HAL
open science

Projet PlanETer - Planification énergétique territoriale transfrontalière de l'espace Mont Blanc : méthode d'évaluation de la ressource bois-énergie

J.M. Monnet, S. Dupire, E. Mermin

To cite this version:

J.M. Monnet, S. Dupire, E. Mermin. Projet PlanETer - Planification énergétique territoriale transfrontalière de l'espace Mont Blanc : méthode d'évaluation de la ressource bois-énergie. irstea. 2015, pp.42. hal-02601408

HAL Id: hal-02601408

https://hal.inrae.fr/hal-02601408v1

Submitted on 16 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Programme Interreg IVA FRANCE-SUISSE

PLANIFICATION ÉNERGÉTIQUE TERRITORIALE TRANSFRONTALIÈRE DE L'ESPACE MONT-BLANC

Méthode d'évaluation de la ressource bois-énergie

Rapport final

Juin 2015

Rédaction : Jean-Matthieu MONNET

Avec les contributions de :

Jordan FÈVRE, Sylvain DUPIRE, Éric MERMIN

contact : jean-matthieu.monnet@irstea.fr - +33 (0)4 76 76 28 06

Irstea centre de Grenoble, UR Écosystèmes Montagnards

Financement

Cette étude a été conduite dans le cadre du projet Interreg France-Suisse PlanETer. Les porteurs du projet étaient la ville de Martigny et la Communauté de Communes de la Vallée de Chamonix Mont-Blanc. Les co-financeurs sont le Conseil Général de la Haute-Savoie, le canton du Valais et les communes de Bagnes, Champéry, Finhaut, Orsières et Salvan.

Porteurs du projet :

Co-fianceurs :

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Christina Giesch et Hugues Philipona (Forêt Valais), Jean-Christophe Clivaz, Roland Métral et Aude Mayoraz (Service des Forêts et du Paysage, canton du Valais) ainsi que les gardes forestiers du Valais pour leur implication dans ce travail. Nous avons bénéficié grâce à eux de données et d'avis constructifs qui ont largement contribué à la mise au point et à l'évaluation de la méthodologie présentée ici. Nous sommes conscients que de nombreuses améliorations sont encore souhaitables et possibles mais nous espérons cependant que les résultats obtenus leur seront utiles et constitueront une base pour de futures études.

Sommaire

1.Introduction....1

2.Éléments méthodologiques....3

2.1.Cartographie de la ressource forestière par scanner laser aéroporté....3

2.1.1.Le principe du scanner laser aéroporté....3

2.1.2.Cartographie de la ressource forestière par approche surfacique....4

2.1.3.Sources d'erreur de la méthode surfacique....7

2.1.4.Détection d'arbres....8

2.2.Cartographie automatique de l'accessibilité avec Sylvaccess....9

2.2.1.Données spatiales....9

2.2.2.Paramètres....11

2.2.3.Sorties produites par le modèle....13

3.Zone d'étude....14

3.1.Localisation....14

3.2.Données cantonales....14

3.2.1.Desserte....14

3.2.2.Cartographie des peuplements forestiers....14

3.2.3.Diagnostic des méthodes de débardage....15

3.3.Données fédérales....15

3.3.1.Placettes de l'Inventaire Forestier National....15

3.3.2.Données LiDAR....17

3.3.3.Données topographiques....19

4.Cartographie de la ressource bois énergie....20

4.1.Chaîne de traitement....20

4.2.Cartographie du volume sur pied....21

4.2.1.Données de terrain....21

4.2.2.Méthode de calcul des métriques et modélisation 21

4.2.3.Cartographie des paramètres forestiers....23

4.3.Cartographie de l'accessibilité....24

4.4.Cartographie de la ressource bois-énergie mobilisable....25

4.4.1.Le cas des forêts non couvertes par le vol LiDAR ou non bûcheronnables....25

4.4.2.Calcul des volumes exploités....26

4.4.3.Calcul de la ressource bois-énergie....27

4.5.Cartographie du coût de mobilisation....28

4.5.1.Introduction....28

4.5.2.Calcul du volume de l'arbre moyen....28

4.5.3.Calcul du coût de bûcheronnage....28

4.5.4.Calcul du coût de débardage....29

4.5.5.Sélection du mode de débardage....29

5.Bilan et perspectives....31

5.1.Comparaison avec la carte des modes de débardage....31

5.2.Coût et quantité par mode de débardage....33

5.3.(Quelques-unes des) limites de la méthodologie....34

5.3.1.Ressource....34

5.3.2.Mode de débardage et coût....35

5.4.Conclusion et perspectives....35

Références....37

Annexe : Conditions pour la mise œuvre d'une telle méthodologie en France....39

1. Introduction

Ce rapport présente la méthodologie et les résultats de la tâche visant à produire une cartographie des ressources bois-énergie accessibles. La zone d'étude était située dans le Bas-Valais (Suisse).

Cette tâche de travail s'appuie notamment sur les développements récents de méthodes de cartographie des forêts basées sur les données de télédétection par scanner laser aéroporté, ainsi que sur les méthodes automatiques de traitement de données SIG pour caractériser les conditions techniques d'accessibilité des forêts. En effet, le fort potentiel de ces méthodes et la disponibilité des données sur la zone d'étude en font une piste prometteuse pour obtenir une cartographie de la ressource forestière. Telle que décrite dans l'annexe 1 a (Description technique du projet) lors du montage du projet, cette tâche devait s'organiser en trois axes :

- Estimation des volumes par essence, sur la base de données auxiliaires (cartographie des types de peuplements, données optiques aériennes ou satellitaires) ou des données LiDAR elles-même (intensité du signal, types d'écho).
- Estimation des volumes par type de produit, soit par estimation de la distribution des diamètres, soit par détection des arbres dominants.
- Estimation du coût de l'exploitation, par modélisation des conditions techniques de mobilisation et évaluation du coût associé.

Les travaux des deux premiers axes se plaçaient en continuité d'une cartographie de la ressource effectuée dans le cadre du projet Interreg Alpine Space Newfor [1] à partir de données LiDAR acquises par le canton du Valais sur le Val d'Hérens. Le coût élevé des données au regard des précisions obtenues sur l'estimation de la ressource rendait cependant peu probable l'acquisition de données de qualité similaire sur d'autres zones (procès verbal de la séance WP2 du 15 octobre 2013). Il a donc été proposé (procès verbal de la séance WP2 du 11 décembre 2013) de reproduire la méthode en se basant sur les données LiDAR disponibles au niveau fédéral. Dans un premier temps le test a été fait sur le Val d'Hérens pour lequel les données terrain étaient déjà disponibles (rapport intermédiaire de décembre 2014). Suite aux résultats obtenus, la méthodologie a été appliquée sur le Bas-Valais, en vue de produire la cartographie sur les six communes partenaires du projet. Étant donné les temps passés à la prise en main des données LiDAR fédérales et la précision intrinsèque de ces données, les nouveaux développements méthodologiques concernant l'estimation par essence et par type de produit n'ont pu être conduits. Ces étapes de l'estimation de la ressource ont donc été effectuées à partir de données pré-existantes, ce qui impliquent que la spatialisation de l'information soit limitée par rapport à celle de l'estimation faite à partir des données LiDAR.

Concernant le troisième axe, le modèle de débardage développé à Irstea (*Sylvaccess*) [2; 3] et les résultats préliminaires d'accessibilité obtenus sur la commune de Bagnes ont été présentés aux gardes forestiers de la zone le 25 mars 2015. Suite à cette discussion, il a été décidé d'utiliser le modèle avec des paramètres adaptés aux pratiques forestières locales, puis de comparer les résultats avec la carte issue de l'enquête de Sylva Plus, comme initialement mentionné dans le procès verbal du 11 décembre 2013. Le module économique CalCouFor [4] était pressenti pour être intégré directement dans le modèle de débardage pour le calcul des coûts d'exploitation. Cependant le niveau de détail de cet outil étant trop avancé pour une cartographie à grande échelle, il a été jugé plus pertinent d'utiliser la grille tarifaire appliquée sur la zone pour les opérations forestières [5] .

Le présent rapport est organisé en trois parties principales. La première partie détaille les méthodologies de cartographie de la ressource à partir des données LiDAR aéroporté et de modélisation de l'accessibilité avec *Sylvaccess*. La seconde partie présente la zone d'étude ainsi que les données utilisées. La troisième partie présente les résultats de la cartographie de la ressource et de l'accessibilité, ainsi que les étapes suivantes qui aboutissent à la cartographie de la ressource mobilisable bois énergie.

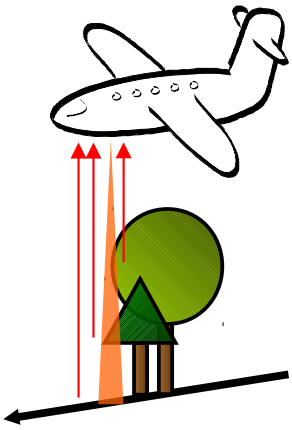
2. Éléments méthodologiques

2.1. Cartographie de la ressource forestière par scanner laser aéroporté

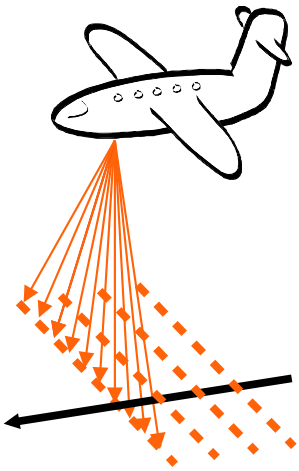
2.1.1. Le principe du scanner laser aéroporté

Le scanner laser (ou LiDAR : light detection and ranging) aéroporté est une technique d'acquisition de données topographiques qui a connu un développement rapide grâce aux progrès techniques réalisés dans les domaines des lasers, du GPS et de la navigation inertielle [6]. Cet outil permet de modéliser la morphologie du terrain avec une forte densité de points.

Le principe repose sur la mesure du temps de vol d'une impulsion laser entre la source aéroportée, dont la position et l'orientation sont enregistrées en continu par des mesures GPS et inertielles, et la cible que constitue le sol. Le LiDAR a la possibilité d'enregistrer plusieurs échos d'une même impulsion, permettant ainsi de modéliser simultanément le sol et le sursol. Le balayage latéral assuré par le scanner permet de couvrir avec les impulsions laser une fauchée de plusieurs centaines de mètres au cours de l'avancée de l'avion.



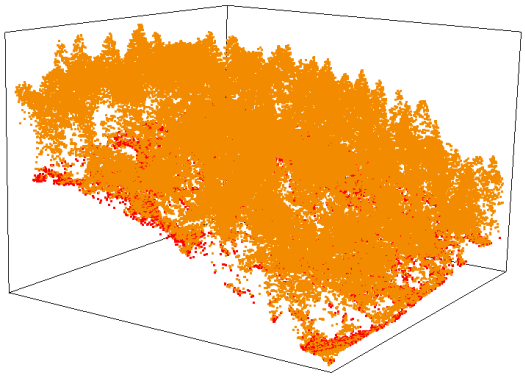
^ *Échos renvoyés par les éléments qui interceptent une impulsion laser*

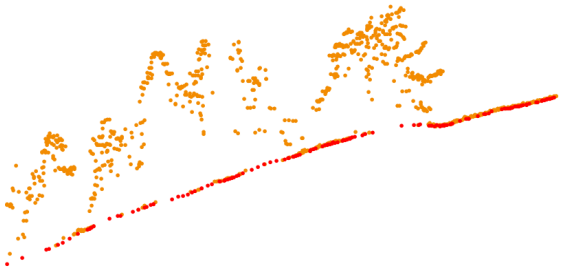


^ *Balayage de la surface du sol par les impulsions lors de la progression de l'avion*

Une fois que les échos enregistrés par le scanner ont été géoréférencés et filtrés par le prestataire ayant réalisé l'acquisition, la donnée brute obtenue est un nuage de points en trois dimensions. Les coordonnées de chaque point, qui correspond à la position d'un objet ayant intercepté l'une des impulsions laser, sont calculées dans un référentiel géographique donné. Selon le modèle du scanner, d'autres informations liées à chaque point peuvent être disponibles, par exemple l'intensité du signal réfléchi et ordre d'arrivée de l'écho pour une impulsion émise.

Les prestataires LiDAR réalisent généralement un classement des points en deux catégories : points appartenant au sol et points appartenant au sursol. Parmi les points appartenant au sursol, il est possible également de différencier les éléments naturels des constructions d'origine humaine, mais cela demande une grande partie d'édition manuelle.





^ *Aperçu 3D* ^ *Coupe longitudinale*

Nuage de points LiDAR obtenu dans une zone forestière. Les points appartenant au sol sont en rouge, ceux de la végétation en orange. Densité environ 10 points/m^2.

2.1.2. Cartographie de la ressource forestière par approche surfacique

La télédétection par scanner laser aéroporté permet donc de modéliser géométriquement, sous forme d'un nuage de points, le couvert végétal. L'idée sur laquelle repose la méthode « surfacique » d'estimation de paramètres forestiers est que les paramètres d'un peuplement forestier mesurés par le gestionnaire, comme le volume sur pied, la surface terrière ou le nombre de tiges par hectare, sont liés aux caractéristiques géométriques de la canopée [7]. Afin d'estimer ces paramètres sur l'ensemble d'une zone survolée, il faut donc établir de manière empirique quelle relation est la plus adaptée pour estimer chaque paramètre à partir de descripteurs géométriques du nuage de points LiDAR, également appelés « métriques ». On utilise pour ceci un ensemble de placettes de terrain géoréférencées pour lesquelles les paramètres du peuplement sont connus. Le nuage de points LiDAR est extrait sur l'emprise de ces placettes et différentes métriques sont calculées afin de les relier aux caractéristiques du peuplement.

Les principales étapes aboutissant à la cartographie finale des paramètres forestiers sont présentées dans les paragraphes suivants.

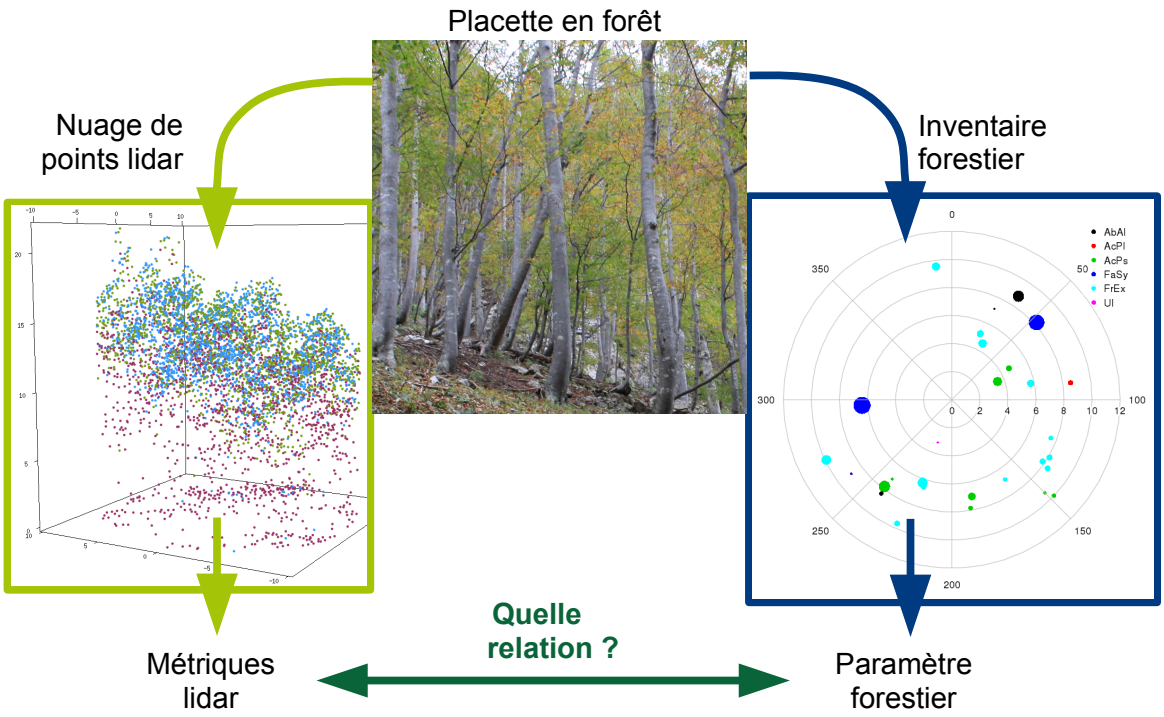
Élaboration des références de terrain

Les placettes de référence de terrain servent deux objectifs :

- établir les relations empiriques entre les métriques LiDAR et les paramètres forestiers, on parle de jeu de données d'apprentissage ;
- évaluer l'erreur d'estimation des relations empiriques (ou « modèles ») afin de connaître la validité de la cartographie qui en sera tirée, on parle de jeu de données de validation.

