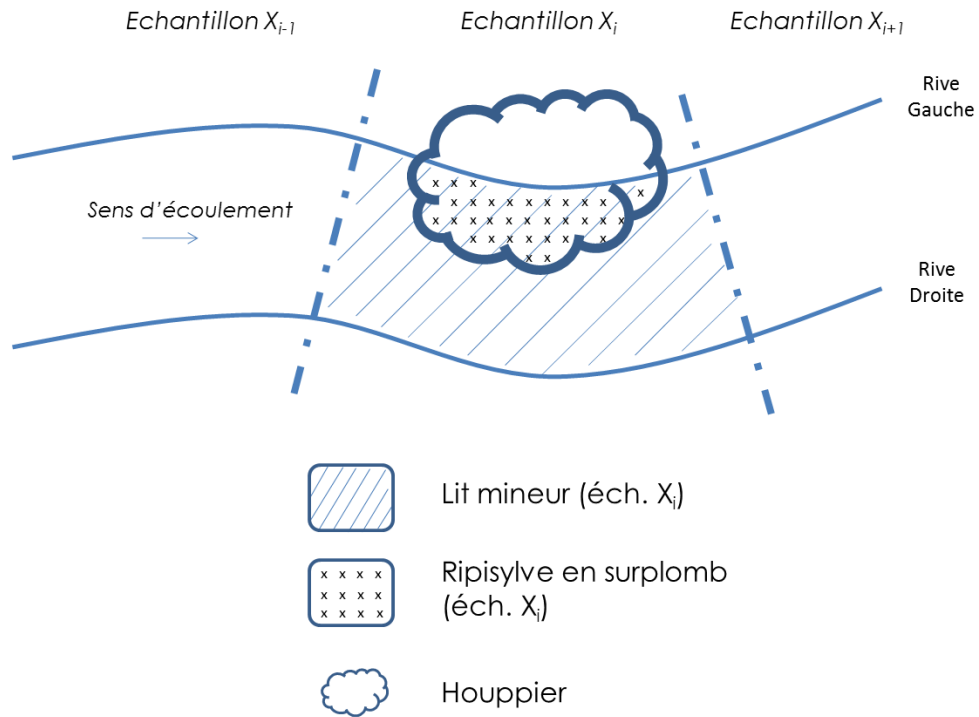


FIGURE 40 : RIPISYLVE EN SURPLOMB POUR L'ÉCHANTILLON DE PLAINE ALLUVIALE X_i

HAUTEUR RELATIVE AU PIED DE BERGE

La quantification de cette dernière variable correspond à la même analyse que celle développée dans la section précédente (cf.

Extraction de variables morphologiques), à la distinction près que cette analyse est limitée aux portions du territoire occupées par la ripisylve. Cette variable peut p. exemple faciliter la mise en évidence de ripisylve 'perchées' et ne présentant que peu de caractères (eg : composition spécifique, structure) en lien avec leur proximité du milieu aquatique (Figure 36).

EXTRACTION DE VARIABLES DÉRIVÉES DE DONNÉES VECTORIELLES

POLYGONES FORESTIERS « FERRARIS »

Les polygones forestiers de la carte de Ferraris ont récemment été digitalisés par l'équipe du DEMNA. Cette cartographie, datant de la fin du 18^{ème} siècle, permet de mettre en évidence avec une précision à mettre en perspective avec les outils disponibles à cette époque, les bandes riveraines situées au sein de massifs forestiers anciens. Cette variable, quoiqu'indicative, est de nature à compléter les informations par secteurs, et notamment en matière d'intérêt en termes de biodiversité et de conservation pouvant justifier des mesures de gestions particulières. Cette information est synthétisée sur forme d'un indice représentant la proportion d'échantillons longitudinaux touchant la source de donnée (échelle latérale : lit mineure +100m).

ACCESSIBILITÉ DES SECTEURS

Cette dernière variable est proposée à titre provisoire, actuellement calculée sur une distance euclidienne moyenne du secteur par rapport au réseau routier, cette variable donne une indication sur l'accessibilité du secteur pour l'entretien de celui-ci. Pareille réflexion ont déjà été menée par l'axe GRF pour les questions de voiries forestières et d'accessibilités pour les machines d'exploitation⁸. Cette distance peut notamment être pondérée en fonction d'obstacles qui peuvent se trouver entre la zone à desservir et le réseau routier : jardins, zones de fortes pentes, rivière elle-même (selon gabarit), ...

UTILISATION D'INDICATEURS MULTITEMPORELS

L'utilisation d'indicateurs multitemporels pourrait notamment être envisagée pour caractériser l'évolution des ripisylves pour un pas de temps donné (e.g. mi-parcours des PARIS). L'étude multitemporelle de l'évolution de la continuité longitudinale des ripisylves permettrait de mettre en évidence des modifications importantes apportées aux ripisylves. L'étude de la variation de cette continuité pourrait par exemple mettre en évidence des interventions ayant lieu à proximité du cours d'eau (coupes abusives, impacts de l'exploitation forestière en bordure de cours d'eau, ...). Dans le futur, ce genre d'analyse pourrait permettre le monitoring de l'impact sur les bandes riveraines de la mise en place de nouvelles réglementations telle que l'imposition de la pose de clôtures sur les berges des cours d'eau.

RELATIONS ENTRE LES INDICATEURS (ANALYSES ACP)

Avec plus de 5000 observations pour pas moins de 60 variables, la base de données constituée par la caractérisation de l'ensemble des secteurs est conséquente. Une analyse en composante principale (ACP) permet d'évaluer les relations entre les différentes variables, ainsi qu'entre les différents groupes d'individus (secteurs). Cette analyse peut notamment permettre de mettre en évidence la complémentarité (ou la redondance) entre différentes variables. Une analyse a posteriori de variables qualitatives connexes telles que la région naturelle des masses d'eau sera également réalisée. Ce type d'analyse permet d'identifier visuellement la distinction de différents groupes sur le

⁸ Colson, V. and Braun, M., Debaty, J. and Lejeune, P. Identification des zones déficitaires en desserte forestière à l'échelle d'un territoire communal. Forêt wallonne, 2011, (114), 26-36.

plan factoriel et donc le caractère discriminant associé aux variables proposées. Cette analyse est intégralement réalisée dans R, principalement à l'aide du package 'FactoMineR'.

DÉVELOPPEMENT D'OUTIL DE VISUALISATION DES CARACTÉRISTIQUES DES SECTEUR INDIVIDUEL

Plusieurs outils sont envisagés dans cette section. Ces outils portent sur différentes caractéristiques des secteurs et ont pour objectif de synthétiser quelques informations clés à destination du gestionnaire. Ces outils pourraient servir de base afin d'améliorer la convivialité de la plateforme en ligne PARIS et mettre en perspective une information tabulaire très importante.

VISUALISATION DE PROFILS À L'ÉCHELLE DU SECTEUR : PROFIL EN TRAVERS ET PROFIL EN LONG

Pour chaque secteur, le processus de désagrégation rend possible l'exploitation de **profils topographiques transversaux** (1 point / m) situés à une distance de 50m selon l'axe de vallée. La sélection du profil se fait via l'ajustement d'un modèle polynomial (package *lme4* dans R) sur base de l'ensemble de ces profils. Le profil sélectionné est celui présentant la plus grande proximité statistique avec le modèle polynomial construit. Une fois le profil sélectionné, le package *ggplot2* est utilisé dans R afin de visualiser celui-ci. Les profils transversaux sont potentiellement générés pour l'intégralité des secteurs aériens. Toutefois, il est probable que les profils générés pour les secteurs de 2^{ème} et 3^{ème} catégories souffrent de la qualité inférieure de la donnée géométrique (linéaire issus de l'ancien réseau hydro).

L'extraction des **profils en long** est plus simple et consiste à l'ajustement d'une courbe légèrement lissée basée sur les altitudes minimales au sein des différents échantillons longitudinaux délimités lors du processus de désagrégation. L'échelle latérale de référence pour cette démarche est l'échelle 'lit mineur +12m'. La production des profils longitudinaux est limitée aux secteurs 'simples', présentant un axe de vallée unique. Les secteurs présentant des axes de vallées complexes correspondent aux secteurs comprenant plusieurs axes de cours d'eau indépendants (cas d'un cours principal avec affluent(s) notamment).

VISUALISATION DE L'ÉVOLUTION AMONT/AVAL À L'ÉCHELLE DU SECTEUR INDIVIDUEL

Le processus de désagrégation permet d'évaluer la plupart des variables descriptives des secteurs et des bandes riveraines associées. Cette visualisation peut permettre d'identifier des contraintes à des échelles inférieures au secteur lui-même, comme par exemple des ruptures dans la continuité longitudinale de la ripisylve ou la présence de potentiels renforcements de berge et/ou endiguements (cas de la hauteur relative au pied de berge). Pour des raisons identiques que lors de la construction de profils en long, ce travail n'est envisagé que pour les secteurs 'simples', présentant un axe de vallée unique

SYNTHÈSE À L'ÉCHELLE DU SECTEUR

Lors de ce processus, une synthèse visuelle est réalisée pour chaque secteur sous forme de diagrammes, afin de comparer la valeur observée de quelques variables clés à la moyenne des secteurs de sa catégorie à l'échelle de la masse d'eau.

3.2.2. RÉSULTATS

CALCUL DES VARIABLES DESCRIPTIVES À L'ÉCHELLE RÉGIONALE

L'ensemble des variables reprises au sein de la Table 18 ont été caractérisées à l'échelle régionale. Les variables directement liées à l'information issue du polygone 'lit mineur' LiDAR concernent les cours d'eau de 1^{ère} catégorie ainsi que les secteurs 'Navigables'. La base de donnée comprenant l'ensemble des résultats associés aux secteurs PARIS est disponible au sein du répertoire 'CARACTERISATION_SECTEURS_PARIS' remis à la DCENN.

TABLE 18 : SYNTHÈSE DES VARIABLES DESCRIPTIVES ÉVALUÉES À L'ÉCHELLE DU SECTEUR INDIVIDUEL. NOMBRE DE SECTEURS CONCERNÉS ET NOMBRE DE SECTEURS EFFECTIVEMENT CARACTÉRISÉS

Indicateur	Champs d'application	Nombre de secteurs		
		Potentiel	Effectif	%
Hauteur relative au pied de berge	Tous les secteurs	5639	5639	100%
Largeur du cours d'eau	Secteurs C1 et Nav	751	623	83%
Largeur de la plaine alluviale	Tous les secteurs où l'info aléa est disponible	5639	5224	93%
Sinuosité (VS axe vallée)	Tous les secteurs	5639	5639	100%
Altitude	Tous les secteurs	5639	5639	100%
<i>Terrain Ruggedness Index (TRI) / Indice de rugosité</i>	Tous les secteurs	5639	5639	100%
<i>Topographic Position Index (TPI) / Indice de position topographique</i>	Tous les secteurs	5639	5639	100%
Continuité longitudinale	Tous les secteurs	5639	5639	100%
Hauteur des ripisylves	Tous les secteurs	5639	5639	100%
Ripisylve en surplomb	Secteurs C1 et navigables	751	623	83%
Indice 'Ferraris'	Tous les secteurs	5639	5504	98%
Distance au réseau routier	Tous les secteurs	5639	5639	100%

CAS DE LA LARGEUR DE L'ALÉA ET DE LA LARGEUR DES COURS D'EAU

La Figure 41 présente une comparaison des résultats obtenus à partir de la dernière version de la couche aléa sans aucune modification manuelle et ceux obtenus à partir de la couche aléa remaniée lors des précédentes conventions sectorisation. Le coefficient de corrélation est correct (0,59) mais

l'approche automatique surestime la largeur de l'aléa en comparaison à une approche basée sur une couche aléa modifiée manuellement avant la réalisation de ce même calcul. En plus des différences en lien avec l'évolution de l'information source (une mise à jour majeure de la donnée a eu lieu) , cette surestimation est principalement due à la prise en compte de portions de plaines alluviales non associées au linéaire étudié. La Table 19 reprend quant à elle les coefficients de corrélation entre les largeurs obtenues selon la méthode développée lors des projets Imageau à celle obtenue lors des conventions sectorisation. L'absence de donnée de référence permet difficilement de trancher mais il ressort que l'approche n°1 produit un résultat significativement différent de celui qui avait été obtenu lors des conventions sectorisation.

