

CARTOFOR

Recherches appliquées pour le développement à l'échelle de la Wallonie de méthodologies innovantes permettant la caractérisation et le suivi de la structure, de la composition et de l'état sanitaire des peuplements forestiers

Rapport réalisé dans le cadre du comité de suivi scientifique initialement prévu le 27/03/2020



**Subvention SPW- article budgétaire 43.01 du Programme 11 de la DO 15 -
Visa d'engagement 19/16549**

Partenaires du projet



Centre wallon de Recherches agronomiques (CRA-W)

Rue de Liroux, 9 - 5030 Gembloux

081/87.40.01

Département 'Productions agricoles' (D2)

Unité 'Agriculture, territoire et intégration technologique' (U06)

Dr Ir Viviane Planchon, directrice scientifique, v.planchon@cra.wallonie.be, 081/87.41.60

Dr Ir Yannick Curnel, attaché scientifique, y.curnel@cra.wallonie.be, 081/87.41.63

Dr Ir Cozmin Lucau-Danila, attaché scientifique, c.lucau-danila@cra.wallonie.be, 081/87.41.66

Département 'Sciences du vivant' (D1)

Unité 'Santé des plantes et forêts' (U03)

Dr Ir Anne Chandelier, attachée scientifique, a.chandelier@cra.wallonie.be, 081/87.46.05

Dr Ir Sophie Schmitz, attachée scientifique, s.schmitz@cra.wallonie.be, 081/87.46.01



ULg - Gembloux Agro-Bio Tech

Passage des Déportés 2, 5030 Gembloux

081/62.21.11

Cellule d'Appui à la Recherche et à l'Enseignement "Forest Is Life"

Axe "Gestion des ressources forestières"

Prof. Philippe Lejeune, chef de service, p.lejeune@uliege.be, 081/62.22.96

Dr Ir Nicolas Latte, Assistant de recherche, Nicolas.Latte@uliege.be, 081/62.25.15

Table des matières

Introduction	4
Thématique 1 : suivi de la composition des forêts et de leur état sanitaire à l'aide d'imagerie satellitaire	7
Thématique 1.1 - Identification de la composition spécifiques des peuplements forestiers (CRA-W/ULg)	7
Thématique 1.2 - Suivi du dépérissement et des maladies émergentes (CRA-W)	7
2.1. Description des dépérissements (symptômes, biologie du bioagresseur, etc.)	7
2.1.1. Dépérissement du hêtre	7
2.1.2. Dépérissement du Douglas	8
2.1.3. Mort subite du mélèze	8
2.2. Utilisation de la télédétection pour le suivi du dépérissement et des maladies émergentes (revue bibliographique)	9
2.3. Données disponibles (in situ)	12
2.3.1. Dépérissement du hêtre	12
2.3.2. Dépérissement du Douglas	14
2.3.3. Mort subite du mélèze	16
Thématique 1.3 - Sélection d'arbres résistants aux maladies (CRA-W)	17
3.1. Description des dépérissements (symptômes, biologie du bioagresseur, etc.)	17
3.1.1. Chalarose du frêne	17
3.2. Utilisation de la télédétection pour la sélection d'arbres résistants aux maladies (revue bibliographique)	17
3.3. Données disponibles (in situ)	18
Thématique 1.4 - Monitoring de l'épidémie de scolytes en pessière (ULg)	20
4.1. Description de la méthode « automne 2018 »	20
4.2. Difficultés rencontrées et évaluation de la qualité	22
4.3. Ajustement méthodologique et résultats	23
4.4. Perspectives	25
Thématique 2 - Caractérisation dendrométrique des peuplements forestiers à l'aide de données « 3D » (ULg)	26
<i>Gestion Administrative</i>	26
CRA-W	26
ULg	26
<i>Publications</i>	26

Introduction

Le projet CARTOFOR a comme objectif le développement de méthodologies innovantes permettant la caractérisation et le suivi de la structure, de la composition et de l'état sanitaire des peuplements forestiers.

Il se focalise plus spécifiquement sur 2 grandes thématiques:

- **Thématique 1** : suivi de la composition des forêts et de leur état sanitaire à l'aide d'imagerie satellitaire ;
- **Thématique 2** : caractérisation dendrométrique des peuplements forestiers à l'aide de données « 3D » (LiDAR aérien à haute densité et photogrammétrie).

Ces 2 thématiques sont complémentaires et sont développées en étroite interaction. Ainsi les résultats relatifs à la composition de la thématique 1 sont susceptibles d'améliorer les modèles développés dans la thématique 2. De la même manière, les données à très haute résolution de la thématique 2 seront utiles pour la description de sites de référence utilisés pour développer les modèles de la thématique 1.

Les deux thématiques permettront de mettre à jour les bases de données cartographiques du DNF et du SPW, via le DEMNA, pour les résultats d'intérêt général comme, par exemple, la composition spécifique des forêts, en utilisant les différentes sources de données de télédétection disponibles au niveau de la Région Wallonne.

La **thématique 1** se décompose en différentes sous-thématiques à savoir :

1. *L'identification de la composition spécifique des peuplements forestiers*

L'objectif est d'améliorer les résultats obtenus au niveau de la *cartographie des principaux types de peuplements* (projet ForêtProBos) grâce à:

- o l'utilisation des images Sentinel-1 en complément aux images Sentinel-2 ; des tests utilisant des images SAR en bande L (ALOS : 2006 – 2011) pourront être également envisagés ;
- o la réalisation de produits dérivés S1 et S2 mieux adaptés pour des applications forestières ;
- o l'analyse de différentes méthodes de classification.

2. *Le suivi du dépérissement et des maladies émergentes*

Les problèmes sanitaires ou de dépérissement constituent une menace importante en termes de durabilité de la gestion forestière en Région wallonne, comme en attestent les différentes problématiques rencontrées actuellement. L'évaluation de l'état des peuplements forestiers par télédétection peut trouver plusieurs applications pour le suivi de l'état sanitaire des forêts.

Dans le cadre du projet, trois cas d'étude ont été identifiés dans le cadre du suivi du dépérissement à savoir (dans l'ordre d'importance) : le dépérissement du Douglas, le dépérissement du hêtre et la 'mort subite' du mélèze.

Si les phénomènes de dépérissement sont déjà observés en de maints endroits en Wallonie en Douglas et en hêtre, ce n'est pas encore le cas de de la « mort subite du mélèze » causée par *Phytophthora ramorum*, un microorganisme proche des champignons.

La « mort subite du mélèze » fait néanmoins partie des menaces phytosanitaires qui pèsent sur la forêt wallonne. En effet, déjà très présent en Angleterre depuis 2009, le pathogène a été détecté dans une plantation de mélèzes en France en 2017. Étant susceptible d'infecter d'autres essences ligneuses

majeures telles que le hêtre ou le douglas, la mise en place d'un plan de surveillance à l'échelle de la région wallonne est essentielle. La mise en œuvre de celui-ci, et de tout plan de gestion de risque sanitaire en forêt, serait facilitée si un outil cartographique de reconnaissance des peuplements déperissants par télédétection et capteurs aéroportés est mis en place.

3. La sélection d'arbres résistants aux maladies

En milieu forestier, les méthodes de gestion des maladies sont relativement limitées. La recherche d'individus résistants constitue une des principales approches face à des maladies émergentes qui se développent très rapidement sur le territoire et qui menacent la survie d'essences forestières.

Le projet CARTOFOR a pour objectif d'étudier les potentialités offertes par la télédétection dans le cadre de cette approche. Le projet se focalise sur le cas particulier de la chalarose du frêne, causée par le champignon *Hymenoscyphus fraxineus*.

La chalarose du frêne a été détectée pour la première fois en Belgique en 2010 dans des plantations de frênes en Condroz. En quelques années, elle s'est répandue dans tous les peuplements causant d'importants dégâts, surtout chez les arbres jeunes, ou sub-adultes. Il existe des frênes potentiellement résistants à la maladie. Toutefois, leur nombre est très limité (de 1 à 2% des frênes selon plusieurs études européennes).

4. Le monitoring de l'épidémie de scolytes en pessière

La forêt wallonne, au même titre que ses voisines européennes, est confrontée à une épidémie très importante de scolytes (*Ips typographe* et *Pityogenes chalcographus*). Elle s'explique en grande partie par les chablis liés aux tempêtes Eleanor et David en 2017 ainsi que par les conditions climatiques de 2018, particulièrement favorables à la prolifération de l'insecte.

Face à cette situation, les gestionnaires, qu'ils soient publics ou privés, doivent relever le défi de repérer dans les meilleurs délais les arbres atteints afin de les exploiter et de limiter autant que possible l'amplification du phénomène.

Considérant l'ampleur des surfaces concernées (environ 10.000 km²), le caractère très diffus du phénomène ainsi que sa dynamique temporelle élevée (3 vagues de scolytes en 2018), le projet CARTOFOR s'attelle à développer des approches spécifiques pour être à même de délivrer en temps utiles des informations pertinentes et précises aux gestionnaires forestiers. Un premier prototype visant à réaliser ce monitoring est en cours de développement par l'équipe de Gembloux Agro-Bio Tech (action 3.1 de l'ACRVF). L'objectif dans le projet CARTOFOR sera (i) de valider la méthode, (ii) de la rendre opérationnelle pour assurer un suivi continu de l'évolution de l'épidémie et (iii) de délivrer les informations utiles aux gestionnaires concernés.