La première étape est de définir à quelle zone devra s'appliquer le modèle LiDAR. Il s'agit de délimiter la zone d'étude selon ce que l'utilisateur final considère comme forêt ou comme zone d'intérêt. Cette délimitation peut s'appuyer sur une cartographie préexistante, sur des données LiDAR elles-même ou sur d'autres données de télédétection.

Une fois la zone d'étude définie, le jeu de données d'apprentissage doit être constitué. Afin que le modèle qui en sera tiré soit valide pour l'ensemble des peuplements forestiers présents dans la zone d'étude, il est important que le jeu de données d'apprentissage couvre la variabilité du paramètre et l'extension spatiale rencontrée sur la zone d'étude [8]. La manière la plus simple de sélectionner les placettes est d'en tirer au sort un nombre relativement important. On peut espérer couvrir aussi bien la gamme de variabilité du paramètre en tirant moins de placettes au sort mais en s'assurant de les répartir selon une stratification préalable de la zone d'étude.



^ *Méthodologie de l'approche surfacique*

Afin que l'estimation de l'erreur faite sur le jeu de validation puisse être étendue à l'ensemble de la zone d'étude, il est primordial que le jeu de validation constitue un échantillon représentatif de la zone d'étude. Le moyen le plus simple est encore de tirer au sort les placettes, et on peut attendre une meilleure représentativité en répartissant les placettes dans différentes strates proportionnellement à la surface qu'occupent ces différentes strates dans la zone d'étude. Par ailleurs, un nombre trop faible de placettes risque de conduire à une sous-estimation des intervalles de confiance [9]. Malheureusement il n'existe pas de préconisation générale pour ce nombre dans la mesure où cela dépendra des peuplements et des paramètres de vol.

Des méthodes statistiques permettent d'utiliser un seul jeu de données à la fois pour l'apprentissage et la validation. Si l'on veut évaluer l'erreur pour la zone d'étude, il est primordial que ce jeu de données constitue un échantillon représentatif de la zone d'étude. Si ce n'est pas le cas, il ne sera pas possible d'étendre l'estimation de l'erreur sur le jeu de données à la carte obtenue pour l'ensemble de la zone d'étude.

La phase de collecte des données de terrain est probablement le poste le plus coûteux d'un inventaire par scanner laser aéroporté par l'approche surfacique. Lorsque cela est possible, il sera très intéressant de pouvoir disposer de données préexistantes comme les placettes effectuées dans le cadre des inventaires forestiers nationaux ou régionaux.

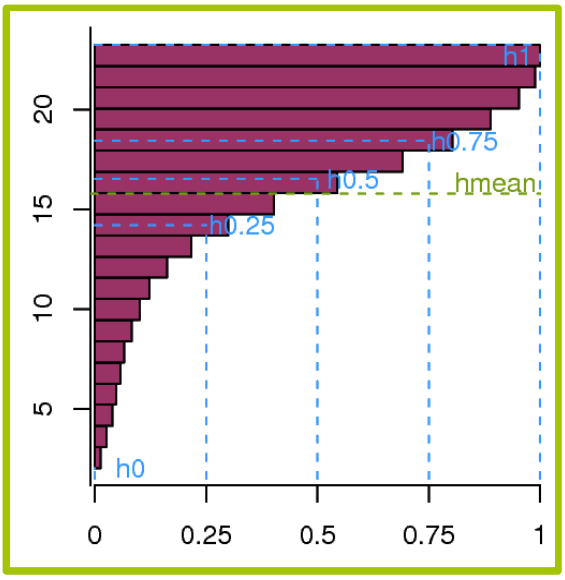
Les placettes de terrain seront idéalement des placettes à rayon fixe, ce qui facilite la mise en correspondance avec les données LiDAR. Les informations minimales dont on doit disposer sont le paramètre forestier mesuré sur la placette et l'emprise géographique de la placette (par exemple coordonnées du centre et rayon dans le cas de placettes circulaires).

Validation des données LiDAR et extraction des métriques

La validité du modèle qui sera construit à partir des données d'apprentissage dépend également du respect d'une hypothèse implicite : l'interaction entre les impulsions laser et le couvert végétal doit être relativement homogène (angle de scan, densité de point...) sur l'ensemble de la zone d'étude. Si ce n'est pas le cas, les métriques LiDAR pourraient avoir

des dépendances spatiales liées aux paramètres de vol qui masqueraient leur capacité à caractériser le couvert forestier.

De nombreux travaux ont également montré l'intérêt d'intégrer des métriques complémentaires extraites de données optiques comme des orthophotos aériennes [11] ou satellitaires [12].



^ Distribution cumulée des hauteurs des points LiDAR extraits sur une placette et positions des différents quantiles

Parmi les premières métriques proposées dans la littérature figurent les indices statistiques de la distribution verticale des échos (quantiles, moyenne, écart-type, proportion cumulée sous certains seuils de hauteur). On peut faire l'hypothèse que cette distribution reflète la distribution verticale de la canopée et donc indirectement les paramètres physiques d'un peuplement.

Cependant ces métriques unidimensionnelles ne rendent pas compte de l'hétérogénéité spatiale qui peut exister au sein du peuplement, ainsi d'autres métriques ont été proposées, comme celles liés au taux de couvert, à la texture (métriques 2.5D) ou encore les voxels (métriques 3D). Récemment il a été proposé d'utiliser des métriques issues d'une analyse LiDAR à l'échelle de l'arbre [10]. Cependant ces métriques ne sont pertinentes que lorsque la densité de points LiDAR permet leur calcul.

Calibration et validation des modèles

De nombreuses approches ont été testées pour sélectionner les métriques LiDAR pertinentes et construire le modèle d'estimation le plus précis. La plus simple est la régression linéaire multiple mais des méthodes non linéaires ont également fait leurs preuves [13; 14]. Elles sont cependant plus complexes et nécessitent en général des jeux de données plus conséquents.

La validation des modèles s'effectue en estimant à partir des données LiDAR et de la relation calibrée sur les données d'apprentissage, la valeur du paramètre sur des placettes pour lesquelles une référence terrain est disponible. On utilise généralement l'erreur quadratique moyenne pour résumer la qualité de prédiction d'un modèle mais il est intéressant de voir comment sont distribuées les erreurs en fonction des valeurs de référence terrain.

Cartographie et validation à l'échelle agrégée

Pour appliquer le modèle, il faut découper la zone d'étude selon un motif similaire à celui des placettes de validation. Pour chaque élément, on calcule les métriques et on applique la relation pour avoir l'estimation du paramètre forestier.

Une manière simple est de découper la zone d'étude en pixels dont la superficie est similaire à celle des placettes de validation. Chaque pixel recevra pour valeur l'estimation correspondante. Cette solution simple a l'inconvénient que la validation du modèle est effectuée sur des éléments qui sont de forme différente par rapport à ceux qui figurent sur la carte. L'extrapolation des données de validation à la cartographie de la zone d'étude doit donc être faite avec précaution.

On peut également spatialiser les données avec une résolution plus fine en affectant au pixel central l'estimation calculée en réalité sur un voisinage plus étendu et conforme à la forme des placettes de validation. Le rendu apparaît ainsi plus lissé, avec une résolution plus fine mais occulte le fait que la valeur d'un pixel ne reflète pas uniquement le peuplement situé dans le pixel.

La production de cartes d'erreur fait actuellement l'objet de nombreux travaux de recherche, dans la mesure où l'auto-corrélation spatiale, qui est difficile à estimer, doit pouvoir être spatialisée si l'on veut que la carte d'erreur apporte réellement une information supplémentaire par rapport aux données de validation.

Les erreurs d'estimation LiDAR apparaissent souvent comme trop élevées au regard des demandes des gestionnaires. Comme souvent en télédétection, il faut mettre en balance l'erreur obtenue, l'échelle d'analyse (ici un pixel de l'ordre de 20 m de côté) et la surface totale analysée (de l'ordre de la centaine de kilomètres carrés).

L'erreur individuelle pour un pixel peut être élevée, la taille du pixel permet cependant de mettre en évidence des motifs spatiaux intervenant à une échelle inférieure à la taille de la parcelle.

Les quelques chiffres trouvés dans la littérature suggèrent que lorsque les estimations sont agrégées à l'échelle de la parcelle, l'erreur diminue [7]. Toutefois la vérification rigoureuse suppose de disposer d'une grand nombre de données d'inventaire en plein à l'échelle de la parcelle, ce qui est peu réalisable dans la pratique. Une étude menée sur 35 parcelles forestières d'une forêt gérée en futaie jardinée a montré qu'à l'échelle de la parcelle, les estimations LiDAR de surface terrière était d'une précision similaire à celle d'un inventaire pied à pied [15].

Si l'on agrège pour des surfaces plus grandes, l'inventaire assisté par télédétection permet d'améliorer la précision des estimations [16; 17]. Cependant ce n'est pas l'objet de cette étude qui est la cartographie de la ressource à résolution fine.

2.1.3. Sources d'erreur de la méthode surfacique

Représentation de la forêt par le nuage de points

Tout d'abord, la méthode repose sur l'hypothèse implicite que la représentation géométrique des peuplements par la télédétection LiDAR est homogène sur l'ensemble de la zone d'étude. Cependant plusieurs facteurs peuvent engendrer de la variabilité dans l'interaction entre les impulsions laser et le couvert végétal :

- l'angle de scan joue sur la pénétration des impulsions laser dans la canopée,
- le motif de balayage joue sur la répartition des impulsions au sol,
- la taille de l'empreinte varie selon l'altitude de vol,
- la densité d'impulsions dépend des paramètres de vol,
- la topographie rend tout cela encore plus complexe.

Les signaux bruts enregistrés par le scanner ne résultent donc pas vraiment d'un processus d'acquisition homogène. Cependant les contraintes d'acquisition, matérielles et financières, font qu'il n'est pas toujours possible d'optimiser au mieux les paramètres d'acquisition.

La densité d'impulsion, mais aussi la manière dont les signaux bruts sont pré-traités lors de l'extraction et de la classification des échos, va également jouer sur l'homogénéité du nuage de points à l'échelle de la zone d'étude et sur sa capacité à modéliser fidèlement le couvert forestier. Si le paramétrage des algorithmes est modifié automatiquement ou manuellement selon des sous-zones, cela peut engendrer des motifs spatiaux dans les caractéristiques du nuage de points. De manière générale, dans les zones où la densité d'impulsions LiDAR est trop faible, la représentation du couvert sera de moins bonne qualité.

Représentation de la forêt par les mesures terrain

De plus, ce qui est mesuré en forêt n'est qu'une simplification de la complexité réelle des peuplements. Le choix d'un diamètre précomptable fait disparaître de l'inventaire des arbres qui existent et pourraient interagir avec des impulsions laser. Résumer un peuplement par une valeur de volume estimée à partir de modèles allométriques et des mesures de diamètre et éventuellement de hauteur ne donne qu'une idée grossière du peuplement, étant donné la variabilité des individus et des structures en forêt. Or ce n'est pas un volume ou une surface terrière, mais un assortiment de branches, feuilles, troncs qui interagit avec le signal LiDAR.

Mise en correspondance de ces deux représentations

D'une part la description par le LiDAR du couvert végétal est partielle et hétérogène, et d'autre part le gestionnaire résume un peuplement de manière très simplifiée. La mise en correspondance au sein d'un modèle de prédiction n'est donc pas triviale d'autant plus que d'autres sources d'approximation interviennent.

- L'erreur de positionnement GPS et la taille des placettes engendrent des décalages entre les références terrain et le lieu d'extraction des données LiDAR, au-delà des effets de bordures existants.
- Le choix des métriques LiDAR et de la méthode de régression jouent sur la capacité du modèle à utiliser l'information pertinente dans le nuage de points pour estimer le paramètre d'intérêt.
- Le choix d'échantillonnage et le nombre de placettes du jeu d'apprentissage sont déterminants pour la capacité du modèle à prendre en compte à la fois la variabilité des forêts mais aussi celle de l'acquisition LiDAR pour l'ensemble de l'extension spatiale de la zone d'étude.

Enfin, le choix d'échantillonnage, le nombre de placettes du jeu de validation, ainsi que la méthode de spatialisation des données vont jouer sur la possibilité d'étendre correctement l'estimation de l'erreur du modèle sur le jeu de données de validation à la cartographie finale.

2.1.4. Détection d'arbres

Lorsque la densité de points du nuage LiDAR est supérieure à 5 points/m^2, il devient possible d'extraire les arbres individuellement dans la mesure où ceux-ci sont décrits par un nombre suffisant de points [18]. Sur la base de critères géométriques définissant l'objet « arbre », on peut donc segmenter le nuage de points en différents individus dont on estime ensuite les caractéristiques individuelles. De nombreuses méthodes ont été proposées pour réaliser ces opérations. Une technique très répandue du fait de sa simplicité et sa rapidité est la détection de maxima locaux [19]. Elle repose sur l'hypothèse que les maxima locaux du modèle de canopée sont assimilables aux sommets des arbres, sous réserve de remplir certaines conditions de hauteur, et d'éloignement par rapport à leurs voisins. Les arbres dominants sont très bien détectés, et leur hauteur est très bien estimée. Cependant les arbres dominés et co-dominants, qui ont une probabilité moindre d'intercepter les impulsions laser, sont mal représentés dans le nuage de points laser et sont plus difficiles, voire impossible, à détecter. Le taux de détection global varie selon la structure du peuplement et la densité du nuage de points, ce qui rend difficile l'estimation de paramètres agrégés décrivant l'ensemble du peuplement à partir des seuls arbres détectés. D'autre part, l'estimation du volume individuel à partir de la hauteur, et éventuellement d'autres informations géométriques extraites du nuage de points LiDAR comme la surface ou le volume de houppier, reste délicate.

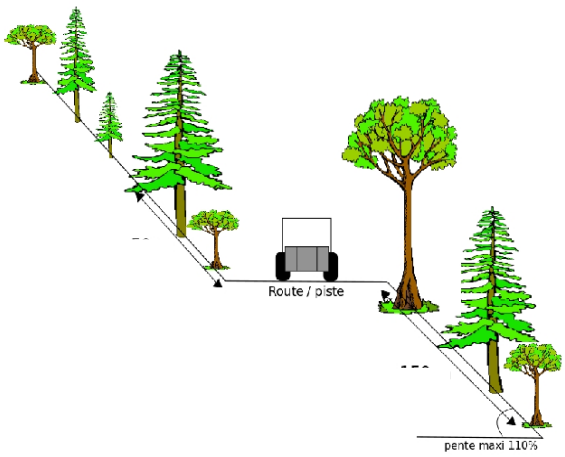
Cette méthodologie, initialement envisagée pour traiter les données cantonales du Val d'Hérens, n'a finalement pas été retenue car elle ne peut pas être appliquée aux données fédérales du fait de la basse densité du nuage LiDAR.

