



Prospective territoriale spatialisée (projet PROTEST)

Jean-Mathieu Monnet, Raphaël Aussénac, Aubéline Bellom, Thomas Carrette, Francis de Morogues, Sylvie Durrieu, Alain Munoz, Catherine Riond, Caroline Salomon, Arnaud Sergent, et al.

► To cite this version:

Jean-Mathieu Monnet, Raphaël Aussénac, Aubéline Bellom, Thomas Carrette, Francis de Morogues, et al.. Prospective territoriale spatialisée (projet PROTEST). ADEME. 2021. hal-03921988

HAL Id: hal-03921988

<https://hal.inrae.fr/hal-03921988v1>

Submitted on 4 Jan 2023

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.

PROSPECTIVE TERRITORIALE SPATIALISÉE (PROJET PROTEST)

Analyse forestière territoriale combinant
télédétection, simulation d'évolution
et démarche participative

RAPPORT FINAL

EXPERTISES 

Nov.
2021

CITATION DE CE RAPPORT

MONNET Jean-Matthieu, AUSSENAC Raphaël, BELLOM Aubéline, CARRETTE Thomas, DE MOROGUES Francis, DURRIEU Sylvie, MUÑOZ Alain, RIOND Catherine, SALOMON Caroline, SERGENT Arnaud, THIVOLLE-CAZAT Alain, VALLET Patrick. 2021. Prospective Territoriale Spatialisée (Projet PROTEST) : Analyse forestière territoriale combinant télédétection, simulation d'évolution et démarche participative. 51 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'oeuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 1703C0069

Étude réalisée par INRAE (Unités de Recherche LESSEM, ETBX et TETIS), l'Office National des Forêts (cellule Recherche, Développement et Innovation de Chambéry), l'Institut Technologique FCBA, le Parc naturel régional du Massif des Bauges et la Chambre Interdépartementale d'Agriculture Savoie-Mont Blanc pour ce projet financé par l'ADEME

Projet de recherche coordonné par : Jean-Matthieu Monnet (INRAE - LESSEM)

Appel à projet de recherche : GRAINE

Coordination technique - ADEME : BUITRAGO Miriam

Direction Bioéconomie et Energies Renouvelables / Service Forêt, Alimentation et Bioéconomie

SOMMAIRE

SOMMAIRE.....	3
1. INTRODUCTION	7
1.1. Contexte	7
1.2. Objectifs	7
1.3. Organisation du projet.....	7
2. CARTOGRAPHIE DES FORETS.....	9
2.1. Cartographie des peuplements	9
2.1.1. Relevés de terrain	9
2.1.2. Données LiDAR	11
2.1.3. Modélisation et cartographie.....	12
2.2. Cartographie de l'accessibilité.....	14
2.2.1. Paramétrage et données	14
2.2.2. Résultats	14
3. PROSPECTIVE TERRITORIALE	15
3.1. Diagnostic territorial	15
3.1.1. Contexte national et local.....	15
3.1.2. Travail bibliographique	15
3.1.3. Enquête auprès des acteurs du territoire	16
3.1.4. Résultats	16
3.2. Scénarios.....	17
3.2.1. Adaptation forcée (ADA)	17
3.2.2. Transition énergétique (TRE).....	17
3.2.3. Redynamisation forestière (DYN)	18
3.2.4. Patrimonialisation (PTR)	18
3.2.5. Sanctuarisation (SCT)	18
4. SIMULATIONS D'EVOLUTION FORESTIERE.....	19
4.1. Simulations d'évolution avec SIMMEM	19
4.2. Initialisation biophysique des peuplements	19
4.2.1. Découpage du territoire.....	20
4.2.2. Extraction des variables	20
4.2.3. Modélisation des variables	20
4.3. Initialisation de la gestion des peuplements	21
4.3.1. Extraction des variables.....	21
4.3.2. Gestion ou non gestion.....	22
4.3.3. Affectation des itinéraires sylvicoles.....	23
4.4. Résultats des simulations	24
4.4.1. Aperçu général	25
4.4.2. Services écosystémiques	27
4.4.3. Compromis entre services	32