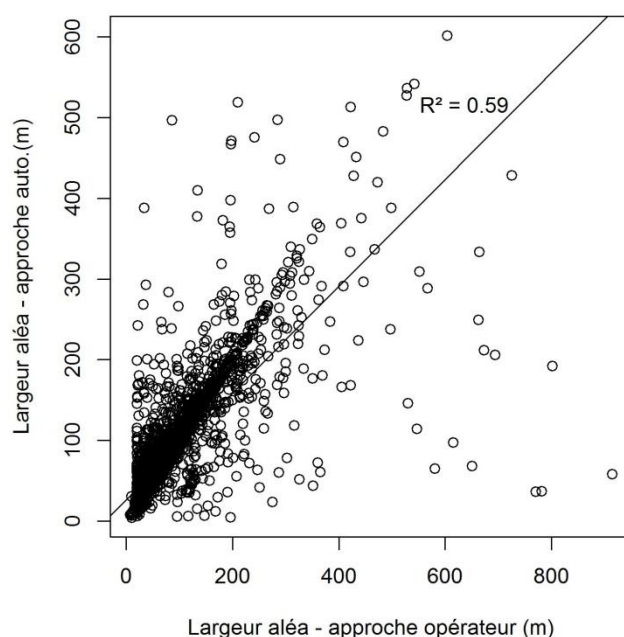


FIGURE 41 : CALCUL D'UNE LARGEUR ALÉA À PARTIR D'UNE VERSION 'NETTOYÉE' PAR UN OPÉRATEUR ET D'UNE VERSION 'BRUTE'

TABLE 19 : CORRÉLATIONS ENTRE LES LARGEURS D'ALÉA OBTENUES À PARTIR DE DIFFÉRENTES SOURCE ET MODALITÉS D'EXTRACTION

Source info largeur d'aléa	Méthode	Réf. Approche	1	2	3
Imageau 3	Imageau 3	1	/	0.59	0.16
Conventions secto	Imageau 3	2	0.59	/	0.58
Conventions secto	Convention secto	3	0.16	0.58	/

PRODUCTION D'UN AXE DE VALLÉE

Un axe de vallée théorique a été produit pour chacun des 5639 secteurs aériens. Les fichiers sont disponibles au sein du répertoire 'AXES_VALLEE' du dossier remis à la DCENN.

ANALYSE MULTIVARIÉE ET PERTINENCE DES INDICATEURS

L'analyse multivariée a été réalisée simultanément à l'échelle des secteurs individuels (potentiellement 5639 observations) ainsi qu'à l'échelle des masses d'eau (345 observations). Afin de ne pas charger la lecture du rapport, seuls les résultats correspondant à l'échelle latérale d'analyse 'lit mineur +12m' est envisagée. Le passage de l'échelle 'secteur' à l'échelle 'masse d'eau' se fait via l'application d'une moyenne pondérée par la longueur des secteurs. L'analyse ACP à l'échelle masse d'eau est également réalisée afin d'évaluer la cohérence des résultats entre les deux échelles. Cette cohérence est souhaitée notamment pour une bonne utilisation des outils développés dans le cadre des reportages DCE, mais également car dans une moindre mesure, l'entité spatiale 'masse d'eau' sera utilisée plus tard dans le présent rapport comme unité de visualisation des résultats à l'échelle régionale.

La Figure 42 présente la visualisation des plans factoriels associés aux variables descriptives de la ripisylve aux deux échelles envisagées. La cohérence entre les deux plans permet de réaliser une interprétation commune. Les deux premières dimensions permettent d'expliquer près de 70% de la variance du jeu de données. L'axe 1, résumant près de 50% de la variance, peut être interprété comme un axe reflétant la structure spatiale de la ripisylve, tant au niveau vertical (hauteur moyenne) qu'au niveau longitudinal. L'axe n°2 est quant à lui principalement lié à la topographie des berges sur lesquelles sont installées les ripisylves. En termes de variables, il est principalement constitué de la hauteur relative au pied de berge moyenne des ripisylves. Ce résultat met en lumière la plus-value de l'étude de la morphologie du terrain sur lequel la ripisylve se développe.

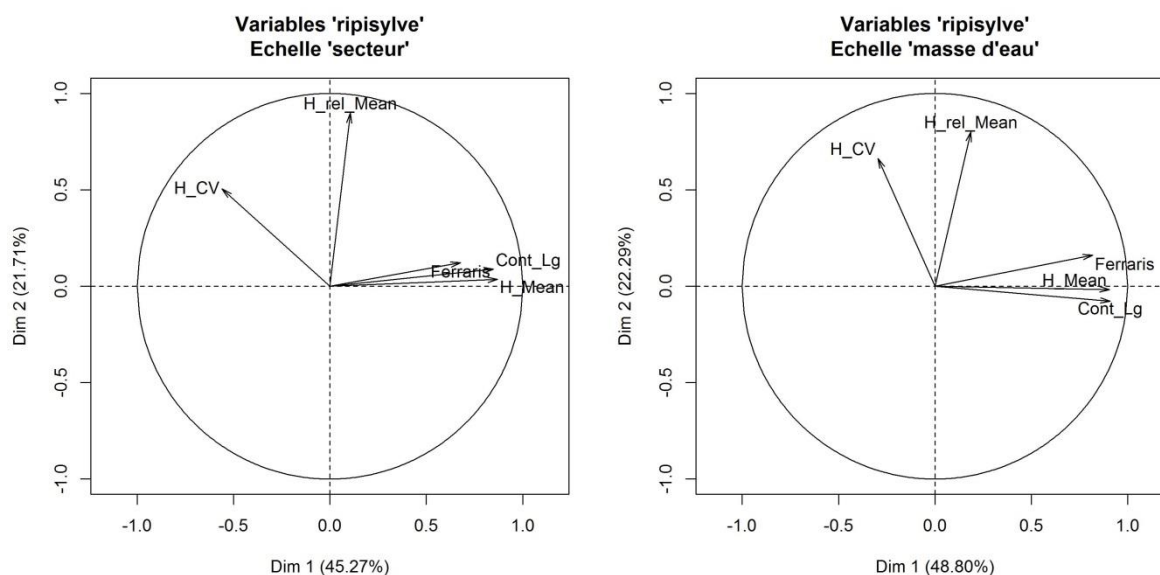


FIGURE 42 : PLAN FACTORIEL DES VARIABLES DÉCRIVANT LA RIPISYLVE DES SECTEURS (ÉCHELLE LIT MINEUR +12M).

GAUCHE : CAS DE L'ENSEMBLE DES SECTEURS ; DROITE : CAS DES SECTEURS AGGRÉGÉS PAR MASSE D'EAU (MOYENNE PONDÉRÉE PAR LA LONGUEUR DU SECTEUR).

H_CV ET H_MEAN : COEF. VARIATION ET MOYENNE DE LA HAUTEUR ; H_REL_MEAN : H. RELATIVE MOYENNE AU PIED DE BERGE DE LA RIPISYLVE ; FERRARIS : PROP. DU LINÉAIRE TOUCHANT LES POLYGONES FORESTIERS DE LA CARTE DE FERRARIS

L'analyse des variables 'morphologie' (Figure 43) est plus complexe en termes d'interprétation de la nature des dimensions et des axes identifiés. L'axe 1 peut être jugé comme similaire aux échelles 'secteur' et 'masse d'eau'. Il regroupe un ensemble de valeurs dont la plus-value individuelle est donc à remettre en question dans le cadre d'une analyse globale. Il peut être associé au caractère encaissé des berges des cours d'eau considérés (zone 'lit mineur +12m'). Le changement de sens du lien entre les variables 'Sinuosité' et 'Ecart-type de la hauteur relative au pied de berge' souligne que l'agrégation de ces variables de l'échelle 'secteur' à l'échelle 'masse d'eau' est à prendre avec certaine précaution.

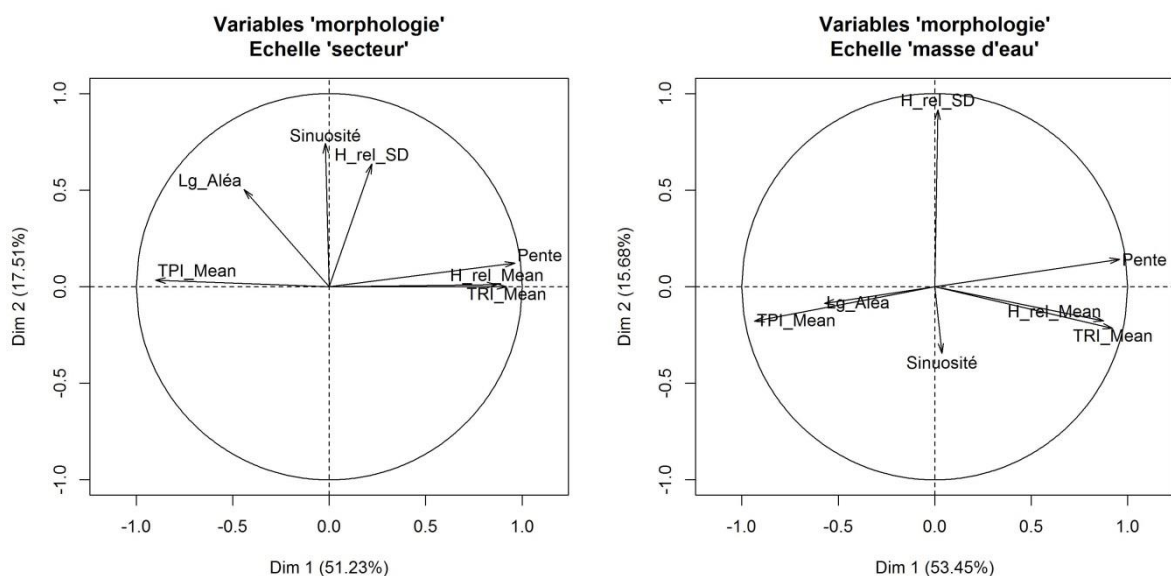


FIGURE 43 : PLAN FACTORIEL DES VARIABLES MORHOLOGIQUES DÉCRIVANT LES SECTEURS (ÉCHELLE LIT MINEUR +12M).
GAUCHE : CAS DE L'ENSEMBLE DES SECTEURS ; DROITE : CAS DES SECTEURS AGGRÉGÉS PAR MASSE D'EAU (MOYENNE PONDÉRÉE PAR LA LONGUEUR DU SECTEUR)
H_REL_SD ET H_REL_MEAN : ÉCART-TYPE ET MOYENNE DE LA H. RELATIVE AU PIEDS DE BERGE MOYENNE ; TPI_MEAN ET TRI_MEAN : TOPOGRAPHIC POSITION ET TERRAIN RUGGEDNESS INDEX ; LG_ALÉA : LARGEUR DE L'ALÉA INONDATION