2.2. Cartographie automatique de l'accessibilité avec *Sylvaccess*

Le modèle *Sylvaccess* [2; 3], développé au centre Irstea de Grenoble, est prévu pour identifier les forêts accessibles par tracteur forestier et câble-grue en montagne. Les paramètres de modélisation ont été adaptés aux pratiques constatées dans le Bas-Valais.

Les engins d'exploitation suivants ont été testés :

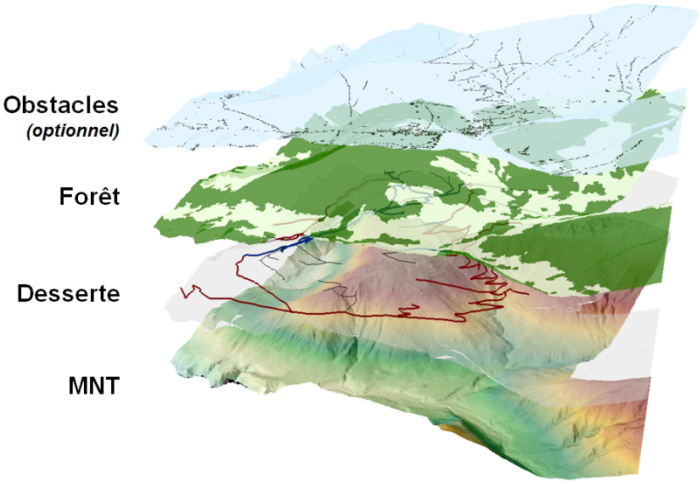
- tracteur forestier (skidder),
- câble-grue mobile,
- câble-grue conventionnel.



2.2.1. Données spatiales

Données spatiales obligatoires

Trois couches d'information spatiale sont obligatoires pour que le modèle fonctionne :



- modèle numérique de terrain (MNT),
- une couche de **desserte** détaillant le réseau public, les routes forestières et les pistes forestières,
- une couche du contour des **forêts**

Couche	Type	Résolution de la donnée source	Sources
MNT	Raster	2 m, ré-échantillon-né à 5 m	swissALTI3D (swisstopo)
Desserte	Vecteur		Desserte forestière (canton du Valais) Réseau routier Vector25 (swisstopo)
Forêt	Vecteur		Carte des associations forestières, nouvelle version (canton du Valais)

La préparation de la couche desserte demande une attention particulière. Elle comporte les étapes suivantes :

- croisement des différentes couches disponibles afin d'obtenir une information autant exhaustive que possible ;
- qualification de chaque segment en trois classes : réseau public accessible, route forestière (accessible à un camion forestier), piste forestière (accessible au tracteur forestier) ;
- numérisation supplémentaire à partir du modèle altimétrique.

Données spatiales facultatives

Pour une modélisation plus réaliste, *Sylvaccess* offre la possibilité de prendre en compte des couches d'obstacles afin d'exclure un mode d'exploitation. Les obstacles peuvent être de deux types :

- Infranchissables : mode de débardage à proscrire totalement ;
- Partiels : seulement pour le tracteur forestier : le tracteur ne peut circuler physiquement sur la zone mais l'opérateur peut utiliser son treuil pour tirer les bois jusqu'à l'engin.

Lors de cette étude, aucun obstacle partiel n'a été pris en compte. Les obstacles infranchissables pris en compte pour chaque mode de débardage sont les suivants :

Type d'obstacles	Source	Tracteur	Câble-grue
Autoroute, routes	Vector25	X	X
Voies ferrées	Vector25	X	X
Bâtiments	Vector25	X	X
Étendue d'eau	Vector25	X	X
Cours d'eau à régime permanent	Vector25	X	
Ligne électrique haute tension	Vector25		X
Transport par câble (station ski)	Vector25		X

2.2.2. Paramètres

De nombreux paramètres entrent en compte dans la modélisation. Ils sont spécifiques à chaque mode d'exploitation. Les tableaux suivants rappellent les valeurs retenues. Les valeurs ont été présentées lors de la réunion avec les gardes forestiers du 26 mars 2015. Les valeurs par défaut ont été changées notamment pour le tracteur forestier, où les pratiques locales sont de limiter la portée à une hauteur d'arbre en amont et deux hauteurs d'arbre en aval. Les paramètres du modèle ont donc été fixés à 30 et 60 m pour la distance maximale de treuillage.

Connaissant les machines opérant sur la zone les trois cas-types pour le débardage par câble sont (source Forêt Valais) :

- petit câble-grue mobile (Machines : Koller K307 ou KMS 12) ; portée maximale de 500m, diamètre du câble porteur : 19mm ;
- grand câble-grue mobile (Machines : Koller K607 ou Valentini V850) ; portée maximale de 800m, diamètre du câble porteur : 22mm ;
- câble conventionnel (Machine : Wyssen W30) ; portée maximale > 1 500m, diamètre du câble porteur : 24mm.

Afin de simplifier l'analyse ultérieure, on considère pour la modélisation les cas du grand câble-grue mobile et du câble conventionnel, pour lesquels les grilles tarifaires existent.

Sylvaccess **général**

Description	Valeur retenue
Résolution des couches rasters utilisées	5 m
Pente maximale pour le bûcheronnage manuel	110 %

Le MNT swissALTI3D est fourni à 2 m mais à cette résolution les temps de calculs seraient trop longs. Par ailleurs, la comparaison de résultats obtenus sur une zone plus petite avec différentes résolutions montrent que pour le tracteur forestier les résultats sont similaires pour des résolutions jusqu'à 10 m. Pour le câble, le choix de 5 m est un compromis entre le temps de calcul et la qualité du profil topographique servant à la modélisation des lignes.

Sylvaccess **Skidder**

Description	Valeur retenue
Pente maximale pour libre circulation dans peuplement	30 %
Distance maximale de treuillage en amont	30 m
Distance maximale de treuillage en aval	60 m
Pente pour laquelle la distance de treuillage amont	75 %
Pente pour laquelle la distance de treuillage aval	20 %
Distance maximale hors forêt et hors desserte	100 m

Sylvaccess **– Câble-grue**

Description		Unité	Mobile	Conven-tionnel
Propriétés du câble porteur	Longueur maximale du câble porteur	m	800	1 500
	Longueur minimale du câble porteur	m	125	150
	Masse linéique du câble porteur	kg/m	2,6	3,1
	Module de young (élasticité) du câble porteur	kN/mm^2	100	100
	Diamètre du câble porteur	mm	22	24
	Tension de rupture	kgF	36 000	48 000
Propriétés du câble tracteur	Masse linéique du câble tracteur	kg/m	0,5	0.5
	Capacité de charge maximale du système	kg	2 500	2 500

Propriétés du chariot	Masse du chariot à vide	kg	500	500
	Pente minimale pour que le chariot descende par gravité	%	15	15
	Débardage vers l'amont possible (2 câbles)	-	Oui	Oui
	Débardage vers l'aval possible (3 câbles)	-	Oui	Oui
Paramètres de calcul	Hauteur du mât	m	13	8
	Hauteur des supports intermédiaires	m	10	10
	Hauteur au support terminal	m	10	10
	Hauteur minimale du câble porteur en tout point	m	4	4
	Nombre maximum de supports intermédiaires	-	3	3
	Distance latérale de pêchage des bois	m	30	30
	Coefficient de sécurité	-	3	3
	Angle maximum du câble porteur au niveau des supports intermédiaires	degré	30	30

Le modèle teste un grand nombre de lignes ce qui permet de définir la surface techniquement accessible avec les deux configurations. En pratique c'est uniquement un sous-ensemble de lignes, plus pertinentes du point de vue technique ou économique, qui est retenu par le gestionnaire pour assurer le débardage d'une zone donnée.

Sylvaccess permet de réaliser une sélection automatique des meilleures lignes en fonction de un ou plusieurs critères. Les critères de sélection retenus ici sont par ordre d'importance :

1. maximiser la surface de forêt traitée,
2. limiter le nombre de supports intermédiaires,
3. limiter la distance moyenne parcourue par le chariot.

2.2.3. Sorties produites par le modèle

Sylvaccess **Skidder**

Sorties spatialisées au format raster (.tif) :

- Distance de débusquage
- Distance de traînage en forêt
- Distance de traînage sur piste
- Distance totale de débardage (somme des trois distances précédentes)
- Zone directement parcourable par le skidder
- Zone accessible
- Zone non accessible
- Lien entre chaque pixel de forêt et son point de connexion optimal avec les pistes forestières
- Lien entre chaque pixel de forêt et son point de connexion optimal avec les routes forestières
- Lien entre chaque pixel de forêt et son point de connexion optimal avec le réseau public

Sorties au format texte (.txt) :

- Fichier rappelant les paramètres de modélisation utilisés
- Fichier résumant les surfaces accessibles par classes de distance totale de débardage

Sylvaccess **– Câble-grue**

Sorties du test exhaustif de toutes les lignes possibles :

- Zone accessible (format raster .tif)
- Tableau détaillant les paramètres de chaque ligne techniquement réalisable (format .gzip)
- Fichier rappelant les paramètres de modélisation utilisés

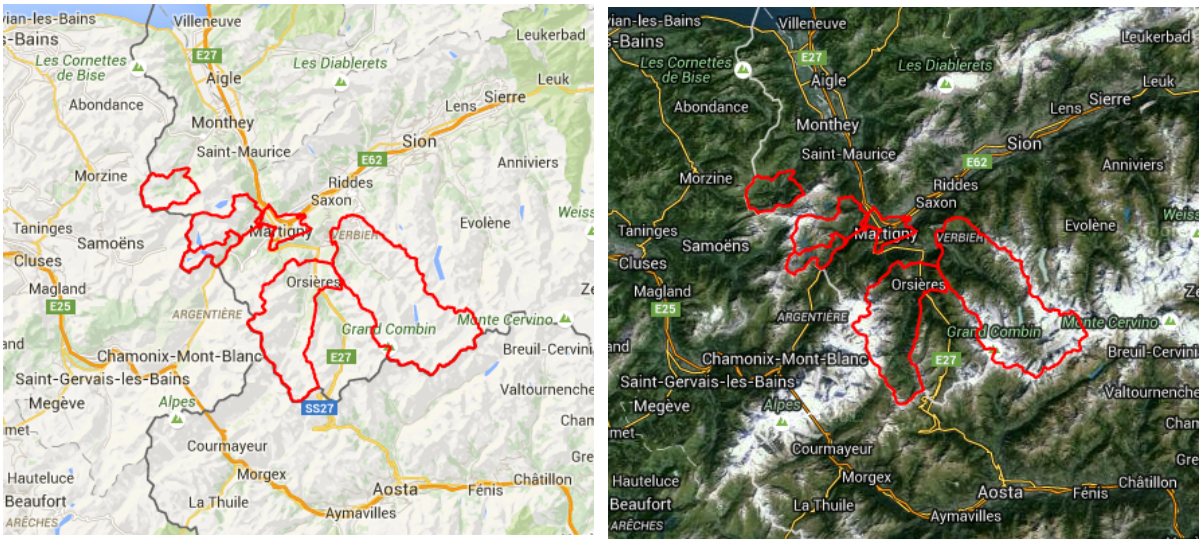
Sorties de la sélection des meilleures lignes parmi celles techniquement réalisables :

- Emprise des lignes sélectionnées (format raster .tif)
- Emplacement des lignes sélectionnées (format vecteur .shp)
- Emplacement des pylônes intermédiaires pour chacune des lignes sélectionnées (format vecteur .shp)
- Fichier effectuant le bilan de la sélection des lignes (nombres de lignes, surface traitée,…)

3. Zone d'étude

3.1. Localisation

La zone d'étude comprend six communes du canton du Valais : Bagnes, Orsières, Salvan, Champéry, Martigny et Finhaut. Cette zone d'environ 588 km^2 présente une grande variété de forêts, depuis les peuplements de la plaine du Rhône jusqu'aux peuplements subalpins. Pour des raisons méthodologiques liées aux données de terrain, et pratiques liées au format de livraison des données LiDAR, l'analyse de la ressource est faite sur une zone plus vaste, approximativement égale au Bas-Valais.

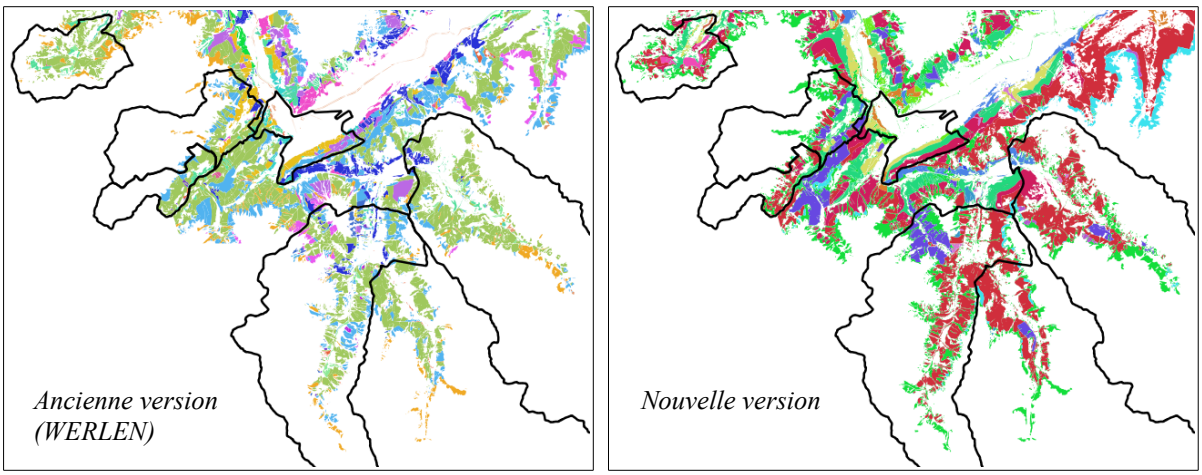


^ *Aperçu des six communes d'étude (source Google Maps)*

3.2. Données cantonales

3.2.1. Cartographie des peuplements forestiers

Le canton du Valais dispose d'une carte décrivant les peuplements forestiers. La version actuelle est en cours de mise à jour, et centrée sur les associations forestières, alors que la version précédente (WERLEN) propose l'information sur les essences majoritaires.



^ *Cartes des associations forestières (source canton du Valais)*

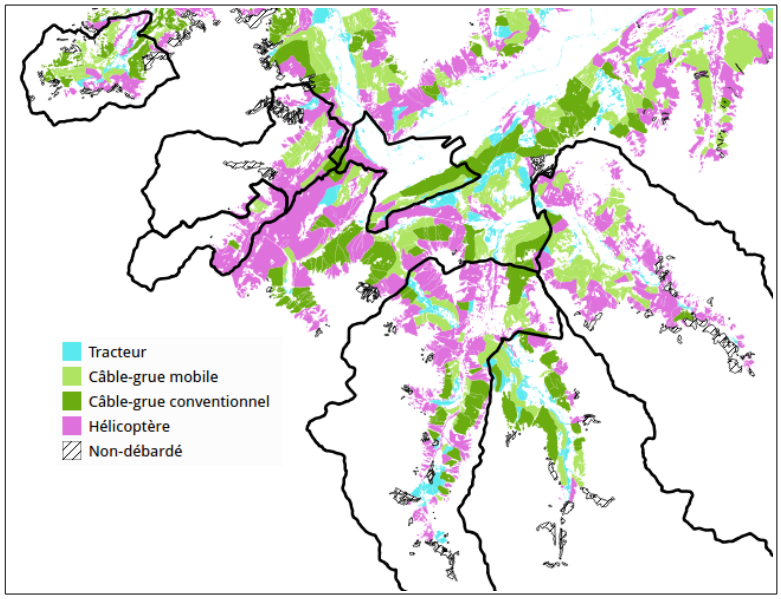
3.2.2. Desserte

Le canton du Valais est en train de finaliser la carte des dessertes forestières, qui fait l'inventaire des routes et chemins accessibles à différents types de véhicules forestiers, notamment camion forestier / tracteur / jeep.