5. VALORISATION	35
5.1. Valorisation des résultats sur le territoire	35
5.1.1. Communication autour du projet	35
5.1.2. Observatoire permanent.....	35
5.1.3. Cartographie de la ressource et de l'accessibilité	36
5.1.4. Démarche prospective	38
5.2. Valorisation des méthodes et outils	38
5.2.1. Disponibilité des données.....	38
5.2.2. Cartographie par télédétection LiDAR.....	39
5.2.3. Cartographie de l'accessibilité	40
5.2.4. Démarche prospective	41
5.2.5. Simulation d'évolution forestière à partir de données terrain et LiDAR	41
6. DISCUSSION ET PERSPECTIVES	42
6.1. Difficultés et valeur ajoutée du pluridisciplinaire	42
6.2. Réplicabilité de la méthodologie	42
6.3. Comparaison des scénarios	43
6.4. Perspectives	43
7. CONCLUSION	44
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	45
INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES.....	47
SIGLES ET ACRONYMES	48

RÉSUMÉ

La mobilisation accrue de biomasse est un enjeu important pour le développement des territoires et de la bioéconomie. Dans un contexte français marqué par l'hétérogénéité des forêts et le morcellement du parcellaire, l'identification des gisements de biomasse requiert une cartographie haute résolution des caractéristiques des forêts et des conditions de mobilisation. Pour assurer durablement le maintien des services écosystémiques fournis par les forêts, il est nécessaire de les évaluer sur des échelles de temps plus longues et de prendre en compte le contexte socio-économique local et global.

L'objectif du projet PROTEST est de combiner plusieurs avancées méthodologiques et techniques récentes dans une méthode d'analyse territoriale de la ressource forestière.

Une cartographie de la ressource forestière et de ses conditions de mobilisation est produite grâce à des données de télédétection LiDAR aéroporté, des relevés sur le terrain et des données sous système d'information géographique.

En parallèle, un travail de prospective territoriale est mené pour définir des scénarios de gestion forestière qui combinent déterminants forestiers, environnementaux et sociaux. Ces scénarios sont déclinés en règles sylvicoles qui simulent les comportements possibles des gestionnaires.

Ces règles sylvicoles sont intégrées dans un modèle d'évolution forestière spatialisé, afin de simuler sur 30 ans l'évolution de la mosaïque forestière initiale pour chaque scénario. Des fonctions de lien sont utilisées pour évaluer les services écosystémiques à partir de l'état des peuplements forestiers.

Le projet montre qu'au-delà de leurs apports individuels, l'intégration des différentes composantes dans cette démarche prospective spatialisée apporte une valeur ajoutée supplémentaire pour la préparation et la mise en œuvre d'une politique forestière territoriale qui soit à même de répondre aux enjeux locaux de multifonctionnalité, dans un contexte global de changement climatique.

Le projet met en outre l'accent sur la réplicabilité de la méthode, en privilégiant les données publiques, les outils libres, et en documentant le cas d'étude du Parc Naturel Régional du Massif des Bauges, en lien avec les acteurs du territoire.

ABSTRACT

Woody biomass mobilization is of upmost importance for the development of rural territories and bioeconomy. French forests are characterized by a high spatial heterogeneity and ownership fragmentation. The identification of biomass sources thus requires high-resolution mapping of forest characteristics and accessibility conditions. To sustain the ecosystem services provided by forests, it is necessary to assess the long-term impacts of mobilisation while taking into account the local and global socio-economic context.

The objective of project PROTEST is to combine recent innovations from different disciplines into a method for the territorial analysis of forest resource.

Forest resource and accessibility mapping are produced using airborne LiDAR remote sensing data, field surveys and geographic information systems.

Territorial prospective is implemented to define forest management scenarios that combine forest, environmental and societal determinants. These scenarios are translated into silvicultural systems which simulate the forest management possibilities.

These silvicultural systems are integrated into a spatialized forest evolution model, in order to simulate the 30-years evolution of the initial forest mosaic for each scenario. Linker functions are used to assess ecosystem services from forest stands characteristics.

The project demonstrates that the integration of components from different scientific fields into this spatialized prospective approach yields added value for the design and implementation of a territorial forest policy while tackling the local issues of multifunctionality, in a global context of climate change.