La **thématique 2** a pour objectif de développer des chaînes de traitement permettant de valoriser les nouvelles données disponibles permettant d'améliorer la caractérisation des peuplements forestiers résineux et feuillus.

Ces données intègrent notamment une nouvelle couche LiDAR avec une densité de points plus élevées (de l'ordre de 5 points émis/m²) dont le SPW devrait prochainement se doter et qui ouvre des perspectives très prometteuses au plan forestier. Parallèlement, des travaux réalisés par l'équipe de Gembloux Agro-Bio Tech dans le cadre du projet RiReMo ont démontré l'intérêt des images aériennes acquises en routine par le SPW (couches ortho-images) pour la production de modèles 3D. Bien que moins précises que les données LiDAR, ces dernières présentent l'intérêt d'une fréquence d'acquisition annuelle.

Plus spécifiquement, les différents aspects qui seront envisagés dans la thématique 2 concernent :

- o la description de la structure et de la composition des peuplements, en accordant une attention particulière aux peuplements à vocation de conservation ;
- o l'estimation de la densité (surface terrière) et du volume de bois sur pied ;
- o l'estimation de la croissance des peuplements en utilisant des comparaisons de données 3D (LiDAR et/ou photogrammétriques) acquises à différentes dates.

Ces approches pourront être menées à l'échelle de la parcelle et elles pourront compléter les inventaires d'aménagement réalisés actuellement avec des taux de sondage, et donc des précisions, relativement faibles. Les données ainsi produites permettront de mieux décrire les îlots forestiers et de produire de meilleures estimations sur l'évolution de la disponibilité de la ressource ligneuse que ce soit à l'échelle du massif ou de la région entière.

Le présent document vise à décrire l'état d'avancement du projet dans les différentes thématiques susmentionnées. Il sera mis à jour à l'occasion de chaque comité de suivi, suivant la même structure.

Thématique 1 : suivi de la composition des forêts et de leur état sanitaire à l'aide d'imagerie satellitaire

1. Thématique 1.1 - Identification de la composition spécifiques des peuplements forestiers (CRA-W/ULg)

Les avancées dans cette thématique consistent en l'identification et la préparation/collecte des données nécessaires comme les parcellaire forestiers, les images Sentinelles ou bien encore les orthophotos.

2. Thématique 1.2 - Suivi du dépérissement et des maladies émergentes (CRA-W)

2.1. Description des dépérissements (symptômes, biologie du bioagresseur, etc.)

2.1.1. Dépérissement du hêtre

La hêtraie ardennaise, qui a déjà souffert d'une crise sanitaire majeure à la fin des années 90, montre aujourd'hui à nouveau des signes de dépérissement. Outre les arbres dits « champignonnés » (faciès 1) qui, pour la plupart, sont infectés par *Fomes fomentarius*, un champignon lignivore responsable des cassures au niveau des zones infectées (tronc ou branche), on observe aussi des hêtres avec un houppier dégarni (Figure 1), un feuillage de teinte jaune et des mortalités de rameaux (faciès 2). Ces deux faciès symptomatologiques se rencontrent de façon générale sur l'ensemble du plateau ardennais, principalement sur arbres âgés. Au contraire, la régénération est abondante et ne semble pas présenter des signes de dépérissement.

Alors qu'en 1998, un coup de gel brutal était à l'origine du problème, les causes du dépérissement actuel restent encore inconnues. Une étude récente a toutefois clairement montré un effet négatif du changement climatique, et en particulier de l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des canicules estivales et des sécheresses printanières, sur la vitalité des hêtres en Belgique. Ces « stress » pourraient avoir modifié la relation hêtre-pathogène, conduisant à une dégradation de l'état sanitaire de la hêtraie.



Figure 1. Illustration d'un cas de dépérissement en hêtraie (source: Felix Teng, CRA-W).

2.1.2. Dépérissement du Douglas

Depuis 2015 environ, le douglas rencontre des problèmes importants de défoliation, surtout dans les jeunes plantations de moins de 20 ans.

D'après les recherches menées, ces défoliations résultent principalement de l'action combinée de deux bioagresseurs spécifiques du douglas : (1) le champignon pathogène *Nothophaeocryptopus gaeumannii* (agent de la rouille suisse) et (2) la cécidomyie des aiguilles *Contarinia pseudotsugae*.

- (1) La rouille suisse occasionne des chutes d'aiguilles qui touchent de manière plus intense les aiguilles les plus âgées et, en cas de forte infection, ne laisse, en extrémités de rameaux, que les plumeaux verts correspondant aux aiguilles de l'année (Figure 2, à gauche).
- (2) *Contarinia pseudotsugae* (Figure 2, à droite) cause pour sa part la formation de galles au niveau de ces aiguilles de l'année et la chute des aiguilles touchées est souvent une conséquence de l'infestation. L'action combinée de ces deux bioagresseurs, touchant des portions différentes des rameaux, laisse donc dans certaines situations peu d'aiguilles en place.

En marge de ces problèmes de défoliation, certaines plantations font également face à des problèmes de nécroses parfois fort étendues en extrémités de rameaux (liées à différents champignons pathogènes).



Figure 2. Illustration de dégâts engendrés par la rouille suisse (à gauche, source: www.waldissen.net) et d'une cécidomyie des aiguilles *Contarinia pseudotsugae* également responsable des phénomènes de dépérissement en douglas (à droite, source : Gilles San Martin, CRA-W).

2.1.3. Mort subite du mélèze

Phytophthora ramorum, un organisme réglementé [mesures d'urgences établies en 2002 par la Commission européenne], cause des dégâts importants en pépinière sur plantes ornementales (notamment *Rhododendron* et *Viburnum*). Sa détection en pépinière implique la mise en place de mesures d'éradication pour empêcher qu'il ne se développe en milieu naturel, et notamment en forêt où il pourrait, si certaines conditions sont remplies, infecter de nombreuses essences dont le hêtre, le douglas, le châtaignier et le mélèze.

En Angleterre, les premiers cas de mortalité de mélèze du Japon causée par *P. ramorum* ont été constatés en forêt en 2009. Depuis, cet organisme pathogène a détruit plusieurs milliers d'hectares de mélèze en Angleterre, mais aussi en Irlande.

En 2017, *P. ramorum* a été observé pour la première fois sur le continent européen dans des mélèzières situées en Bretagne. Cette découverte laisse craindre une extension de sa répartition en

forêt en Europe et des surveillances phytosanitaires doivent être entreprises pour qu'en cas de découverte, les arbres atteints puissent être immédiatement détruits.

2.2. Utilisation de la télédétection pour le suivi du dépérissement et des maladies émergentes (revue bibliographique)

Cette section propose une bibliographie non exhaustive portant sur le suivi de la santé des forêts par une approche de télédétection principalement satellitaire.

Une gestion durable de l'écosystème forestier est essentielle pour atténuer l'impact des ravageurs et des maladies. Une gestion efficace ne peut s'envisager que sur base de la connaissance de la distribution spatiale des zones atteintes et de la sévérité des dégâts.

Si les observations de terrain restent la source d'informations la plus fiable pour caractériser un niveau d'infestation, elles n'en restent pas moins longues et coûteuses à acquérir particulièrement dans le cas d'une infestation à large échelle.

Les avancées récentes dans le domaine de l'observation de la terre ouvrent la voie à une caractérisation rapide à large échelle permettant une prise de décision plus rapide et concurrent à une meilleure gestion de l'écosystème forestier.

Diverses études ont déjà été publiées sur le sujet. Un inventaire non exhaustif est disponible dans Chen & Meentemeyer (2016). Selon ces auteurs, un plus grand nombre d'études concerne le suivi des dégâts liés aux insectes du fait de la plus grande mortalité que ceux-ci engendrent (comparativement à celles liées aux maladies).

Une des hypothèses sous-jacentes à la valorisation de l'imagerie, qu'elle soit issue de capteurs embarqués sur drones, avions ou satellites, repose sur le fait que les dégâts engendrés par les maladies/les ravageurs puissent être observés "d'en haut". Suivant le ravageur et le niveau d'intensité, les symptômes peuvent être une diminution de chlorophylle / de la quantité d'eau dans le feuillage, une décoloration subséquente des feuilles, une défoliation ou bien encore un chablis.

La détection des zones atteintes peut s'envisager sur base des caractéristiques spectrales, spatiales et temporelles des capteurs utilisés.

Au niveau des propriétés spectrales, la distinction entre arbres sains et malades est principalement basée sur les différences de réflectances dans le visible et le proche infrarouge. Elle peut également se faire via les réflectances dans la gamme de l'infrarouge à ondes courtes (SWIR, entre 1300 et 2500 nm) du fait de leur forte corrélation avec le contenu en eau de la végétation.

Les réflectances sont le plus souvent combinées sous forme d'indices (Xue & Su, 2017). Récemment, Hawyrlo *et al.* (2018) ont proposé une étude visant à estimer le niveau de défoliation dans les peuplements de pins d'Écosse dans l'ouest de la Pologne au départ d'indices de végétation construits au départ des réflectances de Sentinel-2 en utilisant différentes techniques de machine learning (Figure 3). Parmi les indices testés (au nombre de 23), il en est ressorti que le 'Green Normalized Vegetation Index' (GNDVI) et le 'Meris Terrestrial Chlorophyll Index' (MTCI) représentaient les meilleurs prédicteurs de la défoliation et ce, quelle que soit la méthode de *machine learning*.