3.2.3. Diagnostic des méthodes de débardage

Une étude sur les modes de débardage a été conduite, notamment par enquête auprès des gardes-forestiers, pour déterminer le mode de débardage préférentiel par unité de gestion.

> Carte des modes de débardage (source canton du Valais)



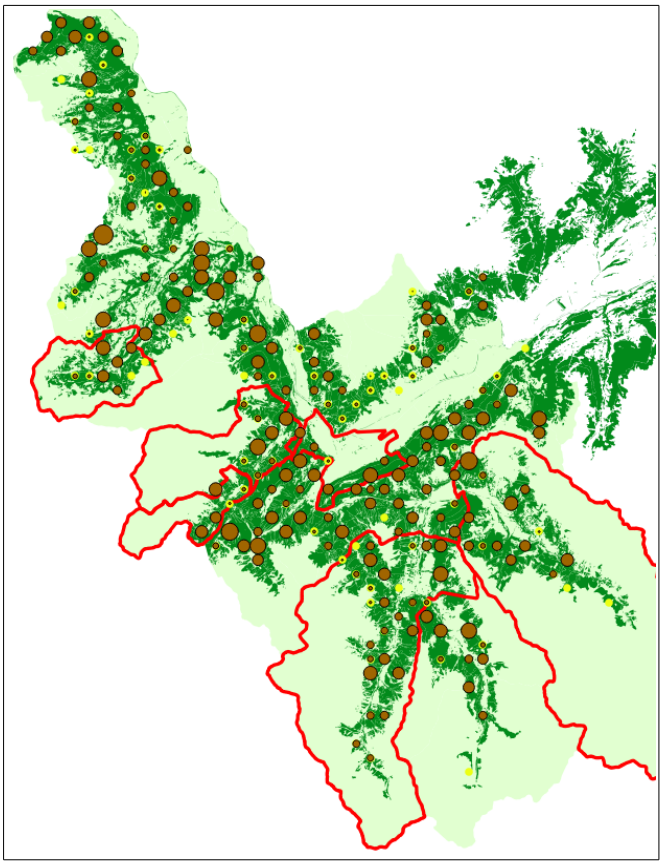
3.3. Données fédérales

3.3.1. Placettes de l'Inventaire Forestier National

L'Inventaire Forestier National (IFN) a pour objectif d'évaluer l'état et la dynamique des forêts suisses. Il se base pour cela sur un réseau de placettes de terrain. Le protocole [20] prévoit l'échantillonnage sur une grille de pas 1,4 km. Les arbres inventoriés sont les arbres de diamètre supérieur à 12 cm à une distance inférieure à 7,98 m du nœud de la grille, ainsi que les arbres de plus de 36 cm sur un rayon de 12,62 m, ce qui représente un disque de 500 m^2.

À partir des mesures individuelles des arbres, l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL) calcule notamment pour chaque placette les paramètres forestiers suivants : hauteur moyenne, diamètre moyen, densité de tiges, volume et surface terrière. Les informations suivantes sont également disponibles pour chaque placette : identifiant, coordonnées et altitude, classe d'altitude, code et intitulé exposition, code et intitulé pente.

Les six communes contiennent 68 placettes inventoriées dans le cadre de l'IFN3 (2004-2006), ce qui est faible pour la modélisation, aussi les placettes alentour ont également été utilisées. Dans le cas d'inventaires basés sur des modèles, l'utilisation de placettes hors du domaine d'étude permet de renforcer la validité de la modélisation, au risque d'induire des biais, qui peuvent cependant être corrigés a posteriori [16].



< Les placettes IFN du Bas-Valais (points marrons, taille proportionnelle au volume inventorié, points jaunes : placettes à volume très faible ou nul). En vert, l'emprise des forêts. Source WSL / canton du Valais.

Le tableau suivant présente les statistiques des 68 placettes présentes sur les six communes. Six placettes n'ont pas un couvert boisé significatif (valeurs non calculées), et la hauteur moyenne n'est fournie que pour 42 d'entre elles. On remarque une très forte dispersion, avec des volumes de 13 à 834 m^3/ha et des surfaces terrières de 2 à 84 m^2/ha.

	Hauteur moyenne (m)	Volume (m^3/ha)	Densité (/ha)	Diamètre moyen (cm)	Surface terrière (m^2/ha)
Nb de placettes	42	62	62	62	62
Minimum	10.0	13	50	14.0	2.0
Moyenne	20.3	291	636	27.7	32.9
Maximum	31.0	834	2470	49.0	84.0

Le principal avantage des données IFN est qu'elles sont issues d'un protocole d'inventaire très bien documenté et couvrant l'ensemble du territoire. Les paramètres du peuplement sont déjà calculés à l'échelle de la placette, notamment le volume qui bénéficie des relations allométriques élaborées sur l'ensemble des données IFN.

Les inconvénients sont :

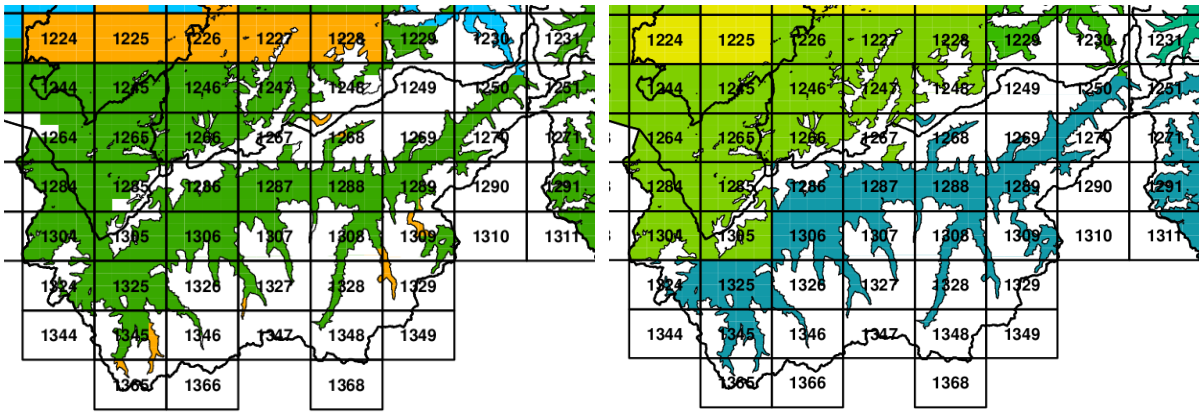
- le faible nombre de placettes pour des surfaces de l'ordre de la centaine de km^2,
- le décalage temporel pouvant exister entre la date d'inventaire sur le terrain et la date d'acquisition des données de télédétection,
- l'imprécision du géoréférencement des relevés de terrain.

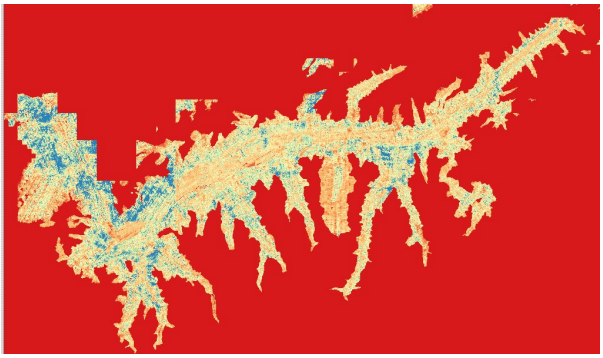
Dans le cadre d'une étude précédente (diaporama du 19 nov. 2012, projet Newfor), l'analyse de la précision de géoréférencement menée par comparaison du modèle de canopée des données LiDAR haute densité et de la cartographie des arbres sur les placettes IFN du Val d'Hérens a montré que pour 44 placettes où la correspondance a pu être identifiée, le décalage moyen est de 4.6 m, avec un écart-type de 3.5 m. Le décalage géographique est une source d'erreur dans les modèles, cependant des études basées sur des simulations ont montré que la dégradation de la qualité des estimations n'intervient qu'au delà d'un décalage de l'ordre de 5 m [21]. D'autre part dans le cas de modèles calibrés sur des données décalées, l'erreur du modèle est plutôt sur-évaluée [22].

Dans le cadre de cette même étude Newfor (diaporama du 27 nov. 2012), l'analyse de l'influence des changements étant intervenus sur le peuplement entre la date du vol et les relevés de terrain montre que les modèles sont légèrement moins bons lorsque les changements décelables ne sont pas corrigés. Cependant la correction des changements suppose un forte densité de points permettant d'identifier les incohérences entre le modèle de canopée LiDAR et la cartographie des arbres au moment de l'inventaire. Les données LiDAR fédérales ne permettent pas d'effectuer cette comparaison.

3.3.2. Données LiDAR

Une couverture LiDAR de l'ensemble de la Suisse a été réalisée de 2000 à 2008 pour les zones d'altitude inférieure à 2000 m [1]. Les informations sur le vol (date exacte, type de scanner et configuration de vol) ne sont pas directement accessibles. Les données LiDAR sont disponibles sont la forme d'un nuage de points (X, Y, Z). Les attributs supplémentaires comme l'intensité ou l'ordre de retour sont inexistantes ou indisponibles. Il n'y pas de classification, cependant le modèle numérique de terrain (swissALTI3D) permet d'effectuer la distinction sol/hors-sol sur la base d'un seuil de hauteur par rapport à la surface du sol.





^^ Période de vol (vert : mars-mai, orange : septembre-novembre) (source Swisstopo)

^ Année de vol (vert : 2001, bleu : 2005) (source Swisstopo)

< Densité d'impulsions LiDAR (échelle de rouge : 0/m² à bleu : 2.5/m²)

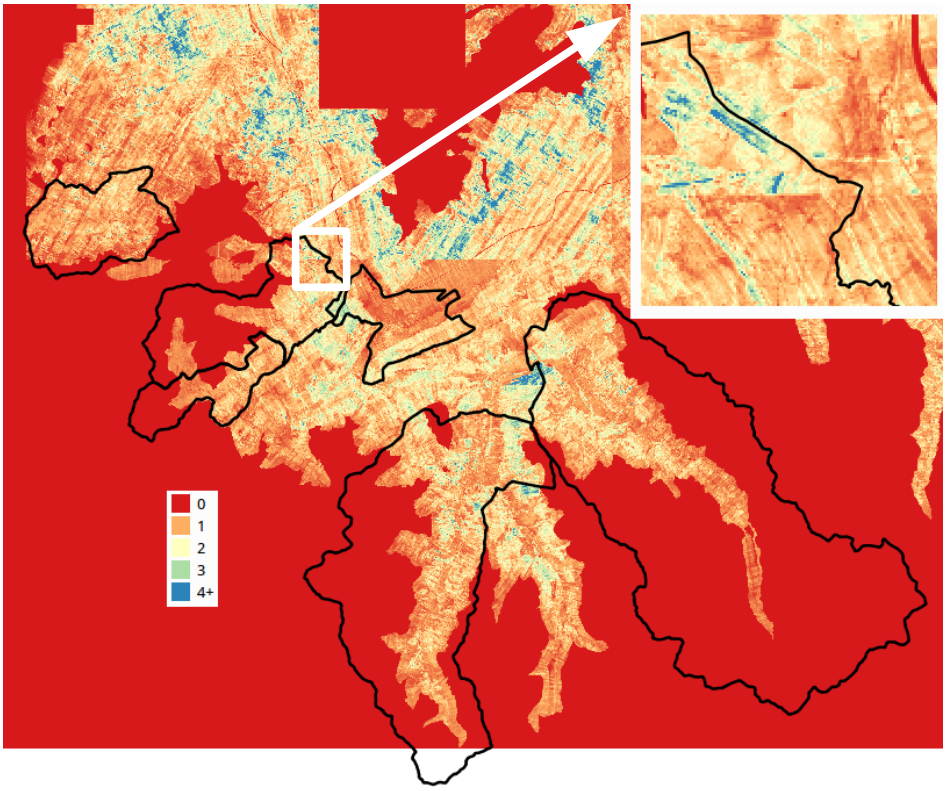
Données LiDAR fédérales disponibles sur le canton du Valais.

1 http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/fr/home/products/height/dom_dtm-av.html

Il n'est par contre pas possible de distinguer a priori la végétation des autres éléments hors-sol. Les données sont fournies par dalles rectangulaires. Les communes ont majoritairement été couvertes en 2005, sauf Champéry et une partie de Salvan. Ce décalage temporel pourrait donner lieu à des estimations biaisées par l'année de vol.

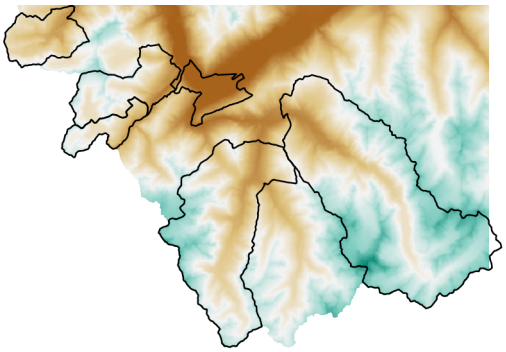
Hormis quelques zones situées en haute altitude sur la commune d'Orsières, l'acquisition a eu lieu au printemps (mars-mai). Cependant on ne connaît pas exactement la date des vols qui ont été fusionnés pour composer une dalle donnée. La présence simultanée de données acquises dans des conditions de feuillage différentes pourrait se révéler problématique, principalement pour les peuplements feuillus.

> Densité d'impulsions (/m²) sur le Bas-Valais. On remarque sur le grossissement en haut à droite les écarts de densité entre deux dalles adjacentes issues d'années de vol différentes.



3.3.3. Données topographiques

On dispose sur la zone du modèle altimétrique swissALTI3D, à résolution 2 m, fourni par Swisstopo. Ce modèle est calculé à partir des données LiDAR pour les zones couvertes (altitude inférieure à 2000 m), et par stéréocorrélation pour le reste.



> Modèle altimétrique swissALTI3D

http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/fr/home/products/height/swissALTI3D.html

4. Cartographie de la ressource bois énergie

4.1. Chaîne de traitement

L'objectif de cette tâche du projet PlanETer est de proposer une méthodologie pour la cartographie de la ressource bois énergie durablement mobilisable. Cela suppose de disposer d'une information spatialisée pour chaque élément de la chaîne de mobilisation qui conduit de la forêt au produit bois-énergie. Or ce n'est pas forcément le cas pour toutes les étapes.

Le paragraphe 4.2 détaille la chaîne de traitement qui permet de passer du nuage de points LiDAR à une cartographie du volume sur pied. Il n'est pas possible actuellement de cartographier avec une résolution spatiale fine d'autres informations qui sont pourtant nécessaires pour estimer la répartition du volume sur pied en différents produits bois (feu, service, industrie) : c'est le cas notamment de la distribution des diamètres, de la qualité des bois ainsi que des essences.

De la même manière le paragraphe 4.3 montre qu'il est possible de cartographier automatiquement les possibilités techniques d'utilisation de différents matériels forestiers. Cependant, le passage au coût nécessite de prendre en compte les caractéristiques de la ressource (volume de l'arbre moyen) mais aussi des critères organisationnels qu'il n'est pas possible de modéliser (disponibilité des entreprises, mutualisation des moyens sur plusieurs chantiers proches...).

Plus globalement, il est peu réaliste de traiter de manière indépendante d'une part le coût de mobilisation via des critères techniques et topographiques, et d'autre part les produits bois disponibles via l'analyse de la ressource sur pied. En effet, la valorisation de la ressource sur pied en différents produits résulte d'un acte de gestion complexe, où la ressource et ses possibilités de mobilisation sont analysées en fonction de l'état du peuplement, des objectifs assignés à la forêt, des possibilités techniques et organisationnelles d'exploitation et du contexte économique local et global (débouchés locaux, marché de l'énergie). La méthodologie proposée procède donc d'une forte simplification des processus décisionnels réels, et combine différentes étapes où le niveau de spatialisation de l'information est très variable.