The project also emphasizes the replicability of the method, by making use of public data, free softwares, and by documenting the case study of the Regional Natural Park of the Massif des Bauges.

1. Introduction

1.1. Contexte

La mobilisation accrue de biomasse forestière a été réaffirmée dans le projet de Programme National de la Forêt et du Bois 2016-2026. En effet seulement 50% de la production biologique nette sont actuellement récoltés. Cependant, l'augmentation de la récolte pose plusieurs questions.

« **Où ?** » Les forêts françaises étant très hétérogènes, l'identification de gisements de biomasse requiert une cartographie à haute résolution des caractéristiques de la forêt.

« **Comment ?** » L'augmentation du volume sur pied est plus soutenue dans les zones difficiles d'accès [IGN, 2012]. La caractérisation des gisements doit donc intégrer les conditions techniques de mobilisation (topographie, desserte), mais aussi le contexte réglementaire (zones protégées).

« **Pour et par qui ?** » La faisabilité économique de l'exploitation doit ensuite être appréciée au regard du contexte socio-économique. La dynamique de gestion est notamment très variable selon le type de parcelle [Colin et Thivolle-Cazat, 2016], avec des interventions moins fréquentes dans les petites propriétés et dans les peuplements feuillus.

« **Pourquoi ?** » L'intensification de la récolte de bois pourrait se faire au détriment d'autres services écosystémiques rendus par la forêt. L'évaluation de ces impacts nécessite de se placer sur des échelles de temps plus longues et de prendre en compte le caractère durable de la gestion du point de vue de la filière bois locale mais aussi de la multifonctionnalité des forêts sur le territoire.

Les outils actuels de diagnostic territorial de la ressource forestière ne traitent que partiellement les questions évoquées précédemment du fait : 1/ d'une cartographie de la ressource et de ses conditions de mobilisation peu résolue spatialement, notamment dans les parcelles privées de petite taille, et 2/ d'une faible prise en compte de l'impact à long terme des changements sociétaux sur la filière locale.

1.2. Objectifs

Plusieurs avancées méthodologiques et scientifiques ont été réalisées ces dernières années dans le domaine de la biomasse forestière :

- cartographie forestière par modélisation issue de données de télédétection LiDAR, et modélisation technique de l'accessibilité des forêts par système d'information géographique,
- simulation d'évolution des peuplements forestiers,
- prospective territoriale appuyée sur des démarches participatives.

L'objectif du projet est d'articuler ces différents acquis pour construire une méthodologie d'analyse territoriale de la ressource forestière. La cartographie initiale permet de disposer d'une vision fidèle du territoire et sert de base à des simulations d'évolution des forêts sous différents scénarios de gestion. Ces scénarios, issus d'une démarche participative, sont en retour illustrés et quantifiés par ces simulations, ce qui nourrit les discussions et réflexions des acteurs en vue de la mise en place d'une politique forestière territoriale.

1.3. Organisation du projet

Le projet s'organise en quatre tâches principales (Figure 1).

La première tâche consiste en la production d'une **cartographie de la ressource forestière et de ses conditions de mobilisation**. Elle se base sur l'acquisition de données sur le terrain et par télédétection LiDAR aéroporté, utilisées ensuite pour réaliser des modèles de prédiction des paramètres forestiers et produire une cartographie haute résolution des forêts. En complément, le modèle Sylvaccess est utilisé pour la cartographie technique de l'**accessibilité**.