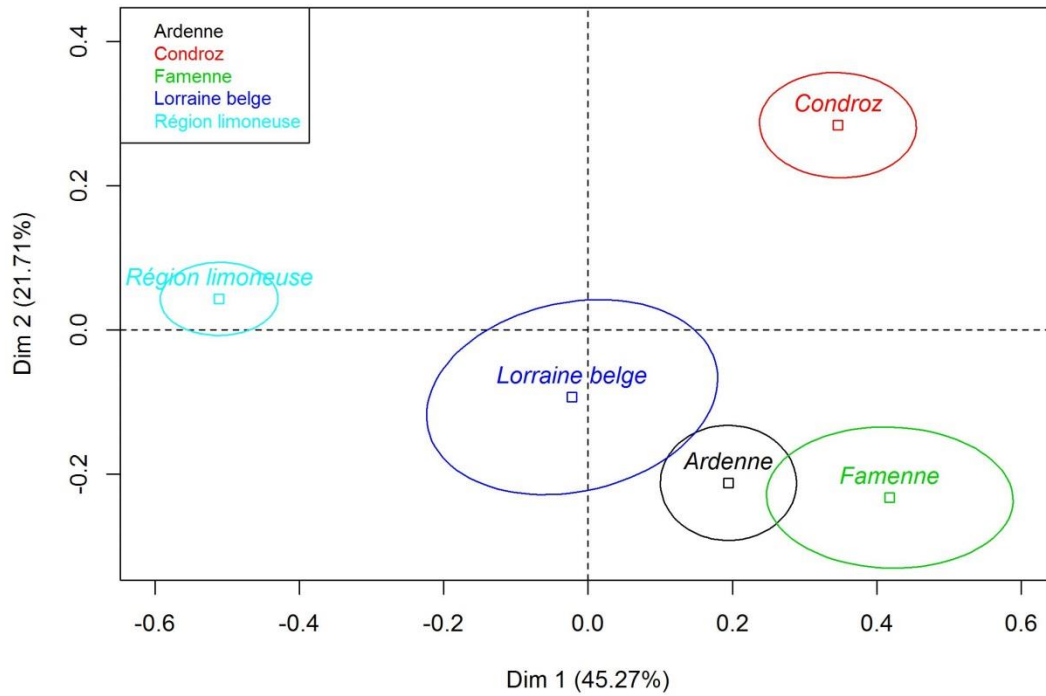
La Figure 44 et la Figure 45 représentent les observations (secteurs et masse d'eau) selon les dimensions identifiées préalablement. L'ajout d'ellipses de confiance permet de visualiser les modalités d'une variable illustrative (ici les régions naturelles) selon les composantes identifiées. Ces ellipses peuvent donc être assimilée au secteur / à la masse d'eau moyen(ne) selon ces composantes.

Pour l'analyse des variables 'ripisylve' (Figure 44), cette analyse permet donc de confirmer les différences importantes entre les structures des ripisylves associées aux régions naturelles. La région limoneuse se distingue nettement des autres, et ce, aux deux échelles étudiées. Les observations associées à cette région sont caractérisées par une valeur faible de l'axe 1, c.-à-d. des ripisylves présentant des valeurs faibles de continuité longitudinale et de hauteur moyenne. Si la séparabilité des différents groupes est quasi-totale pour l'échelle 'secteur', elle est tout de même moins évidente à l'échelle 'masse d'eau'. Le cas de la Famenne est intéressant, avec des valeurs faibles de l'axe 2, correspondant à des valeurs faibles de hauteur relative au pied de berge pour les ripisylves. Cette caractéristique pourrait être attribuée à l'ouverture des vallées en zone Famennienne qui

contrairement à celles de la région limoneuse, est probablement moins contrebalancée par l'auto-incision des lits (en lien avec des aménagements moins nombreux en Famenne).

Le cas de l'analyse des variables morphologiques (Figure 45) est plus délicat à interpréter mais l'axe 1 représentant le caractère encaissé des berges isole nettement les observations associées à la zone limoneuse, présentant des valeurs importantes de l'indice TPI.

**Plan factoriel :
cas des variables 'ripisylve' à l'échelle 'secteur'**



**Plan factoriel :
cas des variables 'ripisylve' à l'échelle 'masse d'eau'**

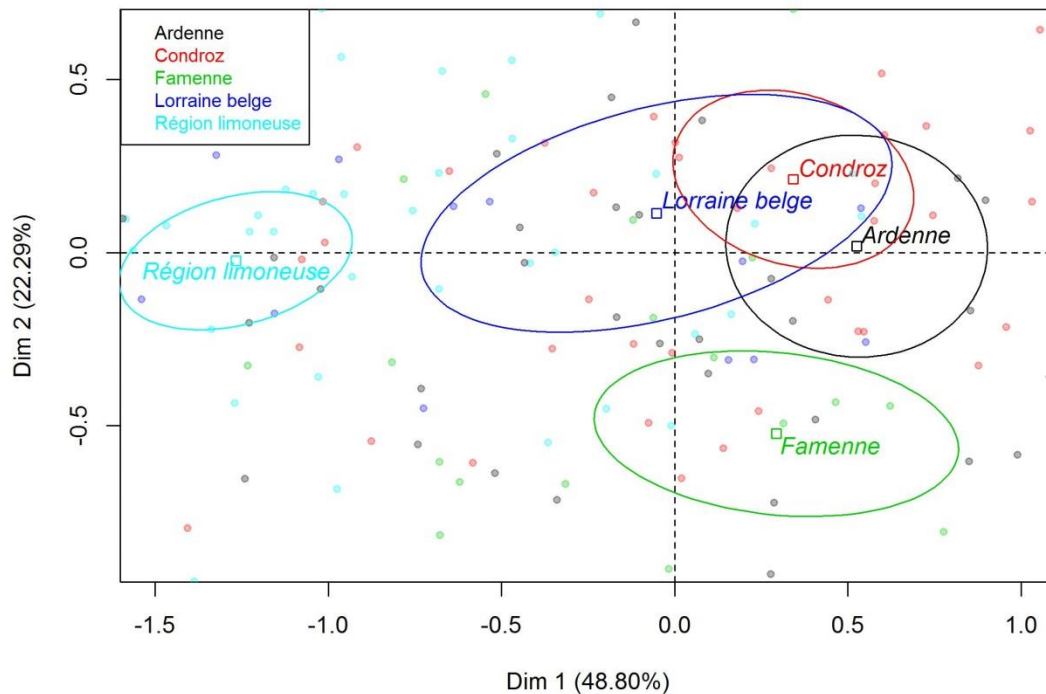
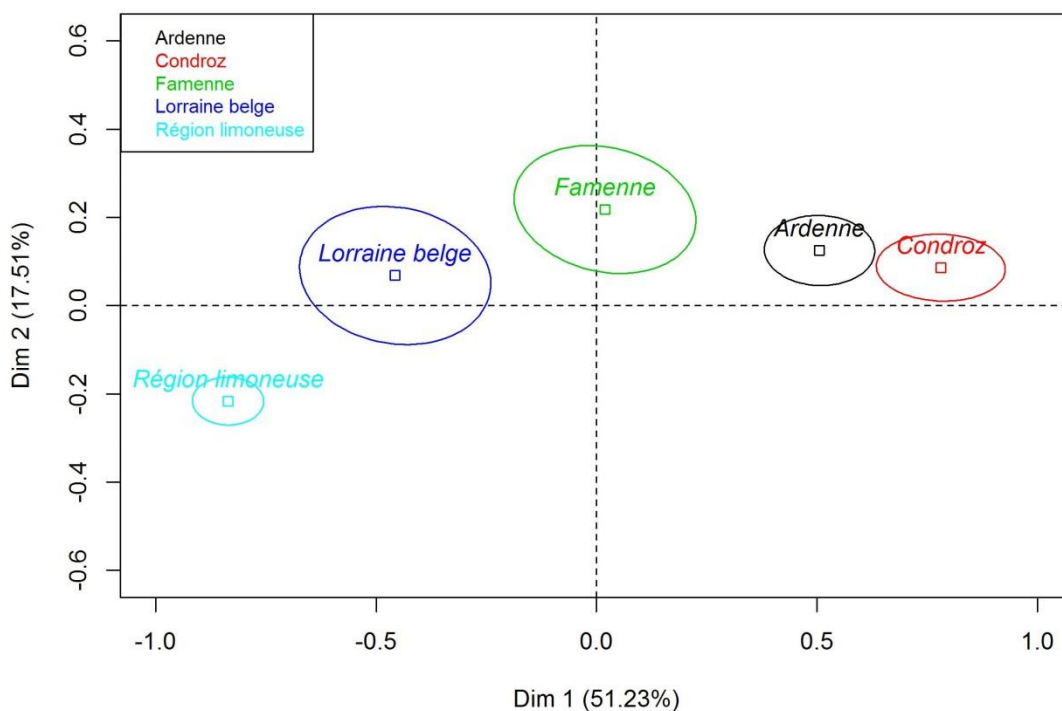


FIGURE 44 : VISUALISATION DES OBSERVATIONS SUR LE PLAN FACTORIEL (ÉCHELLE 'MASSE D'EAU', ÉCHELLE LATÉRALE 'LIT MINEUR +12M') ET ELLIPSE DE CONFIANCE DES DIFFÉRENTES RÉGIONS NATURELLES. CAS DES VARIABLES 'RIPISYLVE'. LES POINTS SYMBOLISANT LES OBSERVATIONS ONT ÉTÉ OMIS POUR LE PLAN FACTORIEL DE L'ÉCHELLE 'SECTEUR' POUR PLUS DE VISIBILITÉ VU LEUR GRAND NOMBRE (> 5000)