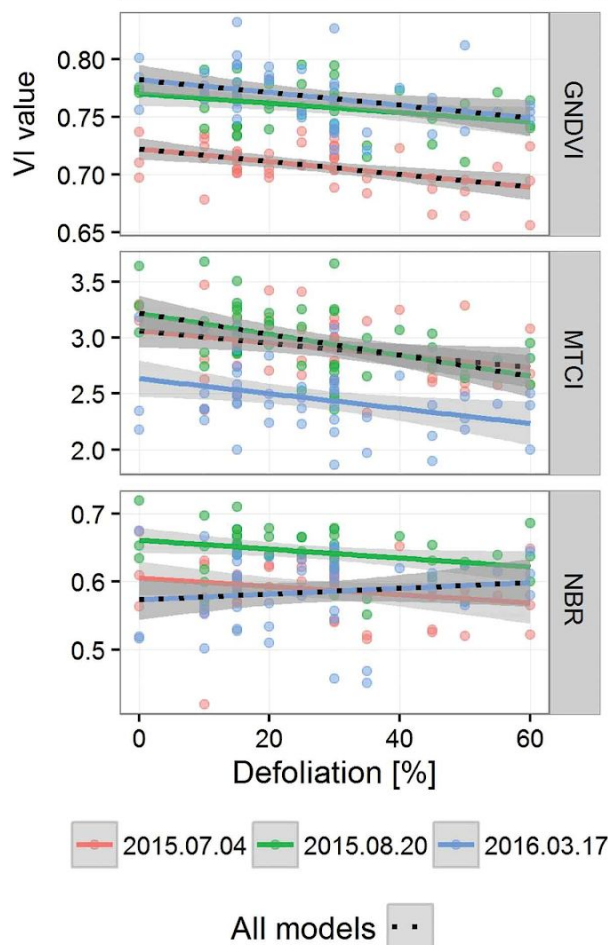


Figure 3. Relations entre le niveau de défoliation de peuplements de pins d’Ecosse et indices de végétation (Hawyrlo *et al.*, 2018).

Dans une même optique, Navarro *et al.* (2019) ont également utilisé des séries temporelles d’indices de végétation issus des réflectances de Sentinel-2 pour suivre le déclin (niveau de défoliation exprimé de nouveau par classes) du chêne liège au Portugal.

Un nombre plus restreint d’indices de végétation a été considéré (4 au total): le ‘Normalised Difference Vegetation Index’ (NDVI), le ‘ Normalised DifferenceWater Index’ (NDWI) indicateur d’un éventuel stress hydrique, le ‘Green Normalised Difference Vegetation Index’, (GNDVI) et le ‘red-edge Chlorophyll Index’ (CI).

Des indices ont également été calculés sur base des séries temporelles des différents indices de végétation : le ‘vegetation condition index’ (VCI) et la variabilité temporelle (rapport de la moyenne et de l’écart-type). Le VCI est un indicateur de dispersion (temporelle) de l’indice. Il est calculé en tenant compte des valeurs minimale et maximale de l’indice de végétation, observées dans la série temporelle considérée.

Quel que soit l’indice considéré, des différences nettes ont été observées la plupart du temps (exception faite des mois d’hiver) entre arbres malades et sains (figure 4).

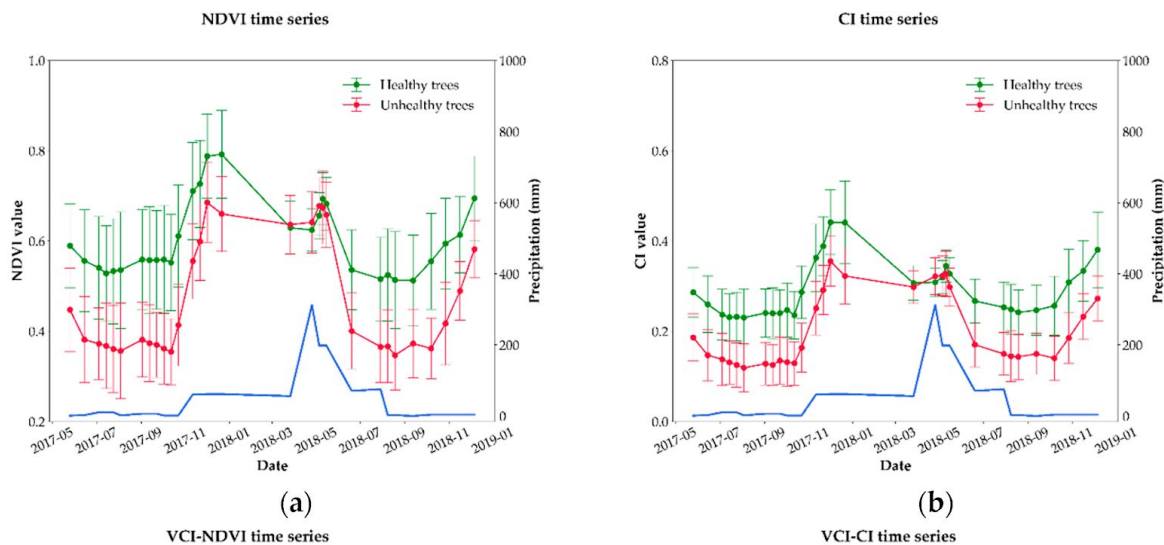


Figure 4. Séries temporelles des indices de végétation NDVI et CI pour des arbres (Chêne-liège) sains (en vert) et malades (en rouge) pour un site situé au Portugal. La ligne bleue représente les précipitations (source : Navarro *et al.*, 2019).

Des valeurs seuils permettant la discrimination entre arbres malades et sains ont également établies sur base de comparaison des fonctions de distribution cumulatives pour les différentes séries temporelles d'indice de végétation. Ces valeurs seuils font intervenir les indices de végétation et l'indice VCI :

$$NDVI - derived VCI < 0.16 \wedge CI - derived VCI < 0.10 \wedge std(CI) < 0.51 \times mean(CI) - 0.03,$$

Un système d'alerte a été développé sur base de ces 3 conditions fournissant un avertissement aux exploitants quant à la localisation d'arbres dépérissants ou morts.

Des systèmes de suivi de la santé des forêts basés sur la télédétection existent par ailleurs déjà dans d'autres pays européens comme la Slovaquie et la République Tchèque (Barka *et al.*, 2018). Ces systèmes reposent sur l'utilisation d'images Sentinel-2.

En république tchèque, l'état de santé des forêts est basé sur la variation temporelle du LAI. La génération des cartes de LAI repose sur un réseau neuronal calibré au départ de données de terrain (LAI obtenus par traitement d'images hémisphériques) et intégrant des indices de végétation (e.g. NDVI; REIP, NDII). L'approche est réalisée par pixel.

L'approche utilisée en Slovaquie se déroule en 2 phases. La première estime la santé des forêts directement via l'imagerie satellitaire. La seconde vise à consolider cette première évaluation via des observations de terrain (112 parcelles de suivi continu - protocole ICP, <http://icp-forests.net/>). L'évaluation de la santé des forêts est réalisée une fois par an (au moment du pic de la saison de végétation). Le produit final est une carte de classes de défoliation.

La première phase basée sur l'imagerie satellitaire s'appuie sur le calcul de 2 composantes (NSC1 and NSC2) dérivées des bandes spectrales en utilisant une transformation orthogonale. Seules les bandes dans le rouge, le proche infrarouge et l'infrarouge court (SWIR) sont mobilisées. La composante NSC1 est une représentation de la variabilité spectrale observée pour les différentes essences, la composante NSC2 est optimisée pour l'estimation de la défoliation. Pour plus de détails concernant le calcul des ces composantes, voir Barka *et al.*, 2018.

La seconde phase consiste à établir un modèle de régression entre les observations de terrain (niveaux de défoliation) et la composante NSC2 estimée à la première phase.

Les résultats obtenus en Tchéquie montrent que les indices les plus pertinents pour estimer le niveau de défoliation sont les indices NDII (Normalized Difference Infrared Index), DI et la composante humidité de la transformation ‘Tasseled Cap’(Figure 5). Les relations identifiées sont applicables tant en peuplements feuillus que résineux. Des indices comme le classique NDVI ne permettent par contre pas une bonne discrimination des niveaux de défoliation.