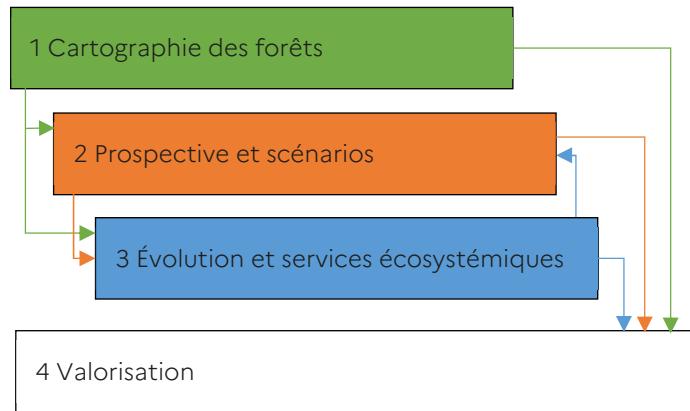


Figure 1 : organisation du projet

La seconde tâche vise à conduire un travail de **prospective territoriale** et à définir des **scénarios de gestion forestière** qui combinent déterminants forestiers, environnementaux et sociaux. Ces facteurs et leurs possibles évolutions sont définis sur la base d'enquêtes de terrain et d'avis d'experts. En fonction de ces facteurs et d'une typologie des parcelles, différents scénarios de gestion forestière (ensemble de règles sylvicoles) sont formalisés pour simuler les comportements possibles des gestionnaires.

Dans la troisième tâche, ces scénarios sont couplés avec un modèle d'évolution forestière spatialisé, afin de **simuler l'évolution de la mosaïque forestière** pour chaque scénario. Des fonctions de lien sont utilisées pour évaluer les services écosystémiques à partir de l'état des peuplements. Ces éléments serviront de support à des ateliers participatifs qui auront pour objectif de définir avec les acteurs un futur souhaité sur la zone d'étude et d'élaborer une stratégie de développement du territoire.

La quatrième tâche met l'accent sur le **transfert de la méthodologie et des résultats** à destination des acteurs de la filière et des territoires, via la rédaction de guides méthodologiques, la mise à disposition des outils et la réflexion sur les conditions de diffusion des résultats. Le territoire de test est le Parc Naturel Régional (PNR) du Massif des Bauges. Sa superficie forestière est de 51 136 hectares dont 57% de forêts privées. La forêt est un élément structurant du massif tant sur le plan économique (ressources) que naturel (habitats patrimoniaux, habitats d'espèces, trame verte) ou paysager. Les enjeux de mobilisation de la ressource sont importants, notamment dans des forêts privées caractérisées par un fort morcellement et une faible accessibilité. Ces caractéristiques en font un territoire idéal pour tester et valider l'intégration de ces différents outils et méthodes.

Les partenaires associés pour ce projet sont :

- INRAE (Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) via les unités de recherche LESSEM, ETBX et TETIS ;
- l'Office National des Forêts (ONF) via la cellule Recherche, Développement et Innovation de Chambéry ;
- l'Institut technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement (FCBA) ;
- le Parc Naturel Régional (PNR) du Massif des Bauges ;
- la Chambre Interdépartementale d'Agriculture Savoie Mont Blanc.

Ce document est le rapport final du projet. Par souci d'efficacité, le rapport est constitué de résumés pour chacune des tâches. Les livrables du projet donnent des éléments plus détaillés sur chacune des parties. Ils sont disponibles sur : <https://protest.inrae.fr/rapports/>

2. Cartographie des forêts

Cette première tâche vise à produire les cartographies des caractéristiques actuelles des peuplements forestiers. La dendrométrie des peuplements est obtenue par modélisation à partir de données de télédétection. Cette modélisation requiert des placettes de référence mesurées sur le terrain, ainsi que des données de télédétection LiDAR couvrant l'ensemble de la zone d'étude. Le projet a donc débuté par l'acquisition de ces données de terrain ainsi que par un complément d'acquisition de données LiDAR sur la partie haut-savoyarde du PNR, qui n'était pas couverte par un vol préalable. L'accessibilité des peuplements est obtenue grâce au modèle Sylvaccess. Les cartographies produites sont consultables sur le site <https://protest.inrae.fr/webgis/>. Elles peuvent être obtenues sur demande auprès du PNR, suite à un travail participatif sur les conditions de diffusion (paragraphe 5.1.3.1).

2.1. Cartographie des peuplements

2.1.1. Relevés de terrain

Les relevés de terrain doivent permettre 1) de décrire statistiquement la forêt dans une optique de suivi à long terme et 2) de servir de référence pour la calibration de modèles basés sur les données de télédétection. La préparation, la réalisation et les résultats des relevés de terrain sont présentés en détail dans le livrable 1.1 « Base de données de relevés forestiers » [Combaz-Deville et al., 2021].