**Plan factoriel :
cas des variables 'morphologiques' à l'échelle 'secteur'**



**Plan factoriel :
cas des variables 'morphologiques' à l'échelle 'masse d'eau'**

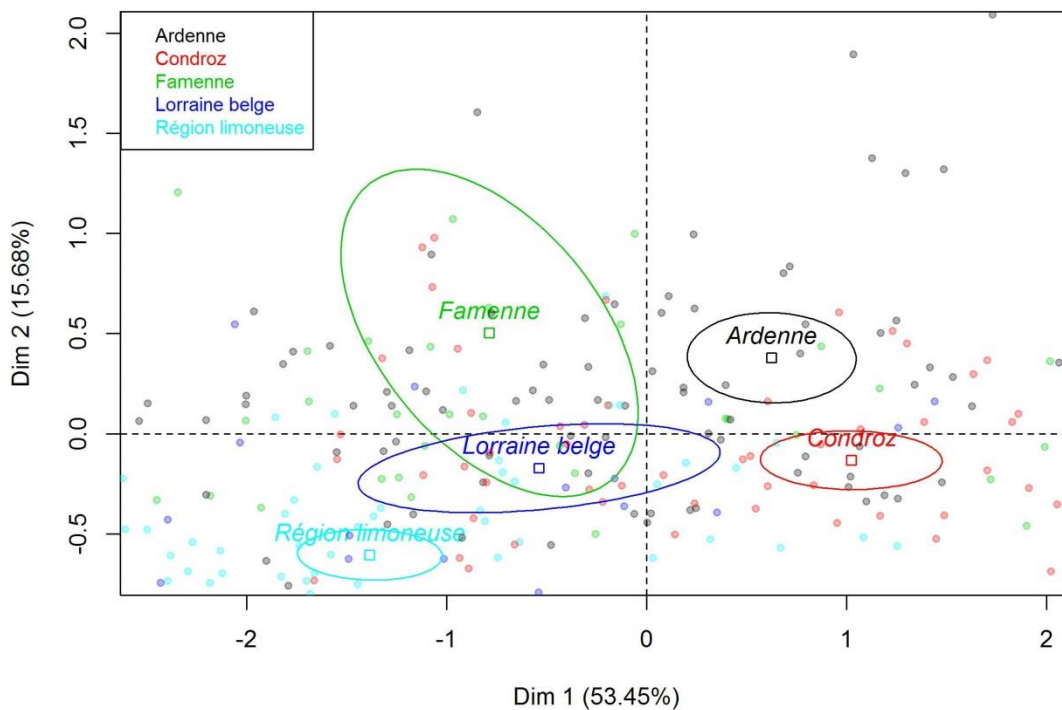


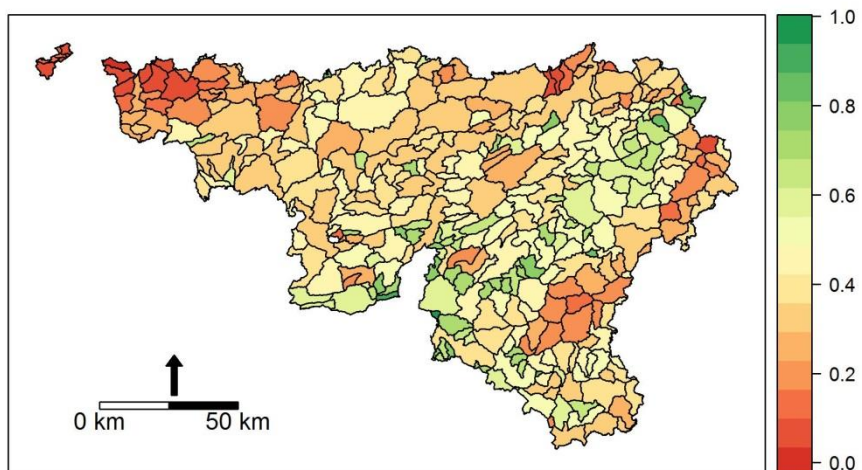
FIGURE 45 : VISUALISATION DES OBSERVATIONS SUR LE PLAN FACTORIEL (ÉCHELLE 'MASSE D'EAU', ÉCHELLE LATÉRALE 'LIT MINEUR +12M') ET ELLIPSE DE CONFIANCE DES DIFFÉRENTES RÉGIONS NATURELLES. CAS DES VARIABLES MORPHOLOGIQUES. LES POINTS SYMBOLISANT LES OBSERVATIONS ONT ÉTÉ OMIS POUR LE PLAN FACTORIEL DE L'ÉCHELLE 'SECTEUR' POUR PLUS DE VISIBILITÉ VU LEUR GRAND NOMBRE (> 5000)

RÉAGRÉGATION POUR UNE VISUALISATION DE PARAMÈTRE À L'ÉCHELLE RÉGIONALE : CAS DES MASSES D'EAU ET DES VARIABLES 'RIPISYLVES'

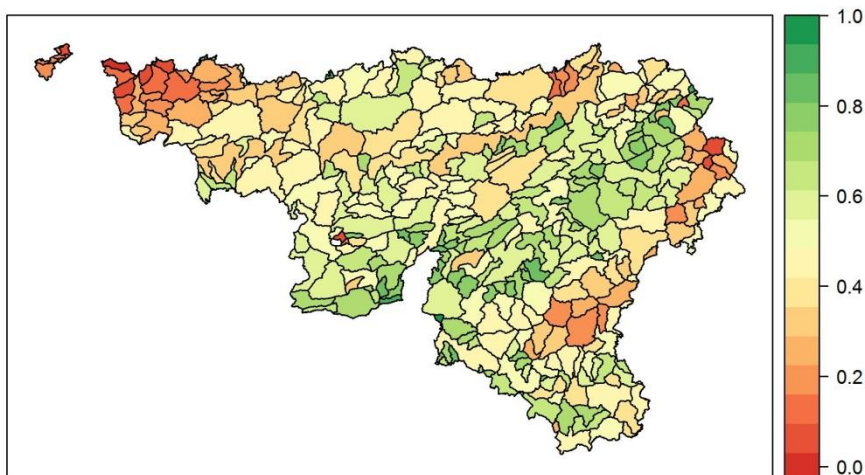
L'analyse en composante principale a permis d'identifier la cohérence d'une réagrégation des variables descriptives de la structure spatiale des ripisylves à l'échelle de la masse d'eau. Cette dernière permet de visualiser ces différents paramètres à l'échelle de la Wallonie. Le cas de la continuité longitudinale (Figure 46) permet d'identifier les grands types de structures longitudinales des ripisylves à l'échelle wallonne. Globalement, les masses d'eau situées dans la région limoneuse au nord du sillon Sambre et Meuse se démarquent, tout comme celles du plateau ardennais (d'Elsenborn à Bastogne). Une tendance visuelle similaire est également observée en matière de hauteur moyenne des ripisylves (Figure 47), ce qui témoignerait d'une présence de ripisylves plus hautes au sein des cordons denses et continus.

Le cas de l'estimation de la proximité des polygones forestiers au sein de la carte de Ferraris semble également refléter cette dichotomie (Figure 48), même si l'agrégation à l'échelle de la masse d'eau est probablement moins pertinente pour cet indicateur, vu le caractère quasi qualitatif de celui-ci, en lien avec la précision relative de la cartographie de Ferraris.

Continuité longitudinale de la ripisylve *Echelle lit majeur*



Echelle lit mineur +12m



Echelle lit mineur +6m

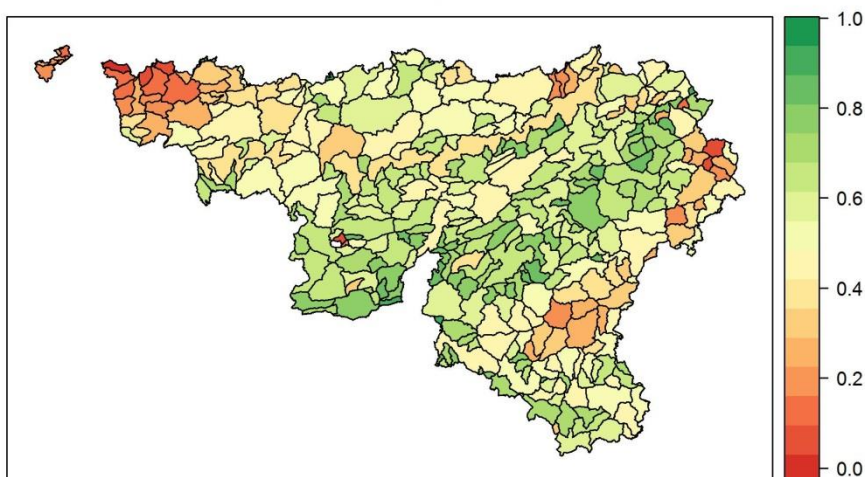
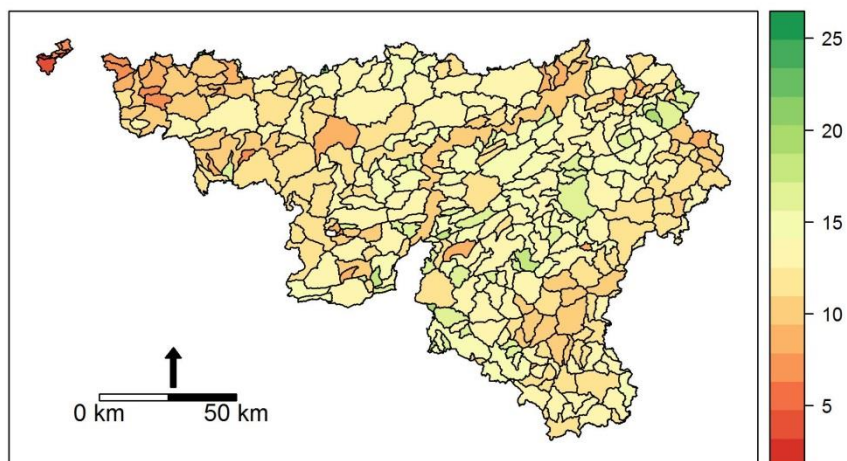


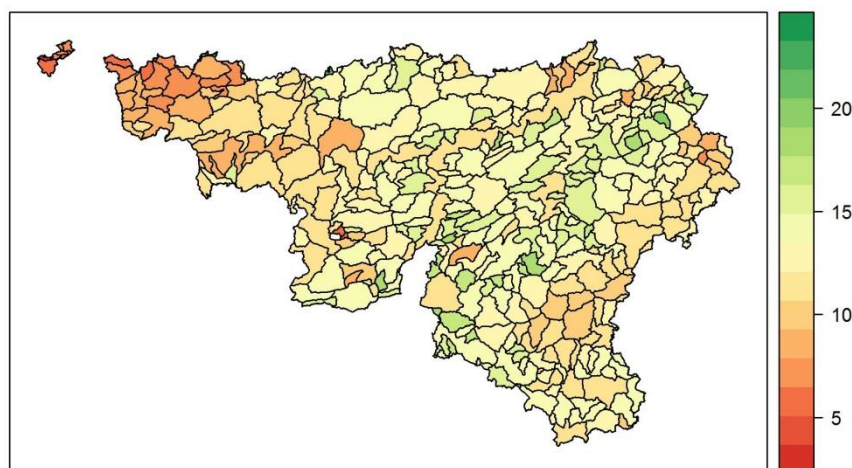
FIGURE 46 : CONTINUITÉ LONGITUDINALE DES RIPISYLVES AGGRÉGÉE À L'ÉCHELLE DES MASSES D'EAU