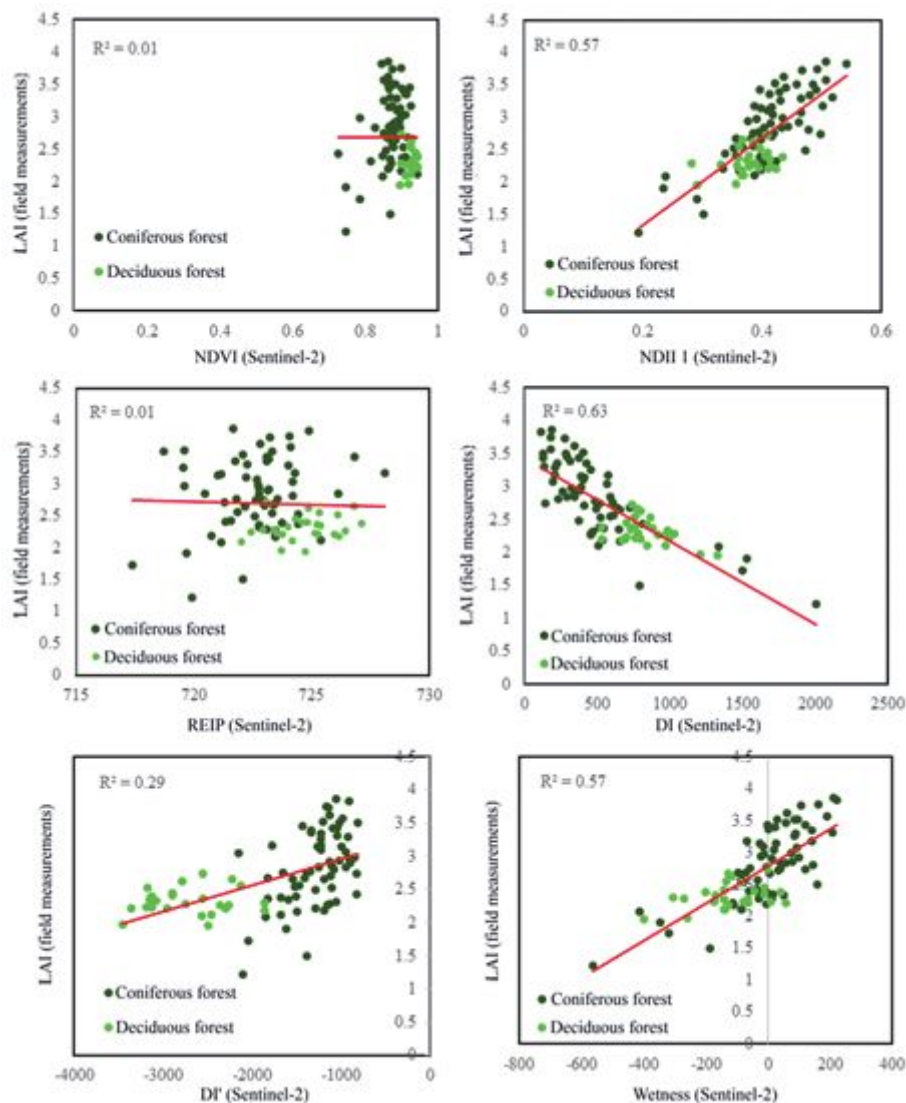


Figure 5. Performance d’indices de végétation issus de Sentinel-2 pour l’estimation du LAI de peuplements résineux (points en vert foncé) et feuillus (points en vert clair), source : Barka *et al.*, 2018.

Les résultats obtenus en Slovaquie montrent des coefficients de corrélations variant entre 0,85 et 0,97 (erreur standard de l’estimation variant entre 2 et 11% de défoliation).

2.3. Données disponibles (*in situ*)

2.3.1. Dépérissement du hêtre

Les données disponibles pour le suivi du dépérissement du hêtre proviennent d’un dispositif composé de 20 placettes de suivi réparties sur l’Ardenne (défini selon la carte bioclimatique de la Wallonie). Ce

dispositif a été mis en place dans le cadre d'un projet du CRA-W. Dix-neuf des placettes ont été choisies en forêt publique et contenaient plus de 80% de hêtre. La dernière placette est située dans une hêtraie privée avec l'accord du propriétaire. Les sites ont été sélectionnés selon une maille de 15 x 15 km, afin d'assurer un échantillonnage représentatif de l'ensemble du territoire ardennais (figure 6).

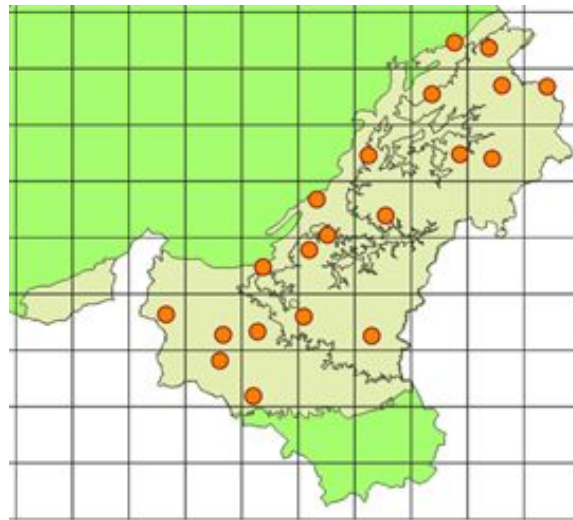


Figure 6. Répartition des placettes d'observation de hêtre en Ardenne.

Des observations relatives à l'état du houppier ont été réalisées sur la période juin-juillet 2019 selon le protocole DEPEFEU (Nageleisen, 2005). Dans chaque placette, 20 arbres présentant une circonférence minimum de 50 cm ont été identifiés. Une cote allant de 0 à 4 selon le niveau de dépérissement leur a été attribué (figure 7). Le niveau 4 correspond à un arbre mort.

La position de chaque arbre a été enregistrée à l'aide d'un dispositif GPS présentant une précision métrique (Garmin GPSMAP 64). Un positionnement plus précis à l'aide d'un système rtk (Trimble Geo 7x) est en cours de réalisation (démarrage des relevés en février 2020)



Figure 7. Représentation de l'échelle de cotation décrivant le niveau de dépérissement du hêtre.

2.3.2. Dépérissement du Douglas

Depuis 2016, des observations sont menées dans un réseau constitué d'environ 150 parcelles de douglas pures ou en mélange (souvent avec épicéa ou mélèze) et dont l'âge (estimé sur base de la hauteur) est de moins de 20 ans.

Si le nombre total de parcelles visitées est +/- stable, certaines variations sont à noter d'une année à l'autre: certaines parcelles sont abandonnées (arbres devenus trop grands pour l'observation, problème d'accès lié à la peste porcine, etc.) et d'autres sont ajoutées en compensation.

Ces parcelles sont suivies par les correspondants observateurs (CO) du DNF, le CRA-W ainsi que le DEMNA. La figure 8 ci-dessous présente à titre d'exemple la répartition des parcelles pour chacun de ces observateurs en 2017.

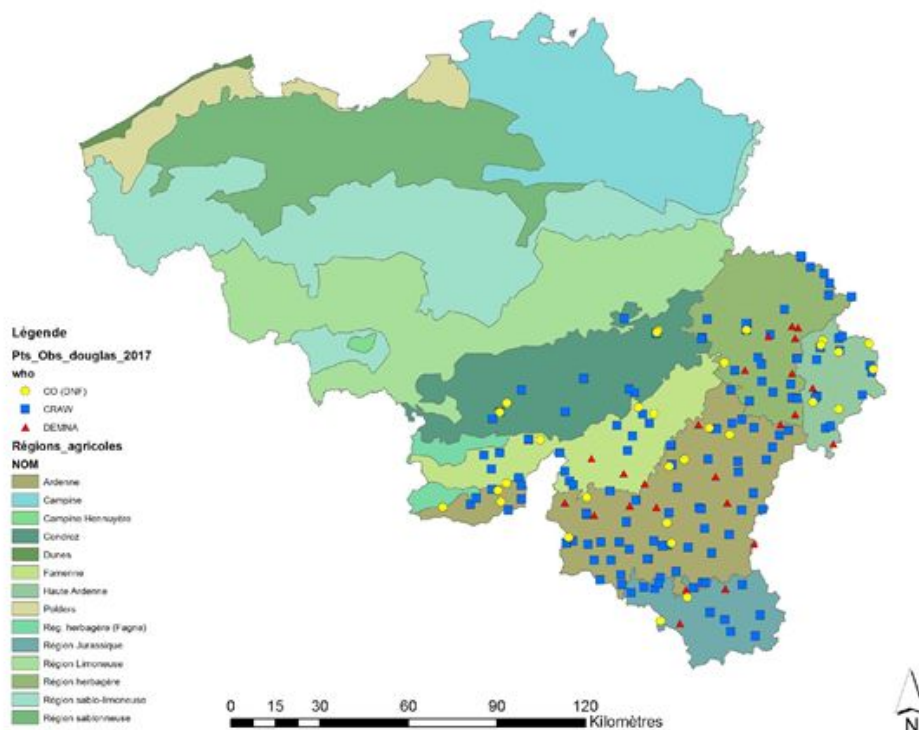


Figure 8. Répartition des parcelles de suivi du dépérissement du douglas en 2017 par observateur (CO : Correspondant observateur).

Les observations sont effectuées chaque année à l'automne (octobre-novembre) dans ces parcelles. Dans chacune de celles-ci, 15 douglas ont fait l'objet d'observations et de prélèvements d'échantillons afin d'évaluer l'intensité des dégâts liés à chacun des bioagresseurs précédemment identifiés.

Pour *Contarinia pseudotsugae*, l'intensité des attaques est évaluée sur base du pourcentage d'aiguilles de l'année portant des galles (échelle de 0 à 6). Pour chacun des 15 arbres sélectionnés, 5 rameaux sont observés et une note est attribuée à chacun d'eux. Nous obtenons donc $15 \times 5 = 75$ notes par parcelle de douglas.