Dans les paragraphes suivants sont détaillées les étapes proposées pour passer de la cartographie du volume et de l'accessibilité à une information sur la ressource énergétique mobilisable (paragraphe 4.4) et sur son coût de mobilisation (paragraphe 4.5), en tirant partie des informations disponibles.

La question de l'échelle temporelle est également délicate. Si l'on entend par « durablement exploitable » le fait que l'on se place dans des cycles de production permettant de préserver indéfiniment la capacité de production de la forêt, il devient difficile d'obtenir des estimations avec une résolution spatiale très fine, sur un pas de temps très étendu. Par ailleurs les données d'accroissement ne sont pas disponibles pour les associations forestières du Bas-Valais, il n'est donc pas possible de se caler sur une référence de production biologique. L'approche adoptée a donc été de considérer que la gestion courante des forêts du Bas-Valais est équilibrée. La vérification de cette hypothèse est une question complexe qui n'est pas l'objet du présent rapport. En pratique, le taux de prélèvement proposé est donc associé avec une durée de rotation sylvicole (temps entre deux interventions) compatible avec les volumes exploités annuellement ces dernières années.

4.2. Cartographie du volume sur pied

La chaîne de traitement consiste en l'application de la méthodologie détaillée au paragraphe 2.1.2.

4.2.1. Données de terrain

De part le protocole d'inventaire basé sur une grille d'échantillonnage systématique, les placettes IFN semblent appropriées à la fois pour calibrer les modèles et pour évaluer leur précision. Les paramètres forestiers considérés sont la surface terrière (m^2/ha), la densité de tiges (/ha), le diamètre moyen (cm) et le volume sur pied (m^3/ha). La variable volume est calculée sur la base de relations allométriques établies à partir de la base de données de l'IFN. Il s'agit de la principale variable objectif mais la modélisation d'autres variables, notamment le diamètre, est utile pour l'estimation des coûts. Les données IFN sont présentées au paragraphe 3.3.1.

203 placettes situées dans et autour des six communes ont été utilisées pour la modélisation. Il a tout d'abord été nécessaire de retirer celles qui ne se trouvent pas en zone significativement boisée (aucun paramètre forestier calculé en l'absence d'arbres de diamètre supérieur à la limite d'inventaire).

Étant donné le décalage temporel possible entre l'inventaire des placettes et l'acquisition LiDAR, une vérification de la concordance entre les données de terrain et l'apparence du nuage de point a été effectuée pour chaque placette. Au cas où le nuage ne semblait manifestement pas concordant avec les données IFN, la placette était écartée.

Enfin plusieurs stratégies de stratification ont été testées pour calibrer les modèles, l'objectif étant d'obtenir des modèles spécifiques pour des types forestiers assez homogènes. Une stratification basée sur l'altitude a été testée, ainsi que sur l'essence majoritaire (feuillus / résineux). Il s'avère que la stratification n'améliore que les estimations de volume, et ce de manière marginale. Afin de simplifier les étapes ultérieures, un modèle global a donc été utilisé.

4.2.2. Méthode de calcul des métriques et modélisation

Étant donné la nécessité de traiter des jeux de données très volumineux, le logiciel Fusion [23] a été utilisé. Les métriques LiDAR sont calculées d'une part pour chaque placette, sur la base de leurs coordonnées et de leur rayon maximal (12.62 m) et d'autre part pour chaque pixel résultant d'un découpage de l'ensemble de la zone d'étude selon une grille de pas 20 m, qui sera le canevas final pour la cartographie des différents paramètres forestiers. Seuls les échos de hauteur supérieure à 2 m sont considérés, afin de limiter l'influence des strates arbustive et herbacée.

Pour chaque variable forestière, préalablement transformée par transformation Box-Cox pour normaliser sa distribution, la régression linéaire comportant au maximum trois métriques explicatives et avec le meilleur adj-R^2 est retenue comme modèle de prédiction.

En absence de données additionnelles, l'évaluation de la qualité des relations se fait par validation croisée « leave-one-out ». L'erreur est calculée comme la racine de l'erreur quadratique moyenne, exprimée en valeur absolue (EQM) et en pourcentage de la valeur moyenne du paramètre forestier considéré (CV_{EQM}).

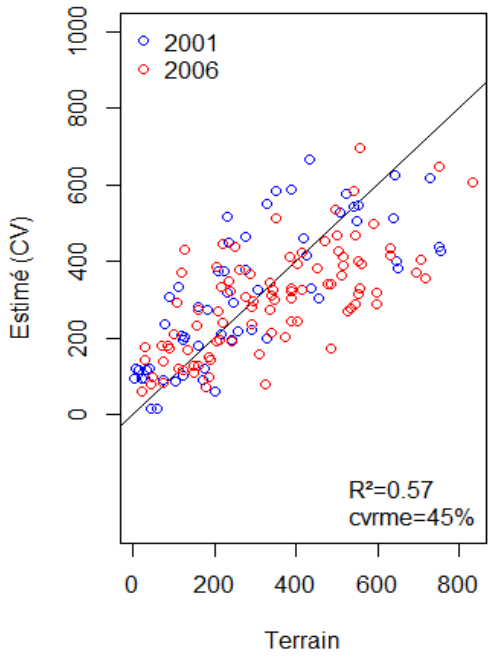
$$EQM=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\hat{e}_i-e_i)^2} \quad \text{et} \quad CV_{EQM}=\frac{EQM}{\bar{e}} \quad \text{avec} \quad \bar{e}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}e_i$$

où $\hat{e}_i$ et e_i sont respectivement les valeurs estimée et observée pour la placette i, et n est le nombre total de placettes.

Le tableau ci-dessous présente les modèles retenus lors de la modélisation, ainsi que l'erreur associée.

Variable	Nb placettes	Métriques LiDAR	adj-R^2	EQM	CV_{EQM} (%)
Hauteur moyenne	111	Elev.P90	0.56	3.7	17%
Surface terrière	152	Elev.stddev + Elev.variance + Elev.CV	0.41	15.4	45%
Densité de tiges	152	Elev.skewness + Elev.P90 + Elev.P99	0.16	341	63%
Diamètre moyen	152	Elev.IQ + Elev.P99	0.32	9.2	30%
Volume	152	Elev.P50 + Elev.P95 + Elev.SQRT.mean.SQ	0.57	142	45%

Au final, 152 placettes ont été retenues pour la modélisation, dont 111 avec des valeurs pour la hauteur moyenne. Pour la hauteur moyenne et le volume, les modèles expliquent près de 56 % de la variabilité, ils permettent donc de retranscrire approximativement les variations locales, même si l'erreur moyenne reste importante pour le volume (45%). L'erreur est peu importante pour le diamètre moyen, mais le modèle n'explique que peu la variabilité du paramètre, tout comme pour la surface terrière et la densité de tiges. Pour ce dernier paramètre le modèle est très peu pertinent.



Le graphique de validation pour le volume montre que les placettes sont bien réparties autour de la droite 1:1, mais avec une dispersion relativement importante. Il semblerai qu'il y ait une légère tendance à la surestimation par le modèle pour les placettes survolées en 2001, et une légère sous-estimation pour celles survolées en 2006. Étant donné que les mesures de terrain datent de 2004-2006, on s'attendrait à ce que la croissance des arbres depuis 2001 conduise à une sous-estimation. Il a donc probablement un autre effet lié à la saison de vol ou au type de scanner utilisé.

< Volumes estimés par le modèle en fonction des valeurs IFN.

4.2.3. Cartographie des paramètres forestiers

Pour chaque paramètre forestier, la cartographie est produite en appliquant les différentes relations aux métriques calculées par pixel, pour l'ensemble des dalles LiDAR qui intersectent les six communes. Ces dalles englobent approximativement l'ensemble du Bas-Valais. Les cartographies sont donc disponibles sur quasiment l'ensemble du canton, cependant la généralisation des valeurs d'erreur obtenues avec les placettes de calibration à

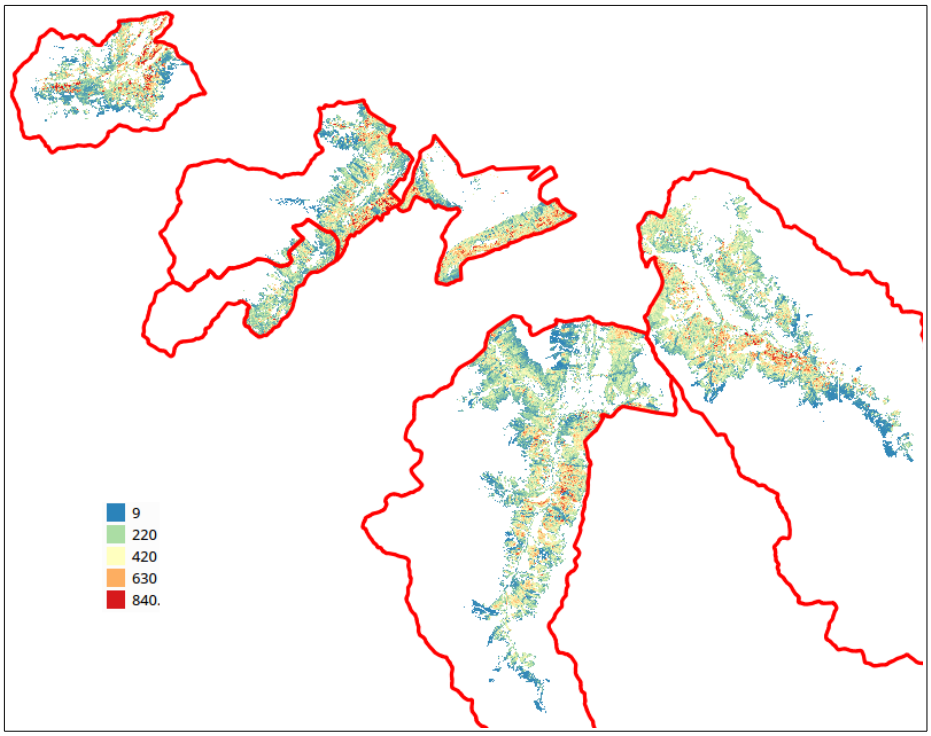
l'ensemble du Bas-Valais ou aux six communes doit être faite avec précaution dans la mesure où ces placettes ne sont pas en toute rigueur représentatives des forêts de l'ensemble du canton ou des six communes en particulier, car :

- certaines placettes ont été exclues sur la base d'incohérences avec le nuage LiDAR ;
- certaines placettes avaient des valeurs manquantes ou non positives pour les paramètres forestiers ;
- le domaine spatial n'est pas le même.

Des valeurs anormalement élevées ou basses peuvent se trouver dans la carte finale. Par exemple certains points LiDAR peuvent avoir une hauteur très importante à cause de leur position en bordure de falaise, sur des lignes à haute tension ou remontées mécaniques, ou tout simplement du fait d'artefacts lors de l'acquisition. Les aberrations de hauteur peuvent se propager dans les métriques LiDAR puis dans les résultats d'estimation par les modèles. Afin d'en minimiser la portée, deux opérations sont réalisées sur la cartographie ;

- seuillage des estimations obtenues pour qu'elles ne dépassent pas de la gamme [0, maximum de la valeur observée sur le terrain] ;
- suppression des valeurs situées hors d'un masque « forêt » qui délimite la zone de validité du modèle, on utilise ici l'emprise des forêts selon la carte des associations forestières (nouvelle version).

> Carte du volume sur pied (m^3/ha) sur les six communes du projet



Les cartes de volume sur pied sur les communes de Bagnes (commune du projet) et Nendaz, Isérables et Veysonnaz (communes limitrophes) ont été présentées aux gardes forestiers pour comparaison avec leur expérience de terrain, lors d'une réunion le 26 mars 2015. Il s'avère que les variations de volume constatées sur le terrain sont bien retranscrites sur la carte, même si localement les valeurs de volume peuvent sembler erronées. C'était par exemple le cas sur des plantations de sapin en fond de vallée, peuplements assez atypiques où le modèle estimait des volumes trop importants.

4.3. Cartographie de l'accessibilité

Le tableau suivant présente les résultats d'accessibilité pour les trois modes de débardage testés, pour la surface forestière des six communes. L'étude se base sur 13 479 ha de forêt, dont 2 618 ha sont non bûcheronnables pour cause de pente supérieure à 110 %. Les surfaces présentées sont calculées indépendamment pour chaque mode de débardage.

	Tracteur		Grand câble-grue mobile		Câble-grue conventionnel	
	Surface (ha)	%	Surface (ha)	%	Surface (ha)	%
Total surface atteignable	3 309	25	5 021	37	5 139	38
Total surface non atteignable	10 169	75	8 458	63	8 340	62

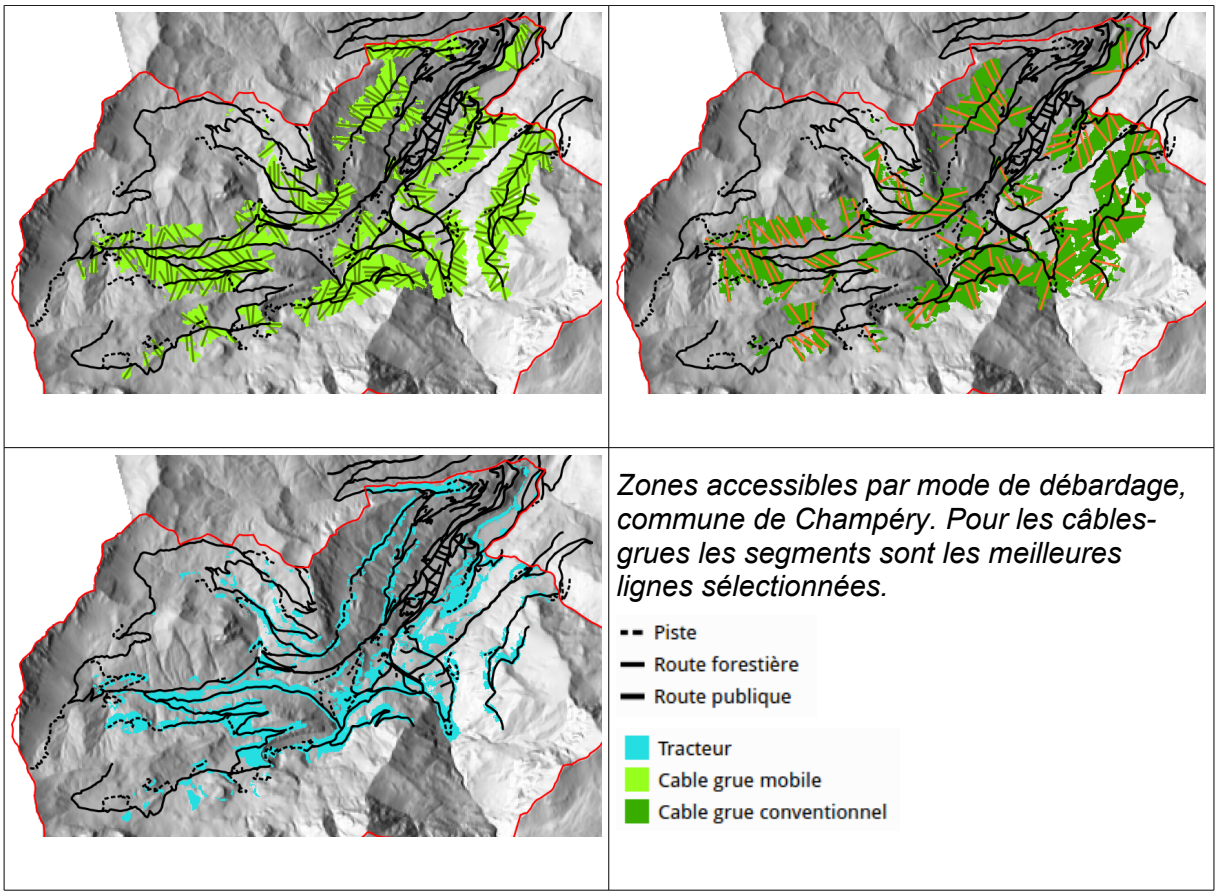
Surfaces accessibles selon la distance totale de débardage pour le tracteur (ha)

0 – 250 m	2 400	18
250 – 500 m	452	3
500 – 1 000 m	289	2
1 000 – 1 500 m	93	1
> 1 500 m	75	0

Détail du débardage par câble

Bilan de la sélection des meilleures lignes	Nombre de lignes sélectionnées	2 268	951
	Dont débardage vers l'aval	60 %	63 %
	Surface traitée (ha)	3 290	2 646

La figure suivante illustre les résultats de la modélisation de l'accessibilité sur la commune de Champéry.