Hauteur moyenne des ripisylves

Echelle lit majeur



Echelle lit mineur +12m



Echelle lit mineur +6m

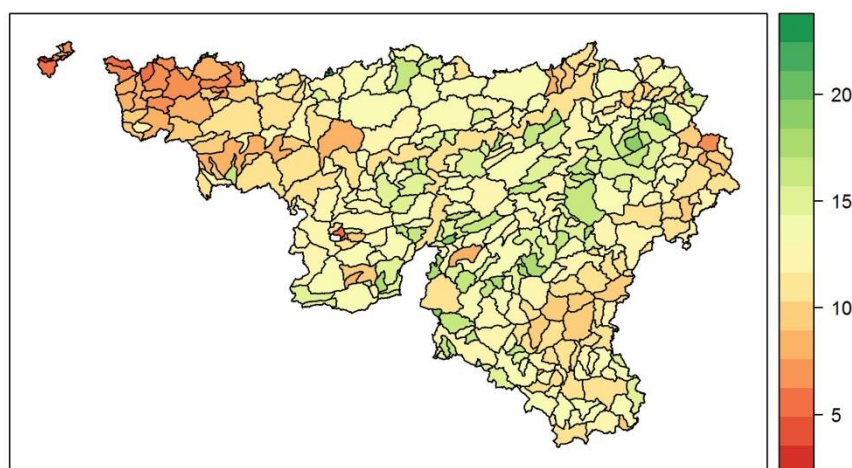


FIGURE 47 : HAUTEUR MOYENNE DES RIPISYLVES AGGRÉGÉE À L'ÉCHELLE DES MASSES D'EAU

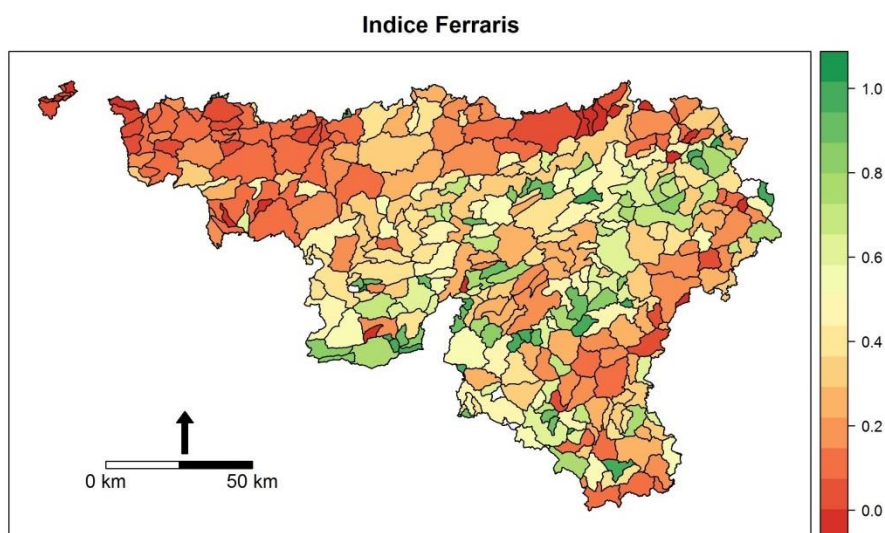


FIGURE 48 : PROPORTION DES LINÉAIRES DE SECTEUR (+ ZONE TAMPON DE 100 M) EN CONTACT AVEC LES POLYGONES FORESTIERS DE LA CARTE DE FERRARIS

ANALYSE MULTITEMPORELLE : CAS DE LA CONTINUITÉ LONGITUDINALE

La comparaison des valeurs de continuités longitudinales obtenues avec le MNH mixte 2012 ont été soustraites à celles obtenues à l'aide du MNH 2009 pour l'ensemble des secteurs. Cet indicateur de l'évolution des ripisylves entre les 2 périodes d'acquisition permet de mettre en évidence des modifications apportées aux ripisylves associées aux bandes riveraines des secteurs. Outre les coupes forestières en bordure de cours d'eau (Figure 49), cet outil permet également de détecter des coupes 'fines', strictement limitées au cordon rivulaire, (Figure 50). Le pas de temps est assez réduit pour identifier la croissance des ripisylves, mais avec le renouvellement de ce type d'approche dans le futur, l'augmentation du pas de temps permettra d'identifier et de quantifier l'impact de mesures telles que la pose de clôture en bordure de cours d'eau.

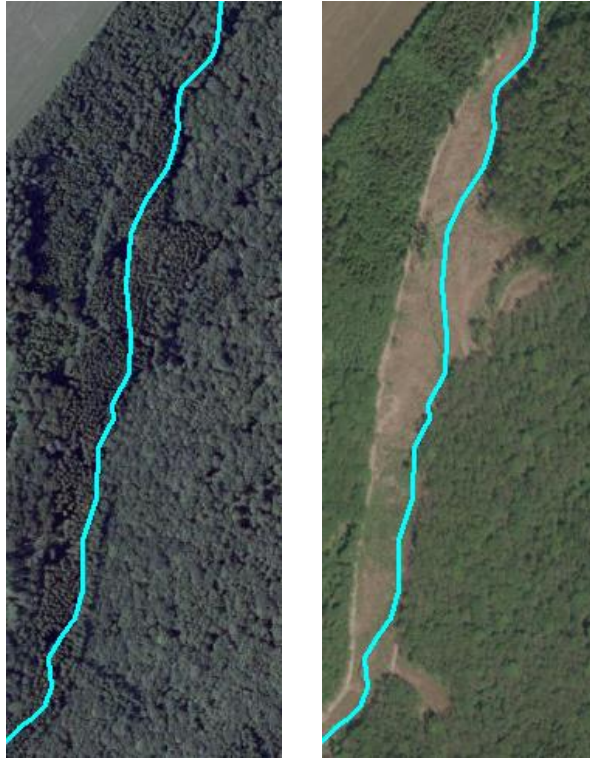


FIGURE 49 : CAS DU SECTEUR LHOMME 043 (ZOOM SUR UNE PORTION CENTRALE) DONT LA CONTINUITÉ LONGITUDINALE MOYENNE (ÉCHELLE LIT MINEUR +6M) EST PASSÉE DE 0.98 (2009) À 0.29 (2012). A GAUCHE, ORTHO 2009, À DROITE, ORTHO 2012

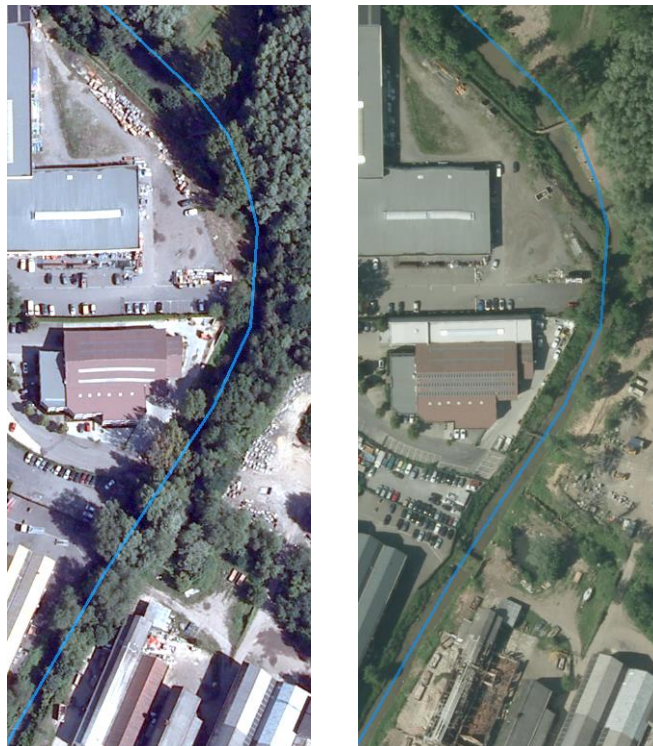


FIGURE 50 : CAS DU SECTEUR DYLE 009.2 (ZOOM SUR LES 500 PREMIERS MÈTRES) DONT LA CONTINUITÉ LONGITUDINALE MOYENNE (ÉCHELLE LIT MINEUR +6M) EST PASSÉE DE 0.75 (2009) À 0.43 (2012). A GAUCHE, ORTHO 2009, À DROITE, ORTHO 2012

DÉVELOPPEMENT D'OUTIL DE VISUALISATION DES CARACTÉRISTIQUES DES SECTEUR INDIVIDUEL

Cette section regroupe différentes informations visuelles synthétiques couvrant pour la plupart l'ensemble du réseau. Ce genre d'information pourrait s'intégrer au sein de la plateforme en ligne et venir compléter et/ou faciliter l'accès à l'information pour les utilisateurs.

VISUALISATION DE PROFILS À L'ÉCHELLE DU SECTEUR : PROFIL EN TRAVERS ET PROFIL EN LONG

Près de 4592 profils en long ont été générés (81 % des secteurs), ainsi que 5639 profils en travers. Pour rappel, les profils en travers générés pour les cours d'eau de 2^{ème} et 3^{ème} catégorie sont à considérer avec des réserves, étant donné qu'ils sont tributaires de la qualité de l'information géométrique, issue de l'ancienne version de l'atlas de la DCENN.

Les profils sont stockés au sein du répertoire 'PROFILS' remis à la DCENN.

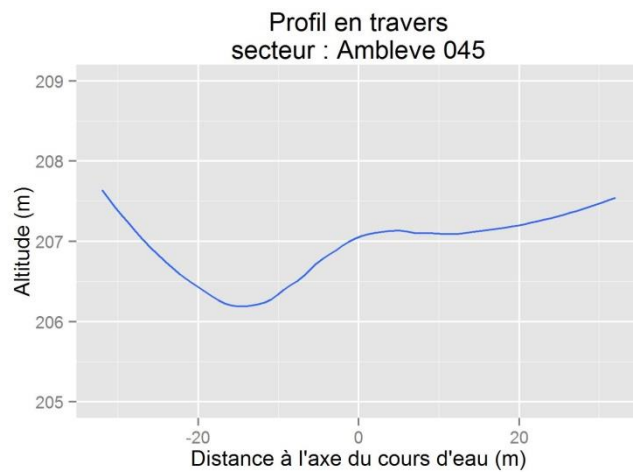
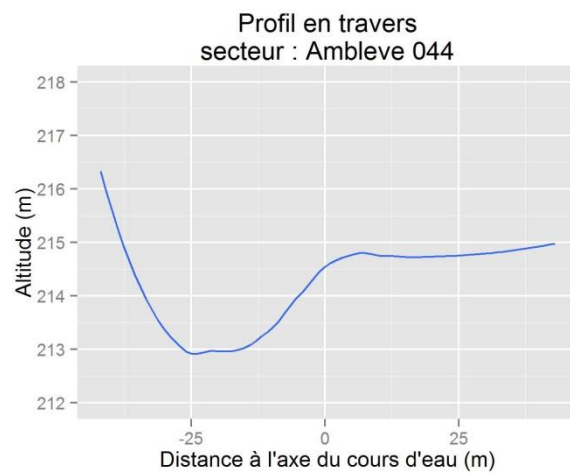
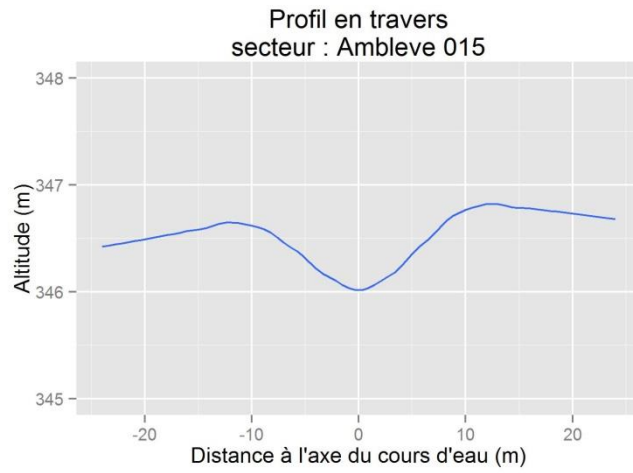


FIGURE 51 : EXEMPLE DE PROFILS EN TRAVERS SUR L'AMBLÈVE (CATÉGORIE 1)