Echelle utilisée :

0 = absence de galles

1 = 1 à 5% d'aiguilles portant des galles

- 2 = 6 à 20% d'aiguilles portant des galles
- 3 = 21 à 40% d'aiguilles portant des galles
- 4 = 41 à 60% d'aiguilles portant des galles
- 5 = 61 à 90% d'aiguilles portant des galles
- 6 = plus de 90% d'aiguilles portant des galles

Il ne s'agit pas ici d'une mesure directe de la défoliation. Il existe toutefois une corrélation forte entre l'intensité des attaques sur aiguilles et la défoliation. Les aiguilles touchées finissent en effet par tomber. Il y a, en d'autres termes, un décalage dans le temps entre l'observation et leur impact sur le feuillage.

Pour évaluer l'impact de la rouille suisse dans chaque parcelle, une pousse de l'année a été prélevée sur chacun des 15 arbres sélectionnés. Au laboratoire, 15 aiguilles sont prélevées sur chacune des 15 pousses. Les 225 aiguilles collectées (15 aiguilles x 15 pousses) sont rassemblées en un seul lot et ont fait l'objet du test de détection de *N. gaeumannii*. On obtient donc une seule valeur par parcelle de douglas.

Le recours à la biologie moléculaire pour la quantification des attaques de rouille suisse se justifie par le fait que la chute des aiguilles les plus âgées, qui est le symptôme le plus visible de la maladie, peut également être la conséquence d'anciennes attaques de cécidomyie. Il faut également noter que la quantité d'ADN détectée est une donnée relativement abstraite qui n'a pas beaucoup de sens dans l'absolu (difficile à relier à des niveaux de défoliation) mais permet toutefois de comparer les niveaux d'infection entre sites.

Compte tenu du coût élevé des analyses PCR, celles-ci n'ont pas été réalisées chaque année dans toutes les parcelles du réseau (tableau 1).

Table 1.- Nombre de parcelles constituant le réseau d'observations du dépérissement en douglas et nombre de parcelles ayant fait l'objet d'une analyse PCR en vue d'identifier la présence de la rouille suisse *Nothophaeocryptopus gaeumannii*.

Année	Nombre de parcelles constituant le réseau	Nombre de parcelles ayant fait l'objet de la PCR « rouille suisse »
2015	24	24
2016	Environ 150	Environ 150
2017	Environ 150	Environ 150
2018	Environ 150	24 (sélectionnées aléatoirement)
2019	Environ 150	Environ 80

L'absence/présence de nécroses d'extrémité de rameaux a également été relevée sur chaque arbre (donc 15 notes par parcelle de douglas).

2.3.3. Mort subite du mélèze

Un réseau d'observation a été mis en place dans le cadre du projet CONPHYR financé par le SPF Santé publique entre 2011 et 2013 et suivi par le CRA-W. Le réseau se composait d'environ 150 placettes.

A l'issue du projet, une trentaine de placettes de surveillance « post-projet » ont été identifiées et sont suivies par le DEMNA.

Actuellement, la “mort subite du mélèze” n'a pas encore été observée en Belgique et *a fortiori* en Région wallonne. Aucun jeu de données n'est par conséquent disponible.

Références bibliographiques

- Barka, I, Lukes, P., Bucha, T., Hlásny, T., Strejcek, R, Mlcousek, M., Kristek, S., 2018. Remote sensing-based forest health monitoring systems - case studies from Czechia and Slovakia. *Cent. Eur. For. J.* 64, 259-275.
- Chen, G., Meentemeyer, R.K., 2016. Remote sensing of forest damage by diseases and insects. *In : Remote Sensing for Sustainability*, Weng, Q., Ed.; Remote Sensing Applications Series; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2016.p. 357. ISBN 9781315354644
- Gerarts F., Chandelier, A., Claessens; H., Herman, M., Lassois, L., Delahaye, L., 2015. Evaluation de la Chalarose du frêne en Wallonie. *Forêt wallonne* 134, janvier/février 2015, 35-45.
- Hawryło, P., Bednarz, B., Wezyk, P., Szostak, M., 2018. Estimating defoliation of Scots pine stands using machine learning methods and vegetation indices of Sentinel-2. *European Journal of Remote Sensing.* 51. 194-204.
- Nageleisen, L.-M., 2005. Dépérissement du hêtre, présentation d'une méthode symptomatologique de suivi. *Rev. For. Fr.* LVII 2-2005, 255-262.
- Navarro, A., Catalao, J., Calvao, J., 2019. Assessing the use of Sentinel-2 time series for monitoring Cork Oak decline in Portugal. *Remote Sens.* 11, 2515. doi:10.3390/rs11212515
- Xue, J, Su, B., 2017. Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. Volume 2017, Article ID 1353691, 17 pages

3. Thématique 1.3 - Sélection d'arbres résistants aux maladies (CRA-W)

3.1. Description des dépérissements (symptômes, biologie du bioagresseur, etc.)

3.1.1. Chalarose du frêne

Depuis le début des années 90, le frêne commun (*Fraxinus excelsior L.*) souffre d'un dépérissement causé par le champignon *Hymenoscyphus fraxineus*. Ce champignon émergent provoque des nécroses au niveau des pétioles, des flétrissements et des chutes prématurées du feuillage, des nécroses corticales, des décolorations du bois et des morts d'extrémités de rameau. D'abord identifié en Pologne en 2006, le champignon a depuis progressé vers l'ouest et le Nord de l'Europe. En 2010, les premiers cas ont été signalés en Wallonie (dans le Condroz).

Certains frênes restent toutefois sans symptôme dans des peuplements très infectés (figure 9). Ces individus sont potentiellement résistants à la maladie (on considère qu'entre 2 et 5% des frênes sont résistants à l'infection) et devraient être conservés en vue d'évaluer la régénération au pied de ces individus et, si le caractère résistant est confirmé, envisager leur utilisation en génétique forestière.

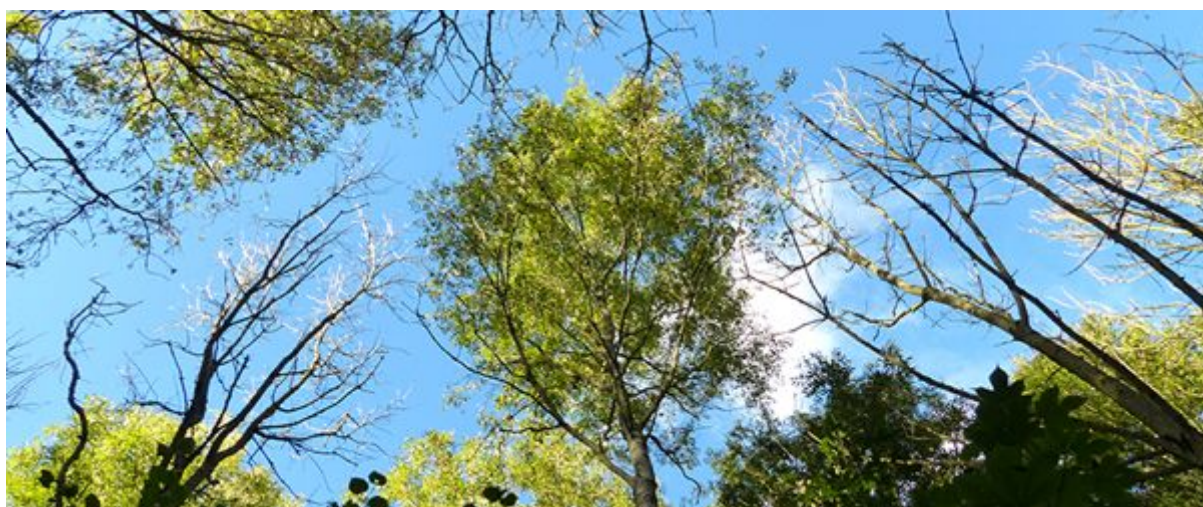


Figure 9. Illustration d'un frêne sain entouré de frênes dépérissant atteint de chalarose.

Un dispositif d'étude de la dynamique d'*Hymenoscyphus fraxineus* en Wallonie mis en place par l'OWSF montre depuis 2015 un taux moyen de mortalité annuel en Wallonie de l'ordre de 3 %. Cette valeur est similaire à celle observée en France pour les arbres de plus de 75 cm de circonférence.

Plus de détails concernant l'évolution de la maladie au sein des dispositifs expérimentaux mis en place en Wallonie sont disponibles dans "*La lettre d'info de l'OWSF n°6 (données 2018)*".

3.2. Utilisation de la télédétection pour la sélection d'arbres résistants aux maladies (revue bibliographique)

Cette activité n'a pas encore été mise en oeuvre.

3.3. Données disponibles (in situ)

3.3.3. Chalarose du frêne

Différents jeux de données ont été identifiés dans le cadre du suivi de la chalarose du frêne :

- 1) Mise en place d'un réseau de surveillance composé de 33 placettes dans le cadre du projet Fyquarstat (2010-11).

L'aire de répartition de ces placettes est disponible à la figure 10.