Zones accessibles par mode de débardage, commune de Champéry. Pour les câbles-grues les segments sont les meilleures lignes sélectionnées.

4.4. Cartographie de la ressource bois-énergie mobilisable

4.4.1. Le cas des forêts non couvertes par le vol LiDAR ou non bûcheronnables

On considère la zone où des estimations de volume sont disponibles, ce qui correspond au Bas-Valais moins une petite partie au nord. L'emprise retenue pour les forêts est la nouvelle carte des associations forestières. Le critère retenu pour la possibilité de bûcheronner une forêt est que la pente est inférieure à 110 %. Celle-ci est calculée sur le modèle swissALTI3D, rééchantillonné à 5 m. Ceci permet de distinguer les forêts « bûcheronnables » » des « non-bûcheronnables ». Par ailleurs, le survol LiDAR ne couvre que partiellement les zones d'altitude supérieure à 2000 m. Il y a donc des forêts « LiDAR » et « non-LiDAR ». La répartition croisant ces différentes catégories est la suivante :

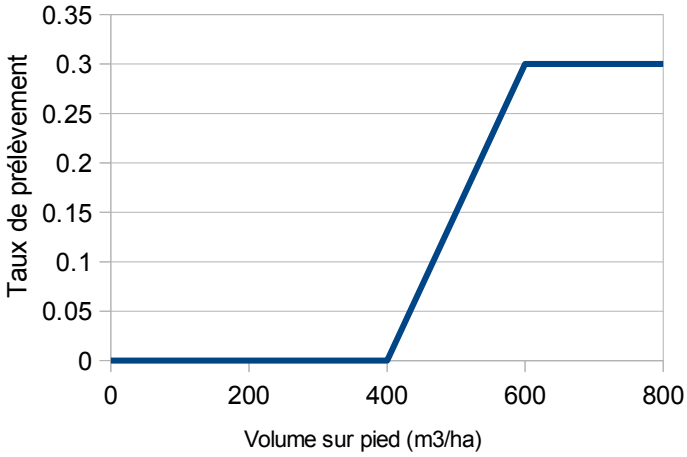
- LiDAR / bûcheronnable : 89.1 %
- LiDAR / non bûcheronnable : 10.2 %
- non LiDAR / bûcheronnable : 0.6 %
- non LiDAR / non bûcheronnable : 0.1 %

Les forêts non-couvertes par le vol représentent donc 0.7 % des forêts en surface, et il est probable qu'elles représentent une proportion plus faible encore en volume, les peuplements d'altitude supérieure à 2000 m étant en général des forêts ouvertes, peu capitalisées. Dans la suite de l'analyse, on négligera donc ces forêts de haute altitude. Le volume moyen dans les zones bûcheronnables est de 305 m^3/ha contre 265 dans les zones non bûcheronnables. Le volume est situé à 90.9 % dans les zones bûcheronnables, qui représentent 89.6 % de la surface.

4.4.2. Calcul des volumes exploités

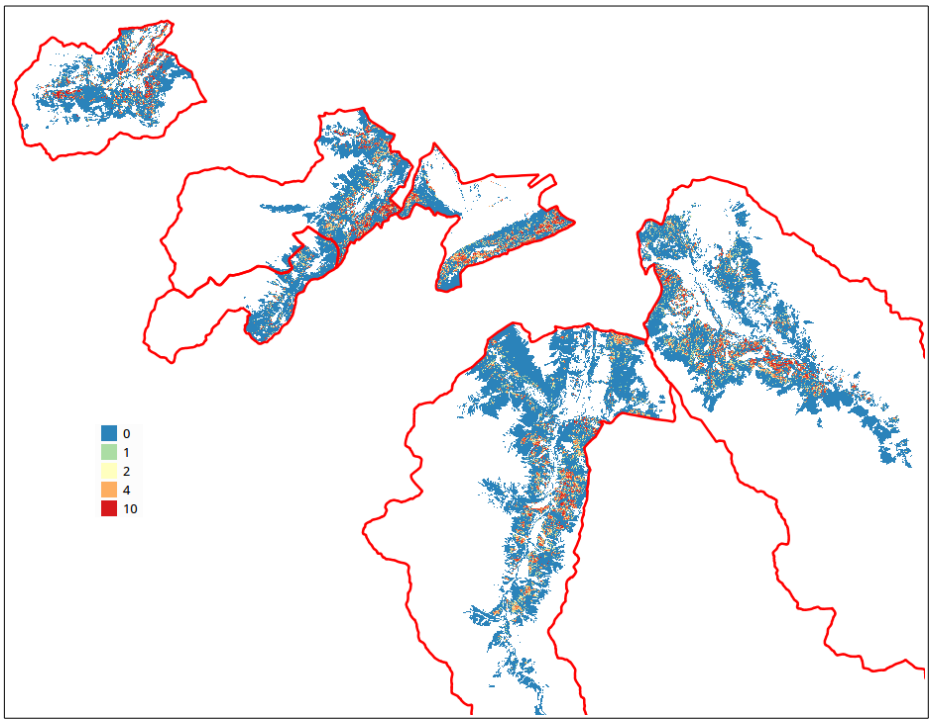
Pour le taux de prélèvement par intervention, on se place dans le cas d'une rotation sylvicole de 25 ans. Le taux de prélèvement par rotation est défini en fonction du volume sur pied, par les règles suivantes :

- pas de prélèvement pour un volume inférieur à 400 m^3/ha ;
- taux de prélèvement de 0.0015 x (Volume - 400) pour les volumes compris entre 400 et 600 m^3/ha.
- taux de prélèvement de 0.3 pour les volumes au-dessus de 600 m^3/ha.



La conversion en volume prélevé par pixel est effectuée en multipliant par 20x20/1000, qui est le rapport de la surface d'une pixel de résolution 20 m avec la surface d'un hectare. La conversion en volume moyen prélevé annuellement par pixel est obtenue en divisant par la durée de la rotation (25 ans).

> Carte des volumes récoltables (m^3/ha/an)



Cette règle conduit à un volume exploitable de 44 660 m^3/an en moyenne pendant la rotation, ainsi qu'à un prélèvement moyen de 106 m^3/ha par rotation pour les surfaces exploitées.

D'après les statistiques cantonales, le volume annuellement exploité sur le Bas-Valais est de l'ordre de 42 000 m^3 [24], mais il a été soumis à de fortes variations ces dernières années suites aux événements climatiques. Si l'on applique un ratio pour tenir compte de la portion nord non couverte par les volumes LiDAR, on devrait obtenir pour notre zone un volume d'environ 40 400 m^3. La règle proposée est cohérente avec cette valeur, à 10 % près, ainsi

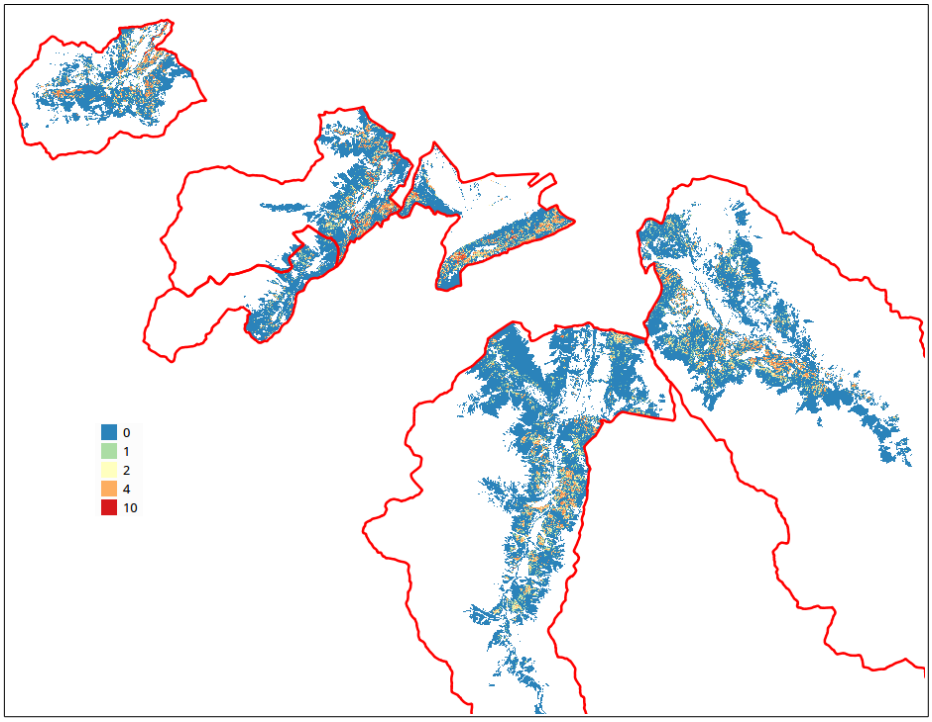
qu'avec la valeur moyenne de l'intensité d'intervention, qui est de 115 m^3/ha pour le Bas-Valais entre 2008 et 2011 [24] .

Le taux de prélèvement dépend uniquement du volume sur pied. La règle n'est donc pas spatialisée, mais les résultats à l'échelle du massif sont mis en cohérence avec les statistiques globales des dernières années pour le Bas-Valais. Cette vérification ne pouvait se faire par commune en l'absence de statistiques à cette échelle. Par contre, on se restreindra pour la suite de l'analyse aux forêts des communes du projet. Le volume exploité annuel moyen est de 10 950 m^3/an pour les six communes.

4.4.3. Calcul de la ressource bois-énergie

Pour le calcul de la ressource en bois énergie, on considère que 34.17 % du volume exploité est exporté comme bois énergie (moyenne 2010-2011 pour le Valais [24]), ce qui donne un volume de bois énergie de 3 740 m^3/an. Le volume calculé sur les placettes IFN, qui sert de référence, est le volume tige sur écorce. On applique ensuite un coefficient de conversion du volume en m^3 sur écorce en tonne sèche sous écorce. Celui-ci est de 0.5 pour les bois durs, et de 0.3 pour les bois tendres [25].

> Carte de la ressource en énergie bois (MWh/ha/an)



Pour la répartition bois durs ou tendres, on se base sur l'essence majoritaire renseignée dans l'ancienne carte des associations forestières, en considérant comme bois durs : aubépine, chêne, charme, érable, frêne et hêtre, et comme bois tendres tous les autres. Sur les six communes, 93 % des surfaces forestières sont des peuplements dont l'essence majoritaire est à bois tendre. La quantité annuelle moyenne de bois énergie exportée est de 1 180 tonnes sèches par an. La conversion de la tonne sèche sous écorce en énergie est ensuite réalisée en comptant un pouvoir calorifique supérieur de 5.5 MWh/tonne sèche (source CREM), ce qui donne une quantité d'énergie mobilisable de 6 495 MWh/an en moyenne sur la rotation, pour les six communes.

4.5. Cartographie du coût de mobilisation

4.5.1. Introduction

L'objectif de cette étape est d'estimer le coût de mobilisation du bois, depuis l'arbre sur pied en forêt au bois bord de route prêt à être chargé sur un camion forestier. Les coûts comprennent donc le bûcheronnage et le débardage jusqu'à la pile de bois, bord de route.

4.5.2. Calcul du volume de l'arbre moyen

Les coûts de bûcheronnage et de débardage sont fortement influencés par la taille des arbres à abattre et des tiges à débarder. Le bûcheronnage considère plutôt le diamètre des arbres, alors que pour le débardage c'est le volume de la tige. Ce paramètre n'est pas estimé directement, mais il peut être obtenu en divisant le volume total par la densité, ou en appliquant un tarif de cubage pour calculer le volume à partir du diamètre. Dans les deux cas, le résultat obtenu est approximatif, car la densité de tiges obtenue par LiDAR n'est pas très fiable, alors que le diamètre moyen est mieux estimé, mais les tarifs de cubage doivent être choisis de manière appropriée, ce qui est difficile quand on ne connaît ni la structure du peuplement, ni l'essence, ni la productivité.

Il a été choisi cependant d'utiliser cette dernière solution. Le volume de l'arbre moyen est calculé en appliquant au diamètre moyen estimé par LiDAR un tarif Algan de facteur 10 pour le sapin, le mélèze et l'épicéa, et de facteur 8 pour les autres essences. L'essence est déterminée en retenant l'essence majoritaire indiquée dans l'ancienne version de la carte des associations forestières. La formule approchée du tarif Algan pour le calcul du volume unitaire *v* en m^3 à partir du diamètre *d* en cm est :

$$v=\frac{8+f}{28}\times\left\{0.312384-4.51338\times\frac{d}{100}+23.886\times\left(\frac{d}{100}\right)^2-2.89769\times\left(\frac{d}{100}\right)^3\right\}$$

avec f le facteur Algan.

4.5.3. Calcul du coût de bûcheronnage

Le calcul du coût de bûcheronnage est basé sur la grille tarifaire utilisé dans le Bas-Valais, onglet 413.2 [5]. On retient pour le bûcheronnage les montants correspondants à des bois évacués (pos 10). Le coût de base est 40 Fr/m^3 pour des arbres de diamètre supérieur à 40cm. La majoration du coût est de 10 Fr/m^3 pour les arbres de 30 à 40 cm et de 20 Fr/m^3 pour les arbres de 20 à 30 cm. Pour le calcul par pixel on considère que tous les arbres ont un diamètre égal au diamètre de l'arbre moyen estimé par LiDAR.

Une majoration de 10 Fr/m^3 est appliquée si la pente du terrain est supérieure à 50%, le calcul étant réalisé à partir du modèle altimétrique swissALTI3D. En l'absence d'information disponible et pertinente sur ces aspects, aucune majoration n'est appliquée concernant l'exploitation dispersée, l'éloignement du chantier, la présence d'obstacles sur le chantier, la nécessité de nettoiement du peuplement ou d'écorçage des bois commercialisés.

Le coût moyen de bûcheronnage est de 53.9 Fr/m^3, pour les 11 770 m^3 exploités annuellement.

4.5.4. Calcul du coût de débardage

Le coût de débardage se base également sur la grille tarifaire (pos 11).

Tracteur forestier

Le coût de base pour le débardage par tracteur forestier est de 41 Fr/m^3, auquel s'ajoutent 7 Fr/m^3 si le treuillage est supérieur à 50 m et 5 Fr/m^3 si la distance de trainage est supérieure à 200 m. La distance de treuillage est une des sorties du modèle *Sylvaccess*. La distance de trainage totale est obtenue en additionnant la distance de trainage en forêt et la

distance de trainage sur piste retournées par le modèle. Une majoration de 5 Fr/m^3 est également ajoutée lorsque la tige moyenne a un volume inférieur à 0.6 m^3. Le volume de l'arbre moyen calculé précédemment (paragraphe 4.5.2) est utilisé. Aucune majoration n'est appliquée concernant les obstacles au sol.