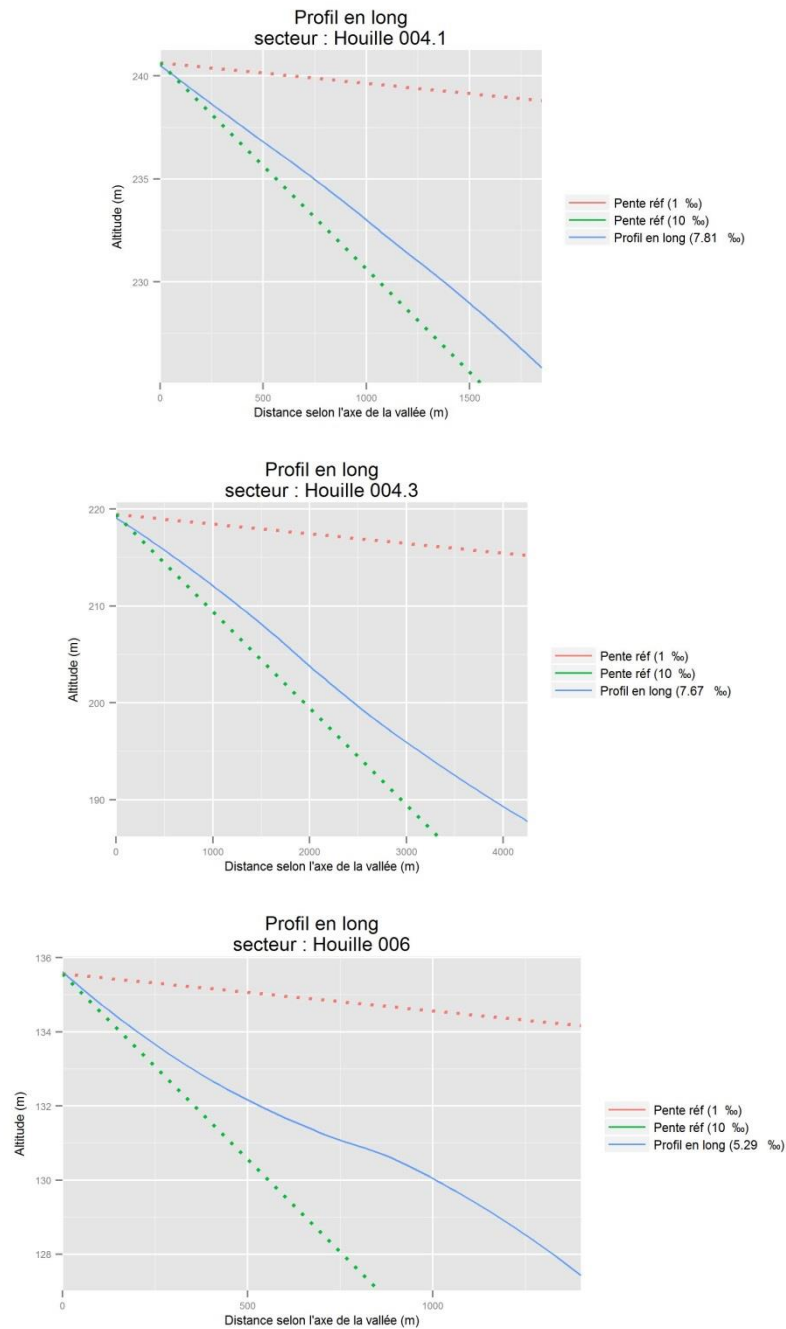


FIGURE 52 : SUCCESSION DE PROFILS LE LONG DE LA HOUILLE (1ÈRE CATÉGORIE). PENTES DE RÉFÉRENCE (1 ET 10 ‰) ET PENTE ESTIMÉE POUR L'ENSEMBLE DU SECTEUR (‰)

VISUALISATION DE L'ÉVOLUTION AMONT/AVAL À L'ÉCHELLE DU SECTEUR INDIVIDUEL

Dans la continuité des approches développées au sein des projets Imageau 1 et 2, des graphiques peuvent être générés afin de visualiser l'évolution amont aval de certains attributs, telle que la continuité longitudinal de la ripisylve. Un diagramme de synthèse de l'évolution des principaux attributs descripteurs des ripisylves a été réalisé pour l'ensemble des secteurs de géométrie simple (4592, soit 81 % des secteurs). Cette synthèse se présente sous la forme de trois graphiques (Figure

53), reprenant les variables suivantes aux trois échelles d'analyse (lit mineur +6m et +12m, lit majeur) : continuité longitudinale, hauteur moyenne et hauteur relative au pied de berge.

Les graphiques synthétiques sont stockés au sein du répertoire 'SYNTH_SECTEURS/VISU_AMONT_AVAL' remis à la DCENN.

Evolution des paramètres descriptifs des ripisylves : secteur Hoyoux 007

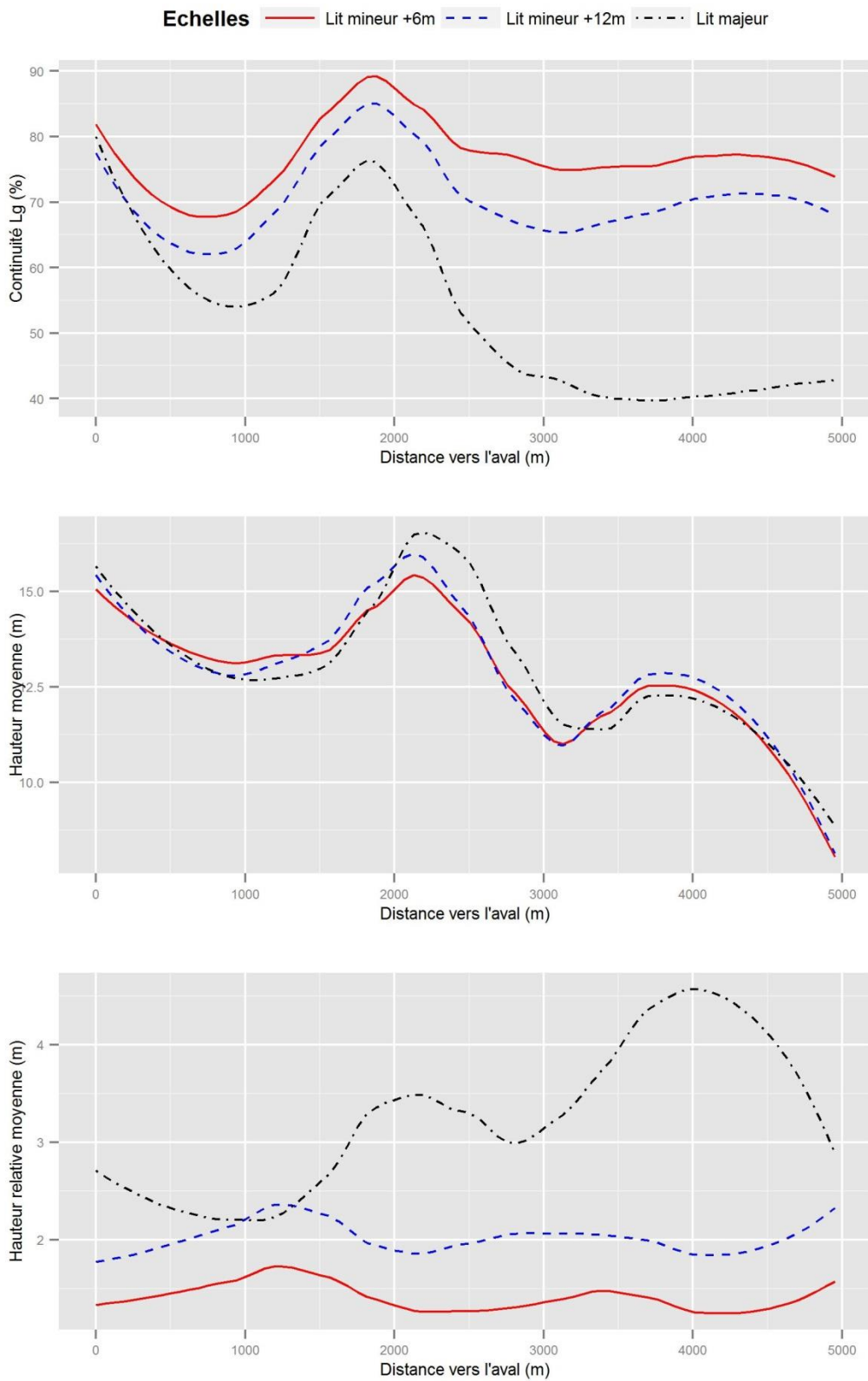


FIGURE 53 : EVOLUTION AMONT/AVAL DE PARAMÈTRES DESCRIPTEURS DES RIPISYLVES. CAS DU SECTEUR HOYOUX 007

SYNTHÈSE À L'ÉCHELLE DU SECTEUR

Afin de contextualiser les caractéristiques de chaque secteur au regard de son environnement, une synthèse visuelle a été réalisée pour chaque secteur sous forme de diagrammes en barre comparant la valeur observée de l'indicateur au sein du secteur à la valeur de référence au sein de la masse d'eau. Cette valeur de référence au sein de la masse d'eau correspond à une moyenne pondérée (par la longueur des secteurs) de l'ensemble des secteurs de la masse d'eau correspondante. Pour chaque masse d'eau, deux regroupements ont été réalisés selon deux classes, correspondant aux secteurs de 2^{ème} et 3^{ème} catégorie d'une part, et des secteurs navigable et de 1^{ère} catégorie d'autre part.

Le cas du secteur Amb1261 est présenté en Figure 54. Il permet de comparer les valeurs de paramètres clefs au regard des valeurs moyennes des secteurs de sa catégorie au sein de sa masse d'eau (AM13R). Ce genre d'approche peut fournir des informations d'ordre plus qualitatif, permettant de contextualiser le secteur en lien avec son environnement. En l'occurrence, le secteur considéré présente des valeurs globalement plus favorables des indicateurs étudiés en comparaison aux autres secteurs de sa catégorie au sein de la masse d'eau AM13R.

Les diagrammes synthétiques sont stockés au sein du répertoire 'SYNTH_SECTEURS' remis à la DCENN.