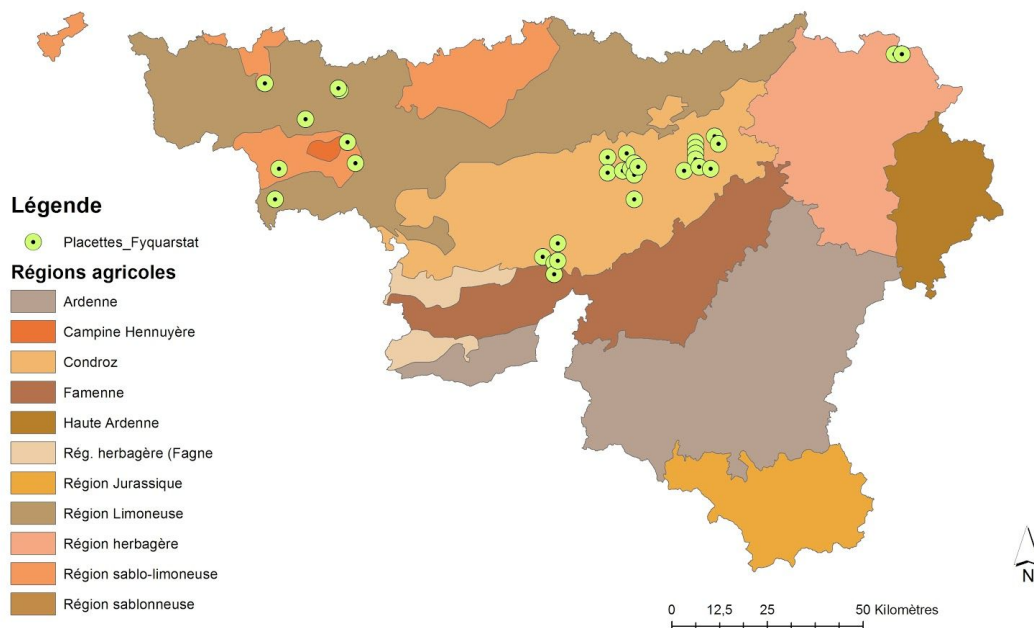


Figure 10. Aire de répartition des placettes de suivi de la chalarose du Frêne dans le cadre du projet Fyquarstat.

Les informations collectées consistaient uniquement à relever la présence ou l'absence de chalarose dans les placettes.

Au vu de la relative ancienneté des données, il est peu probable que ces données puissent être pleinement valorisées dans le cadre du projet CARTOFOR.

- 2) Dispositif de l'OVSF (17 sites répartis au sein des différentes régions naturelles de Wallonie)

Depuis 2012, un dispositif composé de 17 sites répartis dans 5 régions naturelles (Figure 11) a été mis en place par l'Observatoire Wallon de la Santé des Forêts (OVSF).

Le dispositif compte environ 255 arbres de plus de 30 cm de circonférence.

Les relevés effectués concernaient l'estimation de l'abondance de pousses, rameaux et branches mortes, de pousses flétries, de gourmands feuillés, des fructifications et sur la répartition des feuilles dans le houppier. Un déficit foliaire a également été estimé pour l'ensemble des arbres. La présence de nécroses dans les différentes parties de l'arbre a aussi

été décrite et ce, de façon plus détaillée au niveau du collet. Les observations ont été réalisées en juin, période où les nécroses et dessèchements de rameaux sont bien visibles ainsi qu'en septembre, afin de mieux estimer les gourmands et les dommages de l'année (Gerarts *et al.*, 2015).

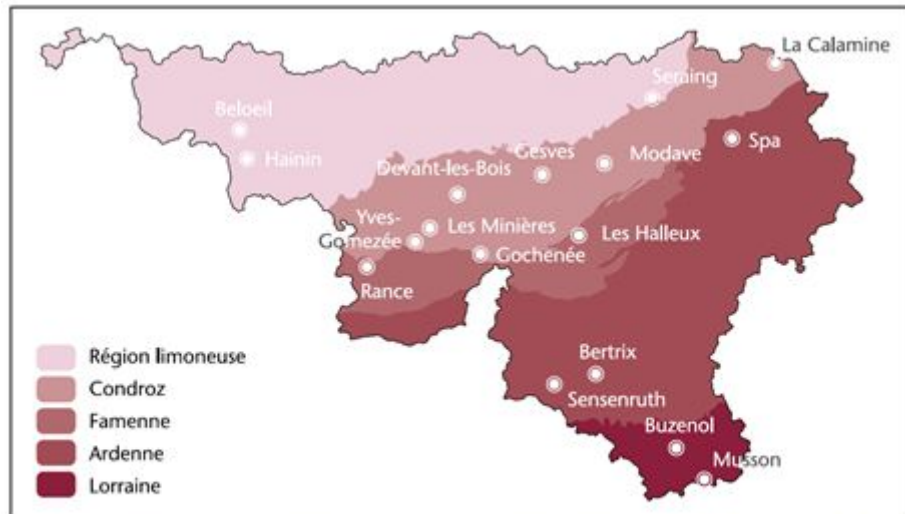


Figure 3 – Répartition en Wallonie des dix-sept sites du dispositif d'étude selon les cinq régions naturelles.

Figure 11. Répartition en Wallonie des 17 sites du dispositif de suivi du frêne (source : Gerarts *et al.*, 2015).

3) Suivis spécifiques par drone (Ulg-Gbx / DEMNA)

Un suivi à plus petite échelle a été effectué entre 2015 et 2017 au bois de Grand-Leez (Gembloux). Les vols ont été opérés par ULg Gembloux, les observations de terrain relatives à la chalarose du Frêne ont été réalisées par le DEMNA. Le peuplement n'est pas pur.

Un suivi a également été effectué sur un site à Beloeil en août 2017. L'ULg-Gbx y a opéré les vols à l'aide d'une aile fixe équipée d'un capteur multispectral Sequoia. Les observations de terrain ont de nouveau été effectuées par le DEMNA. Contrairement à l'étude menée au bois de Grand-Leez, il s'agit d'un peuplement pur. Environ 150 individus y ont été identifiés et décrits.

4) Enquête par quadrat (8x8km) dans le Condroz (2018)

En vue d'obtenir une image de l'état de santé des frênes à l'échelle d'une région naturelle, une étude par quadrat (8 x 8 km) a été réalisée par l'OVSF dans l'ensemble du Condroz. Le dispositif comportait 33 placettes (595 frênes décrits).

4. Thématique 1.4 - Monitoring de l'épidémie de scolytes en pessière (ULg)

Une première méthode de cartographie des épicéas scolytés (ou dépérissants) a été développée lors de l'Accord-Cadre de Recherche et Vulgarisation Forestières (action 3.1) par l'équipe de Gembloux Agro-Bio Tech (janvier-juin 2019). Les objectifs de cette sous-thématique de CARTOFOR étaient (i) de valider cette méthode et de l'améliorer si nécessaire, (ii) de la rendre opérationnelle pour assurer un suivi continu à l'échelle de la Wallonie et (iii) de délivrer les informations utiles aux gestionnaires concernés.

4.1. Description de la méthode « automne 2018 »

En raison de l'ampleur du phénomène (plusieurs vagues de scolytes avec extension rapide), des surfaces importantes à couvrir (environ 10.000 km²) et de la haute précision spatiale requise (identification d'arbres isolés et/ou petits groupes), la solution retenue s'est appuyée sur des images à très haute résolution acquises par les satellites Pléiades (résolution de 0,5 m) et SPOT-6 (résolution de 1,5 m).

Le principe du repérage des arbres scolytés repose sur un seuillage d'indices de végétation (NDVI) en combinaison avec le croisement de cartes thématiques déjà disponibles. La procédure comprend 6 étapes (Figure 12) :

- 1) acquisition et traitement des images satellitaires (orthorectification et pansharpening) ;
- 2) focus sur les pessières (carte thématique « épicéa »), de plus de 6 m de hauteur (MNH 2018) et hors mise à blanc (carte thématique « coupes-rases ») ;
- 3) calcul du NDVI, seuillage et détection des spots d'arbres scolytés ou dépérissants. La méthode mise au point ne permet pas de dissocier les arbres scolytés et dépérissants ;
- 4) identification des arbres à l'intérieur des spots (vecteur « points ») et caractérisation (notamment, hauteur dominante et nombre d'arbres par croisement avec les maxima locaux du LiDAR 2014) ;
- 5) validation/amélioration de la méthodologie à l'aide de données de terrain et par photo-interprétation ;
- 6) mise à disposition du résultat via un web service spécifique accessible à tous (<http://www.gembloux.ulg.ac.be/gf/outilslogiciels/scolytes/>) (visualisation et téléchargement). Le lien du web service est présent sur <http://www.scolytes.be/>.