Câble-grue mobile

Le coût de base pour le débardage par câble-grue mobile est de 69 Fr/m^3 . Une majoration de 10 Fr/ m^3 s'applique dans le cas où le rapport entre le volume total transporté et la longueur de la ligne, appelé indice de prélèvement câble (IPC) est inférieur à 1 m^3 /m, et une minoration de 10 Fr/m^3 quand ce rapport est supérieur à 2 m^3/m. L'IPC par ligne est calculé en divisant le volume récolté présent sur l'emprise de la ligne (30 m de part et d'autre de la position du câble) par la longueur total du câble. Le volume de l'arbre moyen par ligne est calculé en pondérant le volume de l'arbre moyen calculé précédemment (paragraphe 4.5.2) par le volume prélevé pour chaque pixel compris sous la ligne. Une majoration de 5 Fr/m^3 est appliquée quand la volume de la tige moyenne est inférieure à 0.3 m^3. Une majoration de 8 Fr/m^3 est appliquée lorsque le transport est réalisé vers l'aval.

Câble conventionnel

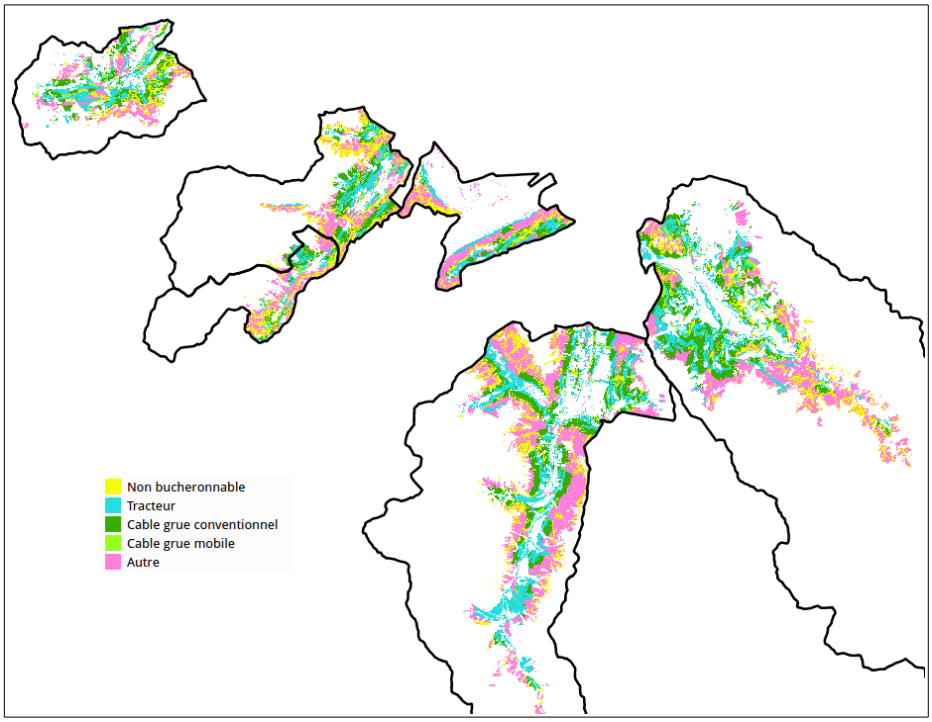
Le coût pour le câble conventionnel suit les mêmes critères que le câble-grue mobile, sauf que le coût de base est de 79 Fr/m^3 et qu'il n'y a pas de majoration pour le débardage vers l'aval.

4.5.5. Sélection du mode de débardage

La sélection du mode de débardage est effectuée de la manière suivante :

- par tracteur forestier dans les zones qui lui sont accessibles selon *Sylvaccess* ;
- par câble-grue conventionnel dans les zones non accessibles au tracteur mais accessibles au câble-grue conventionnel selon *Sylvaccess ;*
- par câble-grue mobile dans les zones qui lui sont accessibles mais qui ne le sont pas aux deux modes de débardage précédents.

> Carte des modes de débardage



Le coût de débardage est pour chaque pixel :

- celui calculé pour le tracteur forestier dans la zone qui lui est accessible ;
- pour le débardage par câble-grue, le coût affecté au pixel est le coût de la ligne sélectionnée qui le contient, si elle existe, sinon, le coût moyen de l'ensemble des lignes sélectionnées est affecté ;
- pour les zones bûcheronnables mais non accessibles par le tracteur ou l'un des câbles-grues, le débardage est probablement possible par hélicoptère, mais en l'absence de modèle pour ce mode de débardage, ces zones sont classées dans la catégorie « autre » et aucun coût ne leur est affecté.

Pour chaque type de câble-grue, le coût moyen est calculé en pondérant le coût pour chaque ligne sélectionnée par le volume total débardé. Le choix de calculer le coût sur la base des lignes sélectionnées plutôt qu'en réalisant la moyenne des lignes techniquement réalisables évite de prendre en compte des lignes possibles mais économiquement non pertinentes. Il serait intéressant cependant d'effectuer la sélection des lignes en prenant comme premier critère le coût, mais cela n'est pas encore implémenté dans *Sylvaccess*.

5. Bilan et perspectives

5.1. Comparaison avec la carte des modes de débardage

Le tableau suivant montre la correspondance entre les catégories existantes dans la carte des modes de débardage (source canton du Valais) et les résultats de la présente étude, en pourcentage de la surface totale.

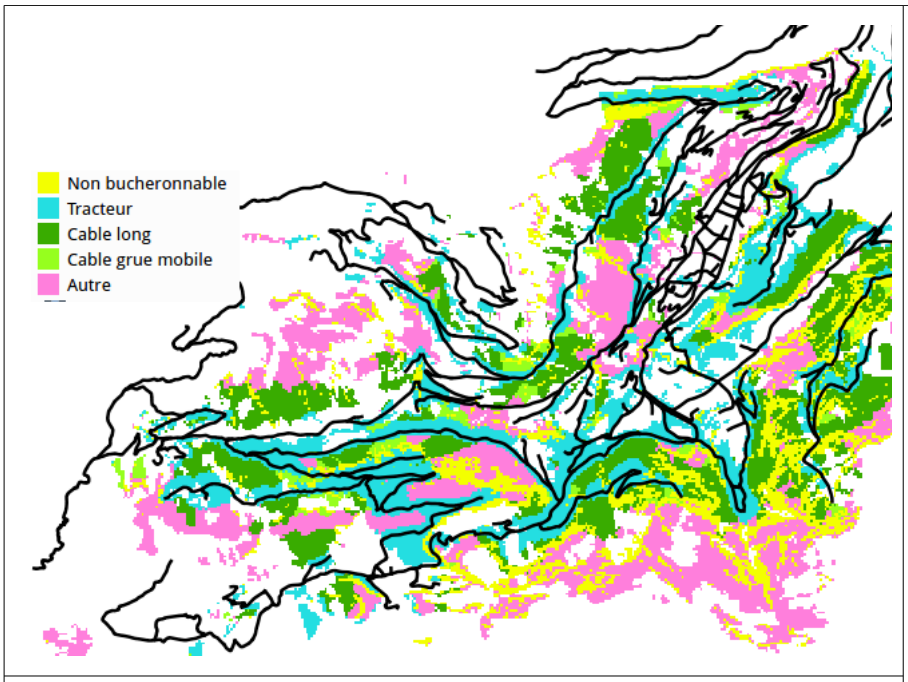
Canton du Valais	Sélection après modélisation *Sylvaccess*					
	Tracteur	**Câble-grue mobile**	**Câble-grue convention-nel**	**Autre**	**Non bûcheronnable**	**Total**
Tracteur	**1.6**	0.1	1.3	2.3	1.2	**6.5**
Câble-grue mobile	5.9	**0.5**	**4.7**	7	4.1	**22.2**
Câble-grue conventionnel	3.6	**0.2**	**3.5**	5	2.8	**15.2**
Hélicoptère	10.8	1.1	8.5	**17.8**	9.9	**48.1**
Non-débardé	1.8	0.1	1.8	2.7	**1.4**	**7.9**
Total	**23.7**	**2**	**19.9**	**35**	**19.4**	**100**

Si l'on considère les deux types de câble-grue comme une seule catégorie, on constate qu'il n'y a accord que pour 29.7 % de la surface (somme des termes diagonaux). Les résultats de cette étude donnent beaucoup plus de surface débardée par tracteur (23.7 % contre 6.5 %) ainsi que plus de surface non mobilisée (19.4 contre 7.9%). Ces surfaces se reportent dans les catégories câble-grue et hélicoptère pour la carte du canton du Valais.

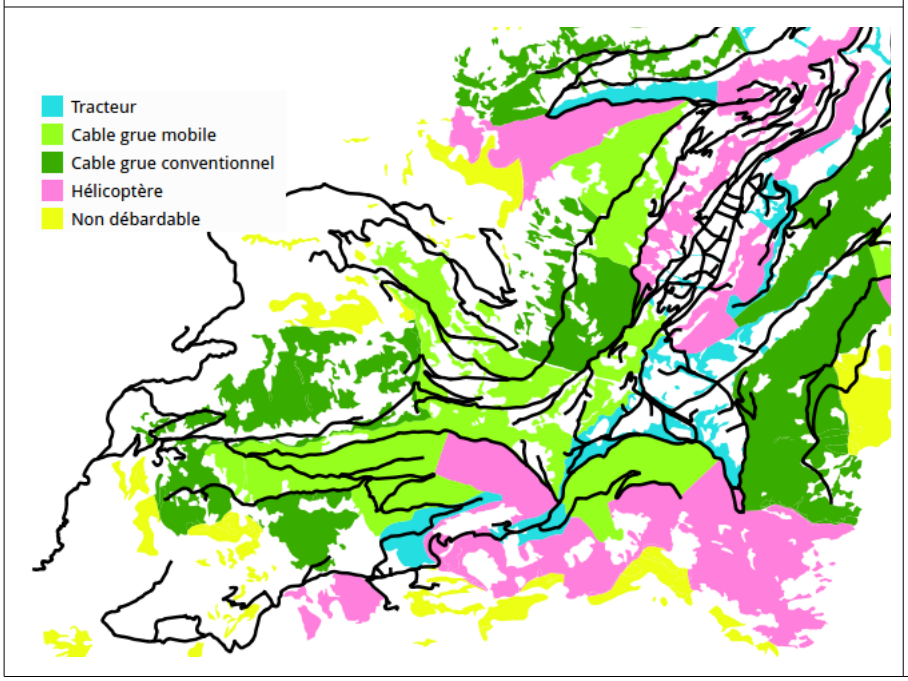
Ces différences s'expliquent par l'unité spatiale utilisée pour la classification. La carte du canton se base apparemment sur des unités de gestion d'assez grande surface. À chaque unité de gestion est affectée un seul mode de débardage. Seules les unités de petite taille située en bordure de route ou très bien quadrillées par la desserte sont donc affectées à la catégorie « tracteur », alors que dans notre cas tous les pixels de bord de route l'ont été.

Les unités de gestion comportant une forte distance entre la route et l'autre extrémité de l'unité sont plutôt affectées au câble-grue conventionnel, de part sa portée, alors que celles plus petites peuvent être laissées au câble-grue mobile. Si l'unité de gestion comporte une zone importante non accessible au câble du fait de la topographie ou de l'éloignement à la desserte, alors elle passe entièrement dans la catégorie « hélicoptère ». Enfin, il semble que les petites unités de gestion situées en haute altitude, dans des peuplements peu productifs et le plus souvent éloignés de la desserte soient celles qui sont jugées « non débardables ». Dans notre cas, le câble-grue conventionnel a été choisi en priorité, il y a probablement des cas de lignes de faible portée où il pourrait être avantageusement remplacé par le câble-grue mobile. Celui-ci se cantonne donc à des zones de très faible portée qui ont été interdites au câble-grue conventionnel (longueur de ligne minimale de 300 m).

Il est donc probable que la réalité se situe quelque part en ces deux visions qui pêchent l'une par un manque de finesse spatiale et l'autre par un manque de recul sur les synergies entre les modes de débardage sur l'ensemble d'un versant.



< Cartographie des modes de débardage sur la commune de Champéry (sélection à partir des résultats de modélisation Sylvaccess)



< Cartographie des modes de débardage sur la commune de Champéry (canton du Valais)

5.2. Coût et quantité par mode de débardage

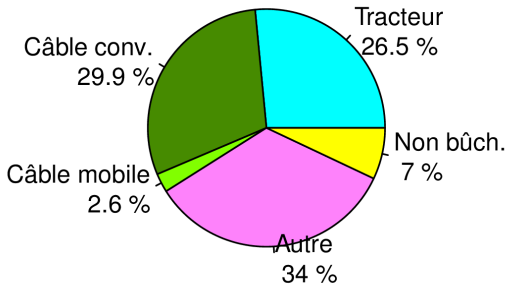
Le coût total de mobilisation jusqu'à la route forestière est calculé en ajoutant le coût du bûcheronnage et celui du débardage.

Le tableau suivant récapitule les surfaces et volumes concernés après sélection des différents modes de débardage. Les surfaces sont légèrement différentes de celles mentionnées au paragraphe 4.3 du fait de l'approximation par le calcul au format raster.

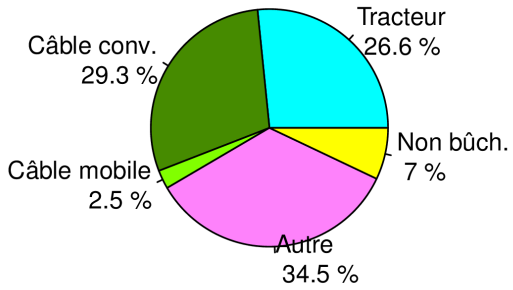
	Tracteur Forestier	Câble-grue conventionnel	Câble-grue mobile	Autre	Total bûcheron-nable	Non bûcheron-nable
Surface (ha)	3 122	2 610	262	4 595	**10 588**	**2 545**
Récolte (m^3/an) ***dont bois énergie***	3 123 *1067*	3 515 *1201*	303 *103*	4 007 *1369*	**10 947** ***3740***	**825** ***282***
Coût moyen Fr/m^3	97	143	137	-	**122 (sauf Autre)**	**-**
Récolte bois-énergie (MWh/an)	1 859	2 046	178	2 412	**6 495**	**492**
Coût moyen bois énergie Fr/MWh	55.7	83.9	79.3	-	**70.3 (sauf Autre)**	**-**

Les graphiques à secteur ci-dessous illustrent la répartition des volumes récoltés et de l'énergie disponible par mode de débardage. La répartition est très similaire ce qui suggère que la répartition bois durs / tendres est peu corrélée avec le mode de débardage.

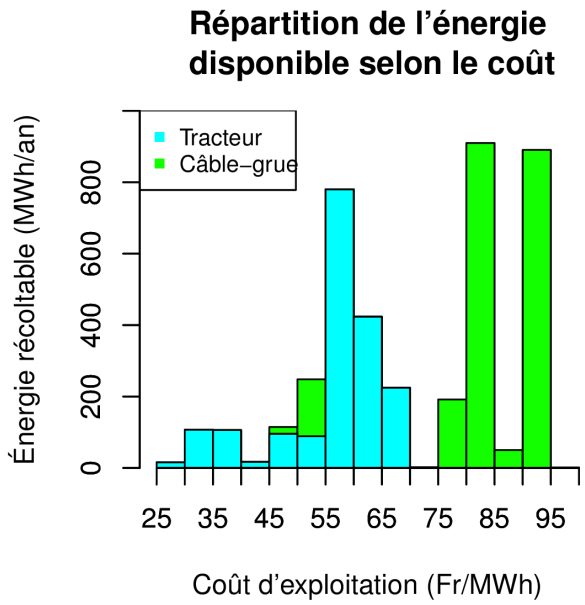
Répartition de la récolte annuelle



Répartition de l'énergie mobilisable



L'histogramme ci-après montre la distribution de la ressource énergie selon le coût de mobilisation, pour le tracteur et les deux types de câble-grue.