Synthèse du secteur : AMB261
Masse d'eau de référence : AM13R

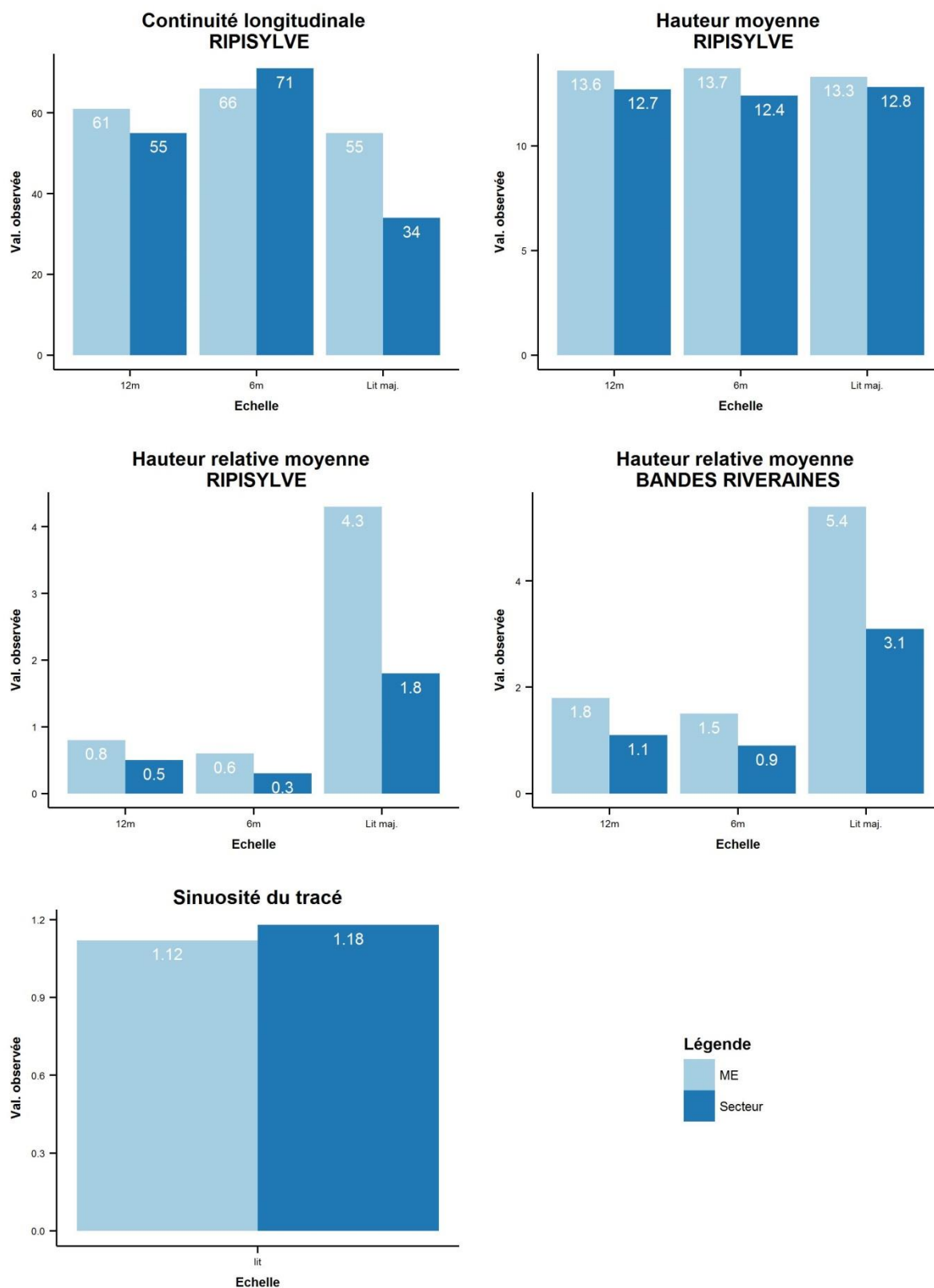


FIGURE 54 : COMPARAISON DE QUELQUES PARAMÈTRES CLEF DU SECTEUR AMB261 PAR RAPPORT AUX SECTEURS DE 2ÈME ET 3ÈME CATÉGORIE DE LA MASSE D'EAU AM13R

4. APPAREILLAGE DES SECTEURS 'GUYON' ET POTENTIALITÉ D'AUTOMATISATION DE L'ÉVALUATION DES MASSES D'EAU

A la demande de la DCENN, une analyse a été réalisée afin d'évaluer d'une part la proximité entre les limites des secteurs PARIS et les limites des secteurs utilisés dans le cadre de l'évaluation hydromorphologique des masses d'eau⁹ et d'autre part, les possibilités de mises à jour automatisée de cette évaluation de l'état hydromorphologique lors des mise à jours de la base de données des secteurs PARIS.

APPAREILLAGE DES SECTORISATIONS PARIS ET GUYON:

Si la distance entre les limites aval des secteurs Guyon et la plus proche limite aval d'un secteur PARIS (Table 20 et Figure 55) est relativement faible pour les secteurs de 1^{ère} catégorie ainsi que les secteurs navigables, cette distance est sensiblement différentes pour les secteurs de 2^{ème} et 3^{ème} catégorie. Ces résultats confirment le fait que la consigne d'appareillage des deux réseaux n'a pas été intégrée lors de la sectorisation PARIS des cours d'eau de 2^{ème} et 3^{ème} catégorie.

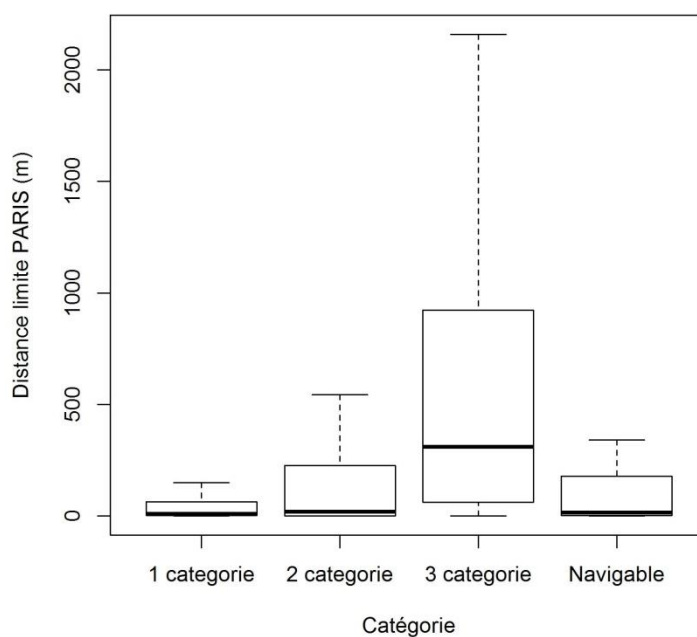


FIGURE 55 : BOXPLOT DE LA DISTANCE ENTRE LES LIMITES AVAL DES SECTEURS GUYON (EN TERRITOIRE WALLON) ET LA PLUS PROCHE LIMITE AVAL D'UN SECTEUR PARIS

⁹ F. GUYON, J. MOY, X. COGELS, P. VANDER BORGHT (2005). Evaluation globale de la qualité hydromorphologique des masses d'eau définies en région wallonne. 70p. Convention Ulg-Arlon DGRNE / Direction des eaux de surface.

TABLE 20 : DISTANCE MOYENNE ENTRE LES LIMITES AVAL DES SECTEURS GUYON (EN TERRITOIRE WALLON) ET LA PLUS PROCHE LIMITE AVAL D'UN SECTEUR PARIS

	Distance (m)	
	moyenne	écart-type
Navigable	83.8	110.4
C1	66.6	137.7
C2	235.4	494.7
C3	622.6	777.3
Total	281.9	554.

MISES À JOUR AUTOMATISÉE DE CETTE ÉVALUATION DE L'ÉTAT HYDROMORPHOLOGIQUE DES MASSES D'EAU

La Table 21 reprend les paramètres ainsi que leur pondération dans le calcul d'un niveau d'altération hydromorphologique des masses d'eau.

Des éléments qui composent l'évaluation hydromorphologique des masses d'eau, l'hydrologie est la composante qui pourrait être la plus difficilement réalisée sur une base automatique. Même si la pertinence d'une mise à jour de cette composante peu dynamique est discutable, celle-ci ayant été réalisée selon un 'avis d'expert', elle est difficilement reproductible.

Les autres éléments pourraient d'un point de vue théorique et méthodologique être intégrés dans une procédure de mise à jour relativement automatisée. Dans le cadre d'un appareillage complet des deux réseaux de secteurs, cette mise à jour pourrait être envisagée de manière couplée à la mise à jour de la base de données des secteurs PARIS.

L'objectivité de l'évaluation des différents paramètres pourraient même se voir améliorée, notamment à travers l'évolution de la précision des données source. En matière de continuité, l'amélioration et l'objectivation du référentiel des obstacles, qui est en cours au sein de la DCENN, améliorerait la pondération des critères basée sur la franchissabilité de ceux-ci.

Les paramètres morphologiques pourraient également être mise à jour de manière automatisée et profiter de la mise à jour des données sources pour être améliorés. Le cas de la chenalisation pose quant à lui problème vu que cette évaluation a été faite sur base de comparaison avec les cartes historiques de Vandermaelen sans toutefois matérialiser le tracé de référence. Il n'y a donc pas de chenal de référence auquel comparer un réseau hydrographique qui intégrerait des modifications liées par exemple à une reméandration ou une meilleure cartographie du chenal à l'aide d'une nouvelle source de données. Le cas de la continuité de la ripisylve est probablement le plus probant. Son évaluation rentre en effet directement dans l'application des outils développés lors des différents projets Imageau.

TABLE 21 : EXTRAIT DE GUYON ET AL. (2005) - TABLEAU DE PRÉSENTATION DES CRITÈRES D'ÉVALUATION GLOBALE DE LA QUALITÉ HYDROMORPHOLOGIQUE DES MASSES D'EAU WALLONNES

Pondérations associées à chaque état de perturbation et modalités d'estimation des critères d'évaluation

Eléments	Critères d'évaluation	Etats de perturbation	Pondérations états de perturbation	Paramètres d'estimation	Données sources
HYDROLOGIE	Stabilité du cycle hydrologique	Situation non perturbée	0.875	%linéaire impacté	Avis d'expert
		Contrôle des écoulements pour la navigation	0.1		
Présence de grand barrage en amont		0.025			
	Perturbation du débit d'étiage	Pas d'influence décelable du facteur de perturbation Prélèvements importants : débit réservé trop faible, prise d'eau importante, transfert vers canaux,	0.975 0.025	%linéaire impacté	Avis d'expert
MORPHOLOGIE	Chenalisation du lit mineur	Tracé en plan non perturbé	0.875	% linéaire chenalisé	Cartes anciennes (VdM) et IGN
		Tracé en plan modifié	0.1		
		Mise à gabarit (navigation)	0.025		
	Nature des berges	Berges naturelles	0.875	% linéaire de berges naturelles % linéaire de berges urbanisées ou bloquées % linéaire de berges aménagées	Terrain Qualphy, PPNC
Berges urbanisées		0.1	Couche "Occupation des sols"		
Berges aménagées		0.025	Proximité voiries		
CONTINUITÉ	Continuité de la ripisylve	Ripisylve continue	0.5	% ripisylve	PPNC terrain Qualphy
		Ripisylve discontinue	0.325		
		Ripisylve potentielle	0.15		
		Absence de ripisylve	0.025		
Obstacles	Pas d'obstacles majeurs ou obstacles franchissables (mineur) $0 \leq \text{Nb obstacles majeurs ou infranchissables} / \text{km de cours d'eau} < 0,3$ $\text{Nb obstacles majeurs ou infranchissables} / \text{km de cours d'eau} \geq 0,3$		0.825	Nombre d'obstacles infranchissables ou majeurs / km cours d'eau	Couche "obstacles" + inventaire terrain (cartes IGN, couches "plans d'eau", "moulins")
			0.15		
			0.025		
Continuité du débit solide	Situation normale, pas de perturbation majeure apparente (ou barrage mineur) Perturbations localisées ou de faible amplitude (petits ouvrages hydrauliques à l'échelle du cours d'eau, ...) Perturbation importante (barrage réservoir, plus de 1 barrage / km de cours d'eau, ...)		0.645	Nombre et type de barrages / km de cours d'eau	inventaire terrain (cartes IGN, couches "plans d'eau", "moulins")
			0.322		
			0.033		

5. CONCLUSIONS / SYNTHÈSE DES PRINCIPAUX RÉSULTATS

Le projet Imageau 3 vient conclure une série de projets ayant ouvert la voie à une caractérisation globalement automatisée de nombreux paramètres descripteurs des secteurs PARIS. Cette conclusion fait office de synthèse des principaux résultats et enseignements acquis.