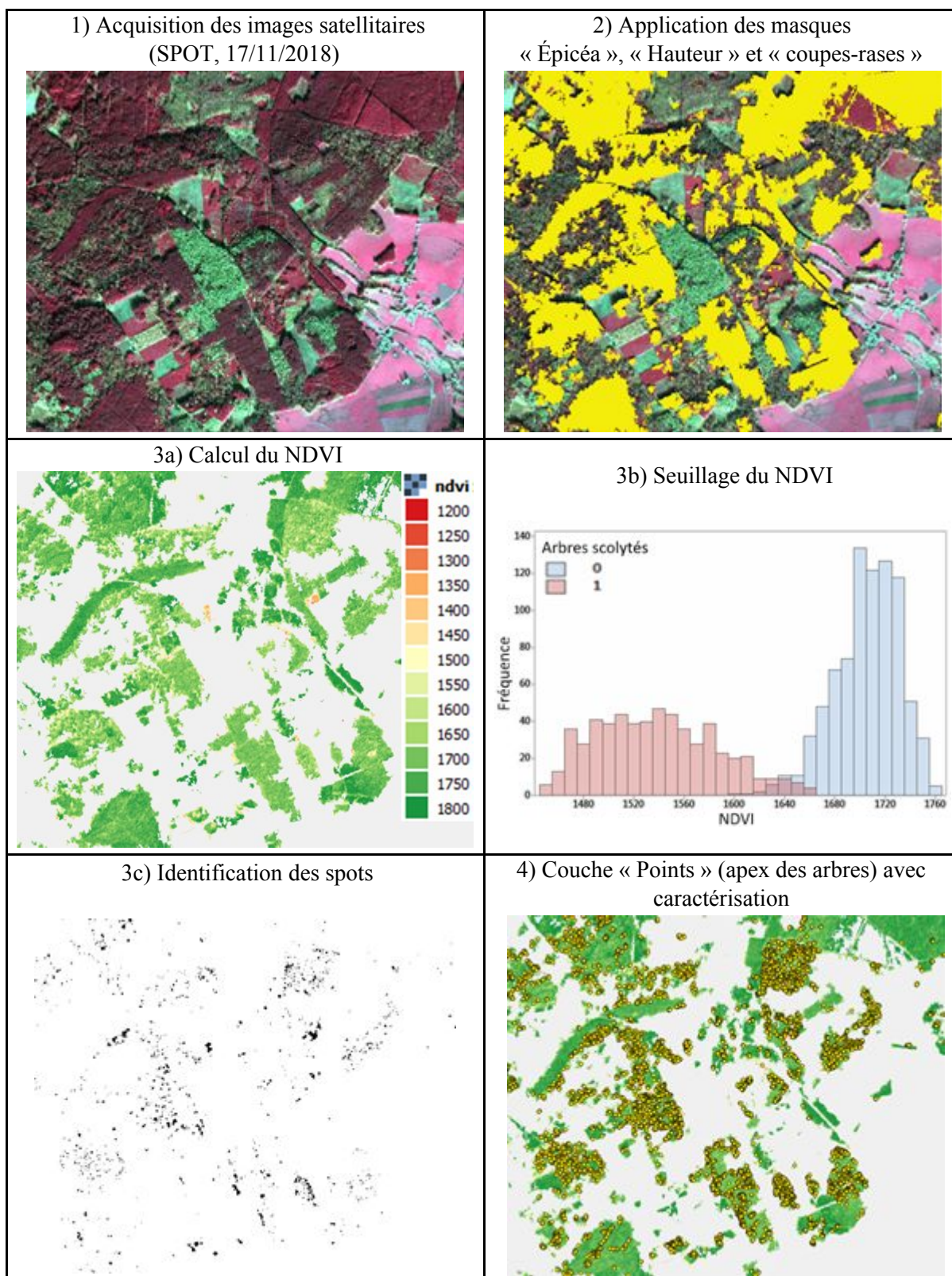


Figure 12. Principales étapes de la méthode « automne 2018 » d'identification d'épicéas scolytés ou déperissants. Le NDVI varie normalement de -1 à 1. Ces valeurs ont été transformées et varient de 0 à 2000.

Les données de terrain ont été récoltées dans le cantonnement de Saint-Hubert (triaux : 11 et 12). Au total, 108 spots de l'image Pléiades (12/09/2018) ont été visités sur le terrain les 22 et 30 novembre 2018 (Table 2).

Table 2. Synthèse des données de terrain.

	Nombre de spots	Précision
Mort sur pied	35	102 détections « correctes » (94%) mais 74 réellement scolytés (69%)
Souche	34	
Dépérissant	33	
Vivant	5	6 erreurs (faux positifs)
Hêtre	1	
Total	108	

4.2. Difficultés rencontrées et évaluation de la qualité

Bien que la méthode fonctionne globalement, le seuillage de NDVI s'est révélé plus compliqué que prévu et aussi risqué à certains égards. Si l'on considère, une image satellitaire donnée et que le seuil est adéquat, cela fonctionne très bien.

Le principal problème est la variation de radiométrie entre images de dates différentes. Avec Pléiades et SPOT-6, il n'est pas possible de couvrir la zone en une seule date. L'intensité du rayonnement mesuré, même converti en réflectance, n'est donc pas homogène sur l'ensemble de la zone. Cette différence radiométrique impacte le NDVI. Le seuil à appliquer doit donc être modifié au cas par cas. L'ajustement du seuil a été effectué par photo-interprétation mais devrait idéalement être réalisé sur base de données de terrain (récoltées pour chaque date), ce qui limite très fortement la mise en place du suivi continu de l'épidémie.

Le NDVI varie aussi d'un peuplement à l'autre en fonction de l'âge, de la structure et de la phénologie (en lien direct avec la date d'acquisition) mais dans une proportion plus faible. Les images SPOT-6 utilisées pour le résultat final ont été acquises d'août à novembre 2018. Cet intervalle s'est révélé trop important. Idéalement, il ne devrait pas dépasser 2 à 3 semaines.

La couche « points » sur le web service a été visualisée et/ou téléchargée de nombreuses fois par des forestiers (essentiellement publiques). Le retour de ces agents de terrain se sont avérés mitigés. Deux aspects sont à prendre en compte : la qualité de la carte et son interprétation/utilisation.

Sur base des retours « terrain », la qualité de la détection a été estimée grossièrement à 80%. Les faux positifs sont majoritaires (peu de faux négatifs). Ils consistent essentiellement en des arbres feuillus (hors feuilles) isolés ou en groupes qui ont été inclus dans la couche « Epicéa ». Cette couche résulte de l'utilisation d'images Sentinel-2 d'une plus grande résolution spatiale (10 m). Certaines des erreurs résultent aussi des couches utilisées, de leur décalage spatial (effets de bordure) ou de leur décalage temporel. Par exemple, le MNH 2018 reflète la situation « été 2018 » et non « automne 2018 ». Entre-temps, des arbres isolés ont donc été prélevés. Parmi les faux positifs, il y a aussi des épicéas non scolytés ou dépérissants mais fortement chargés de cônes. Les erreurs liées aux changements de date et de seuil NDVI n'ont pas pu être estimées sur base du retour « terrain ».

La couche « points » n'a pas toujours été bien interprétée/utilisée. D'une part, la couche pourtant intitulée « automne 2018 » a souvent été confrontée directement à la situation sur le terrain des mois après. Les points ont aussi été considérés à tort comme « absolus ». La localisation des points, leur nombre et leur descriptif (hdom, ndvi, etc.) ne sont qu'approximatifs et doivent être utilisés comme support à la gestion de la crise, notamment pour la planification du terrain (repérage des zones

prioritaires à revisiter, premières estimations de l'intensité des attaques, etc.). Cependant, étant donné l'urgence et l'importance de la crise, la carte a été rendue disponible rapidement et sans doute avec une communication insuffisante (malgré une description courte mais complète sur le web service). De nombreux retours négatifs s'expliquent par un manque de compréhension des objectifs et des limites d'utilisation.

4.3. Ajustement méthodologique et résultats

Au vu des difficultés rencontrées et du retour « terrain », la méthodologie a été revue.

Assurer le suivi régulier de l'état de l'épidémie de scolytes requiert l'acquisition aisée et fréquente d'images à très haute résolution spatiale sur une courte période de temps (< 1 mois) et présentant une radiométrie la plus homogène possible sur l'ensemble de la zone concernée. Il faut aussi tenir compte que la fixation des seuils NDVI requière des visites de terrain inenvisageables à chaque mise à jour de la carte.

L'accès aux images Pléiades et SPOT-6 étant limité, notamment à cause de leur prix (de 1 à 3 €/km²), nous nous sommes tournés vers d'autres sources de données satellitaires à très haute résolution. PlanetScope (www.planet.com), récemment arrivé sur le marché, s'est avéré être le choix le plus judicieux. La flotte PlanetScope compte plus de 150 microsattellites permettant un temps de retour (passage sur la même zone) d'environ 1 jour en moyenne (0.5-2) pour une résolution au sol de 3 m. De plus, le prix est très abordable (~0.01€/km²) et l'acquisition des images est aisée et rapide (API spécifique).

Cependant, il est vite apparu que les images issues de différents microsattellites présentaient aussi des différences radiométriques (Figure 13). La nouvelle méthode mise au point ne se base plus sur une approche de seuillage de NDVI par date. Il a été préféré d'uniformiser la radiométrie et le NDVI sur l'ensemble de la zone avec une autre source satellitaire de très bonne qualité spectrale : Sentinel-2. De plus, au vu des problèmes mis en évidence lors du retour « terrain », l'approche « points » a été abandonnée. L'utilisateur dispose désormais de la couche NDVI uniformisée et masquée (en perspective de plus de 6 m de hauteur) laissant davantage de liberté et permettant d'interpréter localement les valeurs de NDVI. Le web service a été mis à jour et adapté afin de faciliter la visualisation (Figure 14). Le contraste du NDVI est ajustable via un jeu de couleurs.