5.3. (Quelques-unes des) limites de la méthodologie

5.3.1. Ressource

L'estimation du volume reste entachée d'une importante erreur au niveau local, mais avec un niveau faible à l'échelle agrégée. L'utilisation du diamètre moyen pour calculer le volume moyen de la tige est probablement un source importante d'erreur, ainsi que l'utilisation d'une carte des essences majoritaires pour déterminer le caractère « dur » ou « tendre » du bois. L'absence d'information plus précise sur les peuplements rend impossible l'estimation spatialisée de la part affectée aux différents produits bois (service, énergie, industrie).

5.3.2. Mode de débardage et coût

L'inconvénient de sélectionner au préalable le tracteur est que cela conduit :

- soit à sous-estimer le coût des lignes de câble-grue car celles-ci sont sélectionnées à partir d'une carte de prélèvement où les volumes débardés par le tracteur, donc majoritairement en bord de route ou piste forestière, sont encore présents ;
- soit à sous-estimer la proportion débardée par câble-grue car si une ligne est prévue à partir d'une route forestière, il serait contre-productif pour le câble-grue de faire débarder les abords de la route par un tracteur.

Une meilleure prise en compte de cette concurrence tracteur / câble-grue nécessiterait de réaliser une procédure d'optimisation qui sélectionne les lignes en fonction de la possibilité par ailleurs que le tracteur débarde autour de la desserte, mais cela nécessite une formalisation complexe et sera probablement assez coûteux en temps de calcul. De la même manière, certaines lignes de câble-grue conventionnel pourraient être avantageusement remplacées par des lignes de câble-grue mobile du point de vue du coût, avec le risque que certains peuplements situés loin de la desserte ne soient pas exploités. En privilégiant le débardage par câble-grue conventionnel, on privilégie la surface traitée plutôt que le coût. Le choix entre les deux types de câble-grue est également un aspect difficile à traiter, d'autant plus qu'en pratique le critère de la taille des bois à débarder va jouer un rôle important dans le choix du type de câble, le câble conventionnel étant préféré pour les tiges de fort diamètre.

Sylvaccess ne comprend actuellement pas de module pour le débardage par hélicoptère. Si l'on se base sur les critères importants du point de vue du coût [24], l'implémentation ne devrait pas être techniquement difficile, mais le calcul nécessite une autre donnée d'entrée qui est la position des points de larguage.

Enfin, le calcul du coût du bois énergie est effectué en considérant que le coût d'exploitation du bois énergie par rapport au volume total est réparti au prorata des volumes. Dans les faits, l'établissement du prix de vente sur le marché aboutit à des valeurs différentes car il résulte d'un ajustement complexe entre l'offre et la demande de plusieurs produits (bois de service, d'industrie et de feu). De plus, pour avoir le prix de l'énergie rendu au consommateur, il faudra ajouter les coûts de transport, de stockage et de conditionnement.

5.4. Conclusion et perspectives

La méthodologie détaillée précédemment montre que les récentes avancées en terme de télédétection et de modélisation par SIG permettent de spatialiser avec une résolution spatiale très fine certaines informations concernant la ressource sur pied et les conditions techniques de mobilisation. Il a ainsi été possible, à partir de données publiques existantes, de cartographier les volumes sur pied ainsi que les possibilités techniques des principaux modes de débardage, informations déjà valorisables pour les gestionnaires forestiers.

Cependant certaines données (essences et structure du peuplement forestier) et processus (sylviculture et multi-fonctionnalité des forêts) nécessitent encore un important travail de recherche avant qu'une réelle modélisation spatialisée des opérations de gestion soit possible. Concernant la sylviculture, le type d'intervention dépendra des essences, de la structure du peuplement et des objectifs assignés à la forêt. Ces informations sont encore difficiles à obtenir à résolution fine. Concernant les conditions techniques de débardage, la modélisation donne des informations précises, mais qu'il est difficile de valoriser car les grilles tarifaires sont soit très générales (comme celle utilisée ici), soit trop détaillées (CalCouFor). Il serait donc nécessaire de les adapter ou de construire des fonctions de coût qui permettent de tirer parti de toutes les sorties de la modélisation.

Pour le choix du mode de débardage il n'est pas possible de considérer de manière indépendante les pixels résultants de l'analyse à résolution fine. Si pour le tracteur forestier, le coût de mobilisation pour une tige donnée dépend uniquement de la position de cette tige, le coût par câble-grue dépend également de l'emplacement de la ligne choisie. Cela suppose donc d'adopter des approches d'optimisation qui pourront donner des résultats différents selon les critères à maximiser (volume total, surface de forêt traitée) ou à minimiser (coût moyen). Afin d'être au plus proche de la réalité, il faudrait également essayer de prendre en compte dans cette optimisation les critères organisationnels et sylvicoles.

Dans cette étude, tout le volume prélevé est supposé exploité à t=0. En fait les exploitations sont réparties sur la durée de la rotation, et les peuplements exploités plus tard ont le temps de prendre encore du volume. L'ajout de cette dimension temporelle nécessiterait de connaître l'accroissement et compliquerait considérablement l'optimisation si il faut raisonner à la fois en terme spatial et temporel.

La poursuite de la recherche sur ces aspects permettra d'améliorer la compréhension des processus aboutissant aux décisions de gestion ainsi que de fournir des cartes de ressource et d'accessibilité plus proches de la réalité qui bénéficieront à la prise de décision sur le plan opérationnel et de la planification.

Références

[1] *Interreg Alpine Space Project NEWFOR*, www.newfor.net

[2] Dupire, S. (2015). *Sylvaccess source code and binaries*, https://sourcesup.renater.fr/projects/sylvaccess

[3] Dupire, S.; Bourrier, F.; Monnet, J.-M. and Berger, F. (soumis). *Sylvaccess: un modèle pour cartographier automatiquement l'accessibilité des forêts*, Revue Forestière Française.

[4] Forêt Valais (2014). *CalCouFor*, http://www.foretvalais.ch/fr/gestion-forestiere/publications

[5] Canton du Valais (2014). *Grille tarifaire "Dégâts aux forêts"*.

[6] Baltsavias, E. P. (1999). *Airborne laser scanning: basic relations and formulas*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54 : 199-214.

[7] Næsset, E. (2002). *Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data*, Remote Sensing of Environment 80 : 88-99.

[8] Junttila, V.; Finley, A. O.; Bradford, J. B. and Kauranne, T. (2013). *Strategies for minimizing sample size for use in airborne LiDAR-based forest inventory*, Forest Ecology and Management 292 : 75-85.

[9] Strunk, J.; Temesgen, H.; Andersen, H. E.; Flewelling, J. P. and Madsen, L. (2012). *Effects of lidar pulse density and sample size on a model-assisted approach to estimate forest inventory variables*, Canadian Journal of Remote Sensing 38 : 644-654.

[10] Hyyppä, J.; Yu, X.; Hyyppä, H.; Vastaranta, M.; Holopainen, M.; Kukko, A.; Kaartinen, H.; Jaakkola, A.; Vaaja, M.; Koskinen, J. and Alho, P. (2012). *Advances in forest inventory using airborne laser scanning*, Remote Sensing 4 : 1190-1207.

[11] Hamid, J. A.; Mather, P. M. and Hill, R. A. (2004). *Mapping of conifer forest plantations using airborne hyperspectral and Lidar data*, Remote Sensing in Transition : 185-190.

[12] Hudak, A. T.; Crookston, N. L.; Evans, J. S.; Falkowski, M. J.; Smith, A. M. S.; Gessler, P. E. and Morgan, P. (2006). *Regression modeling and mapping of coniferous forest basal area and tree density from discrete-return lidar and multispectral satellite data*, Canadian Journal of Remote Sensing 32 : 126-138.

[13] Packalén, P. and Maltamo, M. (2007). *The k-MSN method for the prediction of species-specific stand attributes using airborne laser scanning and aerial photographs*, Remote Sensing of Environment 109 : 328-341.

[14] Niska, H.; Skön, J. P.; Packalén, P.; Tokola, T.; Maltamo, M. and Kolehmainen, M. (2010). *Neural Networks for the Prediction of Species-Specific Plot Volumes Using Airborne Laser Scanning and Aerial Photographs*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 48 : 1076-1085.

[15] Monnet, J.-M. and Munoz, A. (soumis). *Comparaison de méthodes de spatialisation pour l'agrégation par parcelle des estimations de paramètres forestiers par LiDAR aéroporté*, Revue Française de Photogrammétrie et Télédétection .

[16] Breidenbach, J. and Astrup, R. (2012). *Small area estimation of forest attributes in the Norwegian National Forest Inventory*, European Journal of Forest Research 131 : 1255-1267-.

[17] Magnussen, S.; Mandallaz, D.; Breidenbach, J.; Lanz, A. and Ginzler, C. (2014). *National forest inventories in the service of small area estimation of stem volume*, Can. J. For. Res. 44 : 1079-1090.

[18] Hyyppä, J. (2000). *Feasibility for estimation of single tree characteristics using laser scanner*, 3 : 981-983.

[19] Popescu, S. C.; Wynne, R. H. and Nelson, R. F. (2002). *Estimating plot-level tree heights with lidar: local filtering with a canopy-height based variable window size*, Computers and Electronics in Agriculture 37 : 71-95.

[20] Keller, M. 2005. *Schweizerisches Landesforstinventar. Anleitung für die Feldaufnahmen der Erhebung 2004–2007*.

[21] Gobakken, T. and Næsset, E. (2009). *Assessing effects of positioning errors and sample plot size on biophysical stand properties derived from airborne laser scanner data*, Canadian Journal of Forest Research 39 : 1036-1052.

[22] Monnet, J.-M. and Mermin, É. (2014). *Cross-Correlation of Diameter Measures for the Co-Registration of Forest Inventory Plots with Airborne Laser Scanning Data*, Forests 5 : 2307-2326.

[23] McGaughey, R. J. (2014). *FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization - Fusion version 3.42*.

[24] Canton du Valais (2014). *Résumé des décomptes des travaux subventionnés en forêt protectrices pour les périodes « RPT-1 » (2008-2011) et le début de la période « RPT-2 » (la période 2012-2015, analyse sur 2012 et 2013)*.

[25] FCBA (2014). *Mémento 2014*, http://fcba.fr/sites/default/files/files/memento2014.pdf

Annexe : Conditions pour la mise œuvre d'une telle méthodologie en France

La mise en place d'une étude similaire en France n'est actuellement pas possible sans l'acquisition à cette fin d'une quantité importante de données.

Modélisation LiDAR

Pour la cartographie de la ressource forestière, il est nécessaire de disposer d'une couverture LiDAR de densité, même faible, ainsi que d'un réseau de placettes de terrain pour lesquelles la variable d'intérêt (par exemple le volume) est mesurée.

Il n'existe pas de couverture LiDAR nationale en France. Des acquisitions sur-mesure sont commandées au coup par coup par les collectivités pour des besoins spécifiques. Il faut toutefois mentionner que l'IGN, dans le cadre de la mise à jour de son modèle altimétrique, effectue actuellement des vols LiDAR à vocation topographique. Le cahier des charges d'acquisition est tout à fait compatible avec les besoins liés à la cartographie de la ressource, cependant dans leur processus de production il n'est actuellement pas prévu que les données brutes soient mises à disposition. Les vols LiDAR IGN sont programmés à l'échelle régionale, où il existerait une instance de concertation permettant aux collectivités locales d'influer sur les conditions d'acquisition (emprise, paramètres de vol, livrables). Certaines collectivités locales peuvent même avoir un rôle moteur dans la mise en place d'un projet LiDAR. Ainsi en Auvergne, deux départements ont été couverts par des vols basse densité destinés à l'élaboration d'un modèle altimétrique, et qui ont pu être utilisés a posteriori pour des études de ressource et accessibilité (cf Étude Irstea sur la ressource forestière en Auvergne[a])

Les placettes de terrain utilisées ici sont celles de l'Inventaire Forestier National. En France, des placettes similaires existent mais leur utilisation est plus difficile pour deux raisons. Tout d'abord leur densité est plus faible, pour en avoir un nombre suffisant pour la modélisation il faudra donc considérer des surfaces très étendues, de l'ordre du millier de km^2. Dans le cas de zones plus réduites, il sera nécessaire de réaliser des inventaires de terrain dédiés. L'utilisation de placettes existantes, comme celles réalisées habituellement dans le cadre des aménagements de l'Office National des Forêts ou lors des Plans d'Approvisionnement Territoriaux est problématique car elles se basent sur le principe de l'angle fixe et elles sont rarement géolocalisées précisément, il est donc difficile de les mettre en relation avec les données aériennes. Le deuxième obstacle à l'utilisation des placettes de l'IFN français est le secret statistique qui empêche de connaître leur position exacte, ce qui rend impossible leur utilisation avec des données aériennes. Ces informations ont cependant pu être utilisées pour une zone spécifique, dans le cadre du projet de recherche Foresee[b], ce qui a permis de montrer que ces placettes sont utilisables pour la modélisation. En l'absence de possibilité d'utilisation de placettes existantes il est nécessaire de réaliser des inventaires dédiés, sachant qu'il serait possible de trouver des synergies en adaptant les protocoles existants pour rendre les données compatibles avec une utilisation pour la modélisation LiDAR.

Modélisation de l'accessibilité

Pour la modélisation de l'accessibilité, il est nécessaire de disposer d'un modèle altimétrique de résolution inférieure ou égale à 5 m, notamment pour le câble-grue. Le modèle altimétrique de l'IGN (BD Alti®[c]) est actuellement disponible à 25 m, ce qui donne des

a http://www.newfor.net/wp-content/uploads/2015/05/Rapport_detude_Irstea_Auvergne.pdf
b http://www.fcba.fr/foresee/
c http://professionnels.ign.fr/bdalti

résultats moins précis. Si des données LiDAR sont disponibles, elles permettent normalement de calculer un modèle altimétrique de résolution suffisante pour la modélisation de l'accessibilité.

Il est nécessaire également de disposer de fichiers numériques précis sur le réseau de desserte forestière. L'IGN coordonne actuellement un projet de constitution d'une telle base de donnée[d], mais selon les projets déjà existants au niveau local la qualité de l'information numérisée est très variable. Il est donc souvent nécessaire de passer un temps important à mettre à jour ces fichiers par interprétation de photos aériennes et du modèle altimétrique.

Les informations numérisées sur la voirie publique et les obstacles aux modes de débardage peuvent par contre être extraites de la BD Topo®[e] et complétées par les informations disponibles au niveau local (remontées mécaniques, zones de captage d'eau, zones sensibles).

Modélisation bois énergie

Pour les étapes suivantes, il existe en France des informations d'un niveau similaire à celui de celles qui ont été utilisées en Suisse pour la modélisation du bois-énergie. L'information sur la structure des peuplements et les essence forestières existe par exemple dans la BD Forêt, v1 et v2 [f].

Conclusion

Le principal maillon manquant est donc celui de la donnée LiDAR et de l'information terrain associée. L'IGN mène actuellement des acquisitions pour ses besoins propres aussi il semble important de se rapprocher de cet organisme pour essayer de trouver des synergies. Le cas des placettes de terrain reste à discuter.

La possibilité de réaliser de telles études en France permettrait d'enrichir considérablement la donnée de base qui sert aux études telles que les Plans d'Approvisionnement Territoriaux. En effet ceux-ci sont des outils très intéressants d'analyse de la filière locale mais faute de données facilement disponibles ils se basent sur une cartographie de la ressource peu spatialisée et potentiellement différenciée entre les forêts publiques et privées. L'utilisation de données de télédétection permettrait d'avoir une vision unifiée avec un niveau de détail plus fin.

d http://www.ign.fr/webtv/evenements-professionnels/desserte-forestiere-vers-base-donnees-nationale
e http://professionnels.ign.fr/bdtopo
f http://professionnels.ign.fr/bdforet