SURVEILLANCE DES COURS D'EAU AU NIVEAU LOCAL À L'AIDE DE DRONES

Les aspects 'drone' ont toujours occupé un volet secondaire au sein des différents projets. Les principales thématiques abordées ont été la caractérisation des ripisylves (état sanitaire / composition spécifique), la cartographie des plantes invasives (renouées, balsamine et berce du Caucase), ainsi que, dans une moindre mesure, le suivi de chantier et la cartographie de cours d'eau en crue. L'ensemble de ces thématiques ont été abordées avec succès, les principaux freins relevés à l'usage de drone dans ces thématiques ayant été de l'ordre technique (choix de la plateforme) et administratif (problématique des autorisations). Au niveau plus spécifique du projet Imageau 3, la synthèse réalisée en matière de cartographie des plantes invasives (renouées du Japon, balsamine de l'Himalaya et berce du Caucase) laisse entrevoir des applications opérationnelles (dans la mesure où une autorisation de vol est obtenue) pour la berce du Caucase. Des perspectives positives ont également été identifiées pour une cartographie régionale des renouées compte tenu de leur phénologie.

Même si les méthodes employées en matière de cartographie des plantes invasives nécessitent une expertise relativement spécifique en télédétection, une utilisation des images individuelles, voire des orthoimages peut déjà fournir des informations précieuses sur la distribution des populations à gérer. De plus, ces données peuvent facilement également être intégrées au sein des plateformes SIG classiques.

CARACTÉRISATION DES BANDES RIVERAINES À L'ÉCHELLE RÉGIONALE

Ce volet est au cœur des projets Imageau et a focalisé la majorité du temps de travail investi dans les différents projets. Le fait que l'ensemble des secteurs du réseau wallon ait pu être caractérisé à l'aide méthodes développées lors des projets Imageau 1 et 2 témoigne du succès de cette opération. Ce processus permet de tirer quelques conclusions plus spécifiques.

CARTOGRAPHIE DE LA HAUTEUR DE LA VÉGÉTATION À L'ÉCHELLE RÉGIONALE

Un suivi régional des ripisylves nécessite l'obtention de donnée de hauteur à cette même échelle. Différentes sources d'informations ont été construites et évaluées. Le Modèle Numérique de Hauteur dérivé du LiDAR basse densité (hiver 2012 et 2013) reste la meilleure option disponible en Wallonie. Dans les zones où sa qualité a été estimée comme limitée (cf. Figure 16), le MNH LiDAR peut être valablement complété par des données issues de la photogrammétrie, permettant la génération de MNH dits hybrides (MNS photogrammétriques - MNT LiDAR). Deux MNH 'hybrides' ont été générés et exploités pour la caractérisation des ripisylves à l'échelle régionale.

Les MNH LiDAR et hybride 2012 correspondant à la même saison de végétation, leur combinaison à l'échelle régionale permet d'obtenir un MNH de référence pour les saisons de végétation 2012 et 2013. Pour les zones où les MNH LiDAR et hybrides 2012 sont simultanément disponibles, le MNH LiDAR a été retenu en raison d'une robustesse ainsi qu'une homogénéité spatiale plus importante.

CARTOGRAPHIE DES COURS D'EAU À L'AIDE DE LA DONNÉE LIDAR

Les résultats de la régionalisation des approches développées lors des différents projets Imageau confirment une information déjà relayée lors des projets précédents : la donnée LiDAR ne peut à elle seule permettre une mise à jour complète du réseau hydro. Elle révèle tout de même un grand potentiel en la matière, avec notamment la possibilité d'être utilisée comme source de mise à jour quasi complète (92%) et simultanée du réseau hydro à charge directe du SPW (1^{ère} catégorie et navigable) à partir d'une détection directe et fiable du cours d'eau, le tout sur un laps de temps relativement restreint (1 année).

Pour les cours d'eau classés de 2^{ème} et 3^{ème} catégorie, ces premiers tests ont permis d'établir le potentiel de la donnée LiDAR pour la mise à jour d'un linéaire des cours d'eau en zone forestière (≈ 50% des secteurs C2/C3, > 4000 km).

La réflexion autour de la thématique de la cartographie des cours d'eau à partir de la donnée LiDAR a été menée en parallèle au chantier en cours de mise à jour du réseau hydrographique. Les outils méthodologiques développés au cours des projets Imageau permettront d'appuyer le travail en cours, voire de répéter ces potentielles mises à jour lors des futures campagnes d'acquisition LiDAR du SPW. Au niveau plus spécifique de la gestion de la base de données des secteurs, une solution géomatique devra également être élaborée afin d'associer la composante spatiale de cette BD à un réseau hydrographique revu et appelé à être modifié régulièrement. Au lieu d'être figée à la date de sa création, la composante spatiale de la base de données devra devenir dynamique.

CARACTÉRISATION DES SECTEURS À L'ÉCHELLE RÉGIONALE

Les indicateurs proposés lors du projet Imageau 2, ainsi que différents paramètres morphologiques supplémentaires ont été extraits pour l'ensemble de 5639 secteurs 'non souterrain' du réseau wallon. Ces indicateurs viennent compléter la base de données PARIS existante, en fournissant des informations fines sur la morphologie des secteurs et la ripisylve associée. En plus de ces paramètres, différents outils de visualisation de ces informations ont été réalisés et à titre de test, appliqué à l'ensemble des secteurs. Ces outils sont dédiés tant à la seule morphologie des secteurs (cas des profils en long et en travers) qu'à une plus grande diversité de paramètres (cas des diagrammes synthétiques et des graphiques de visualisation amont/aval).

Ces indicateurs peuvent notamment permettre dans un premier temps une meilleure appréhension du domaine géré et ainsi améliorer la planification des opérations terrain, telles que les coupes d'entretien des ripisylves. Dans un second temps, ces indicateurs, notamment ceux dédiés à la ripisylve, pourront être utilisés dans un contexte de suivi/évaluation des actions réalisées lors des différents PARIS.

6. PERSPECTIVES

Une implémentation opérationnelle des résultats des différents projets Imageau au sein des outils de travail de la DCENN reste encore à réaliser. Une intégration au sein de la plateforme en ligne dédiée aux PARIS à l'occasion d'une mise à jour de celle-ci est techniquement peu problématique et pourrait être réalisée à court terme. Un objectif plus ambitieux pourrait voir l'intégration, sous une forme à préciser, des outils de visualisation proposés, tels que les diagrammes synthétiques ou les profils topographiques. Ces outils d'aide à la décision permettront au gestionnaire d'améliorer la contextualisation de l'information associée au secteur et d'orienter les opérations de gestion des bandes riveraines. A plus long terme, le renouvellement de la couverture LiDAR pourrait permettre une mise à jour de l'ensemble des paramètres descriptifs proposés. Cette nouvelle couverture n'étant pas à l'ordre du jour, une mise à jour des paramètres associés aux ripisylves pourrait être obtenue via l'usage de Modèle Numérique de Hauteur hybride (MNS photo - MNT LiDAR).

La future collaboration Gbx ABT / DCENN permettra notamment l'application de l'intégralité de l'approche développée dans le cadre de la caractérisation des secteurs PARIS au réseau hydrographique non classé. Cette caractérisation portera à la fois sur les questions d'extraction de tracé de cours d'eau, ainsi que sur celles liées à la caractérisation des bandes riveraines associées à ce réseau.

Le couplage des informations extraites lors des projets Imageau aux données issues des conventions 'Monitoring des bandes riveraines' est prometteur vu la grande complémentarité entre les approches. En plus d'informations morphologiques, l'« approche Imageau » fournit essentiellement des informations fines et à la fois régionales sur la structure verticale et longitudinale des ripisylves. D'autre part, les données issues du monitoring permettront d'y associer une information plus qualitative telle que la composition spécifique. Cette analyse croisée pourra être réalisée lors des différents projets de communications de type 'vulgarisation scientifique' prévus lors de la prochaine collaboration Gbx ABTT / DCENN. La mise à jour du guide d'entretien des ripisylves pourrait par exemple intégrer en guise d'introduction une caractérisation des ripisylves wallonnes qui intégrerait les résultats des conventions 'monitoring des bandes riveraines' et Imageau. Dans un autre ordre d'idées, le couplage des approches 'télédétection' et 'terrain' permettrait d'augmenter l'efficacité d'un éventuel projet de mise à jour d'un monitoring terrain des bandes riveraines en limitant et/ou en adaptant le protocole de récolte de données terrain. Le réseau de placettes terrain pourrait également être utilisé dans un processus de calibration/validation d'équations allométriques permettant une évaluation quantitative de la ressource ligneuse au sein des bandes riveraines.

7. PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

Michez A., Piégay H., Lejeune P., & Claessens H. (2014). *Characterization of riparian zones in Wallonia (Belgium) from local to regional scale using aerial lidar data and photogrammetric DSM*. European Association of Remote Sensing Laboratories, 13(2).

Article publié dans la revue « EARSel eProceedings » présentant les résultats du projet Imageau 2 et la méthode en vue de l'implémentation à l'échelle wallonne.

Michez A., Piégay H., Jonathan L., Claessens H., Lejeune P. (2016). Mapping of riparian invasive species with supervised classification of Unmanned Aerial System (UAS) imagery

Article publié dans la revue « *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* » - Cartographie des plantes invasives (balsamine de l'Himalaya, renouée du Japon, berce du Caucase) - résultats des projets Imageau 2 et 3.

Michez A., Piégay H., Lisein J., Claessens H., Lejeune P. (?2016 ?). Classification of riparian forest species and health condition using multitemporal and hyperspatial imagery

Article sous presse dans la revue « *Environmental Monitoring and Assessment* ». Composition spécifique des ripisylves à l'aide série temporelle de données drone - résultats des projets Imageau 2 et 3.

Michez A., Bauwens S., Bonnet S., Lejeune P. (2016). Caractérisation des forêts à l'aide de la technologie LiDAR

Chapitre d'un ouvrage collectif, sous presse, titre provisoire de l'ouvrage : « Observation des Surfaces Continentales par Télédétection », ISTE Editeur, Elsevier. Présentation d'une application 'cours d'eau' du LiDAR : cas du projet Imageau 1.

8. COLLABORATIONS

La thématique de la génération et la validation de Modèles Numériques de Hauteur hybride se réalise en interaction avec l'équipe accord cadre de recherche et vulgarisation forestières ainsi que la cellule d'appui à l'Inventaire Permanent des Ressources Forestières Wallonnes de l'axe gestion des ressources forestières. L'IGN Belgique a mis à disposition du projet une base de donnée de points de référence à l'échelle de l'ensemble de la Wallonie.

La collaboration avec l'ENS Lyon (équipe d'Hervé Piégay) est permanente au niveau de la rédaction des articles scientifiques ainsi que la caractérisation hydromorphologique des secteurs à l'échelle régionale. L'équipe de Gbx ABT a également accueilli Kristell Michel pour un séjour de 2 semaines afin qu'elle se forme aux techniques de traitement d'images drone et de données LiDAR appliqués à la caractérisation des cours d'eau.

9. COLLOQUES, VOYAGES D'ÉTUDES

Participation au symposium de l'*European Association of Remote Sensing Laboratories* à Varsovie. Présentation des résultats du projet Imageau 2 (16-20 juin 2014).

Semaine d'échange au sein de l'équipe CNRS de Hervé Piégay (26-30 janvier 2015) : présentation du projet Imageau 3, échange sur les traitements mis en œuvre en matière de caractérisation des bandes riveraines (focus sur la morphologie des secteurs analysés).