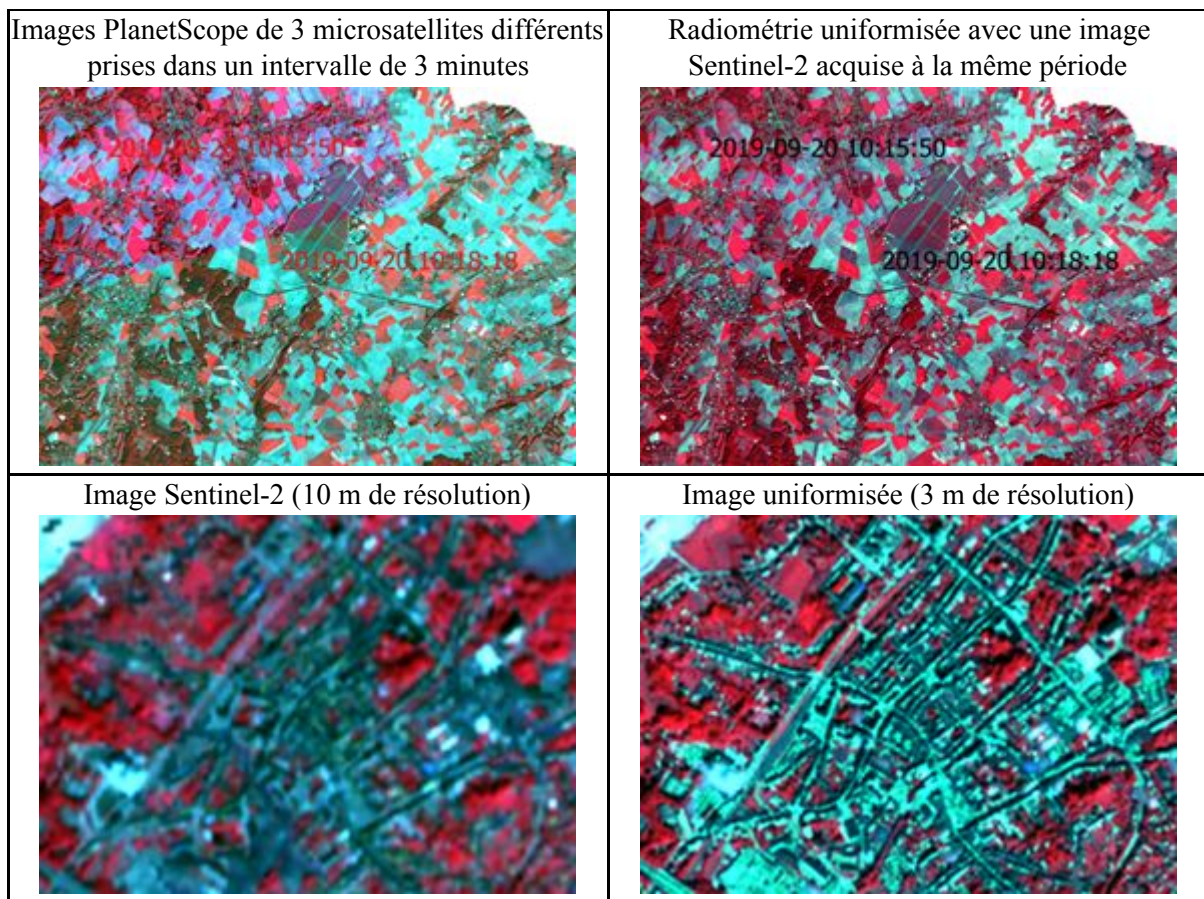


Figure 13. Haut : Exemple d'uniformisation radiométrique d'images PlanetScope (fausses couleurs). Bas : Visualisation du gain de résolution : passage d'une image Sentinel-2 de 10m de résolution spatiale à l'image uniformisée de 3 m.

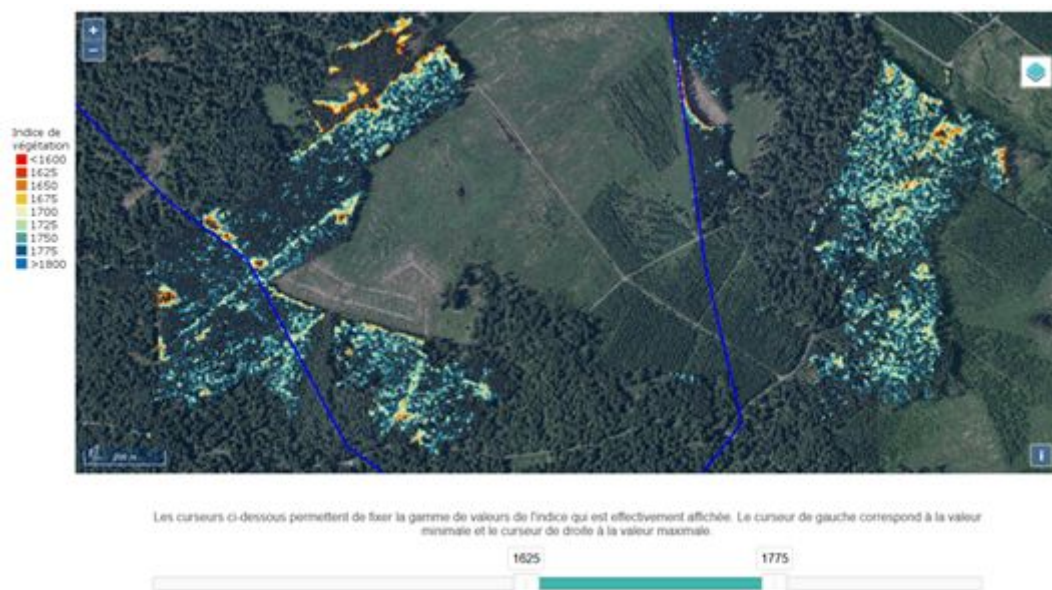


Figure 14. Web service permettant de visualiser (et télécharger) la couche NDVI uniformisée et masquée. La barre permet à l'utilisateur de faire varier le contraste.

La méthode utilisée pour l'uniformisation radiométrique est appelée « histogram matching ». Dans notre cas, son utilisation n'est correcte que si les dates Sentinel-2 et PlanetScope sont très proches pour que l'occupation du sol soit la même sur les deux images. Ce sont les parcelles agricoles, susceptible de présenter des changements de signature sur un court intervalle de temps, qui peuvent induire des biais importants dans la méthode. Le temps de retour pour Sentinel-2 (2 satellites) est de l'ordre de 4 jours (contre ~ 1 jour pour PlanetScope). Le choix des images PlanetScope est donc conditionné par la disponibilité des images Sentinel-2.

Pour le moment, 2 couches NDVI uniformisées et masquées ont été générées sur l'ensemble de la Wallonie : « juin 2019 » et « septembre 2019 ». Depuis novembre, les conditions météorologiques n'ont pas permis d'acquérir de nouvelles images de qualité (présence de nuages et/ou d'ombres).

4.4. Perspectives

Les travaux à venir consisteront essentiellement en 2 points :

- 1) dès que la météo le permettra, générer de nouvelles couches pour l'année 2020 ;
- 2) amélioration de la méthode d'uniformisation radiométrique.

L'utilisation de l'« histogram matching » pour l'uniformisation radiométrique fonctionne globalement même si pour certaines images PlanetScope des problèmes subsistent. Au lieu de travailler image par image, il serait plus efficace de travailler avec « toutes les images en une seule fois », de manière à considérer la variation radiométrique globale sur l'ensemble de la zone considérée.

Avec cette idée, une autre méthode plus robuste a été testée et comparée. Les premiers résultats sont prometteurs. Des réseaux neuronaux (« deep learning ») ont été utilisés pour injecter les 10 bandes (4 bandes à 10 m et 6 bandes à 20 m) d'une image Sentinel-2 (100 x 100 km) au sein de plusieurs images PlanetScope (25 x 12 km). Les réseaux neuronaux ont été construits de manière à tenir compte des variations radiométriques entre images. Cette approche est similaire au « pansharpening » mais s'effectue avec des images d'origines différentes. Grâce aux convolutions 3D, la variabilité spatiale (coordonnées X et Y) des éléments du paysage est aussi utilisée par le modèle. Cette méthode, qui reste à améliorer et valider, pourrait être une solution efficace pour bon nombre d'objectifs liés à la télédétection. Le fait de disposer de couches radiométriquement homogènes sur de grandes zones ouvre la voie à de nombreux développements et nouvelles analyses.

Thématique 2 - Caractérisation dendrométrique des peuplements forestiers à l'aide de données « 3D » (ULg)

La thématique² n'a pas pu être initiée par manque de données LiDAR. L'acquisition de ces données est en cours.

Gestion Administrative

Cette subvention est financée par le Service Public de Wallonie, article budgétaire 43.01 du Programme 11 de la DO 15 du budget des dépenses de la Région wallonne pour l'année budgétaire 2019. Le visa d'engagement est le 19/16549.

Cette subvention couvre la période du 1er juillet 2019 au 20 juin 2022.

CRA-W

Au CRA-W, personne n'est actuellement imputé financièrement sur le projet CARTOFOR. Les activités effectuées à ce jour et présentées dans le cadre de ce rapport ont été effectuées sur fonds propres.

ULg

Les travaux présentés à la section 4 ont été réalisés par Nicolas Latte à mi-temps depuis le début de la convention. Ce mi-temps sera probablement maintenu jusqu'en juin 2019. Les travaux à venir et perspectives ont été décrits en section 4.4. En fonction de la disponibilité des données LiDAR, les travaux prévus dans le cadre de la thématique² pourraient aussi être initiés.

Publications

Poster :

Curnel Y., Lucau-Danila C., Chandelier A., Schmitz S., Latte, N., Planchon V. (2020). CARTOFOR, Innovative methodologies for monitoring the structure, the composition and health status of wallon forest stands. Proposition de poster soumise au LEO DAY 2020 (date initialement prévue le 30/04/2020), Luxembourg Earth Observation and Integrated Applications Day.