2.1.1.1. Échantillonnage

Une grille d'échantillonnage systématique a été élaborée afin d'obtenir environ 400 placettes au total sur le PNR (180 dans le public, 220 dans le privé). Ce nombre est nécessaire d'une part pour réduire l'incertitude des estimations statistiques, et d'autre part pour s'assurer que l'hétérogénéité des peuplements est bien représentée dans le corpus d'apprentissage pour la modélisation LiDAR.

2.1.1.2. Protocole

Le protocole de mesure [ONF, 2018] pour chaque placette est basé sur le protocole qui a été mis en place sur l'ensemble des forêts publiques de Savoie, auquel des mesures de bois mort au sol ont été ajoutées. Les données prises sont :

- les données générales sur la placette (station forestière) et le relevé de la position pour pouvoir croiser avec les données de télédétection,
- l'inventaire (essence, diamètre) et la position des arbres de plus de 17,5 cm de diamètre dans un rayon de 15 m,
- l'inventaire des perches,
- l'inventaire de la régénération sur trois sous-placeaux de 2 m de rayon,
- le relevé des bois morts sur pied et au sol de plus de 30 cm.

Afin de minimiser l'effet des mesures sur les peuplements, dans une optique de suivi à long terme et de respect des propriétaires, aucune trace n'est laissée en forêt et sur les arbres, hormis :

- un fer à béton enfoncé dans le sol au centre de la placette, permettant de retrouver sa position lors de campagnes futures, l'objectif d'un observatoire permanent étant de caractériser la dynamique forestière d'un territoire via des mesures séparées de plusieurs années ;
- des marques temporaires à la craie sur les arbres permettant aux agents d'éviter les oubli et double-comptes.

2.1.1.3. Information des propriétaires

Afin que cette démarche d'inventaire soit transparente pour les propriétaires, les conditions d'accès aux placettes situées en forêt privée ont été définies par arrêté préfectoral [Préfecture de Haute-Savoie, 2018], suite à une concertation organisée avec les organismes représentant la forêt privée du territoire. L'accès n'est possible que si les propriétaires n'ont pas notifié leur refus après avoir été informés du projet par courrier individuel. Toutes les communes du territoire ont également été informées du projet par courrier [PNR du Massif des Bauges, 2018a]. L'envoi du courrier aux propriétaires des parcelles concernées par les placettes d'inventaire a été réalisé par le PNR [PNR du Massif des Bauges, 2018b], avec l'appui de la Chambre Interdépartementale d'Agriculture. Aucun lien n'est fait entre l'identité des propriétaires et les données collectées sur les placettes. Ce travail d'information pour 209 placettes s'est traduit par 411 courriers (286 propriétaires en propre ou indivision, et 125 en bien non délimité). Seuls 6 propriétaires ont exprimé leur souhait que leur parcelle ne fasse pas l'objet de mesures.

2.1.1.4. Réalisation

L'inventaire s'est déroulé de mai à octobre 2018. Les mesures ont été réalisées en forêt publique par Harri Evers, étudiant à l'ISETA en stage à INRAE, avec les agents de l'ONF. En forêt privée, les mesures ont été réalisées par Charly Feppon, étudiant à l'ISETA en stage à INRAE et Éric Mermin, technicien forestier à INRAE.

Les placettes se trouvant dans des zones de pente supérieure à 110 % d'après le modèle numérique de terrain du RGE Alti de l'IGN n'ont pas été visitées, et automatiquement classées « hors inventaire ». Certaines placettes se trouvaient dans des zones de pente inférieure à 110 % mais n'étaient pas possibles à rejoindre ou à réaliser (surface en eau). Elles ont été classées « hors inventaire ».

Mesuré	Non boisé	Hors inventaire	Refus	Total BD Forêt	Hors BD Forêt
Privé	177	2	16	6	201
Public	138	6	53	0	197
Total	315	8	69	6	398

Tableau 1 : nombre de placettes inventoriées

Le Tableau 1 récapitule par type de propriété les placettes inventoriées ou classées « hors inventaire » ou « non boisée » (absence d'arbres de diamètre supérieur à 17,5 cm). Les placettes publiques situées hors de la BD Forêt sont classées dans une catégorie à part. La Figure 2 montre les placettes réalisées ou non sur le territoire.

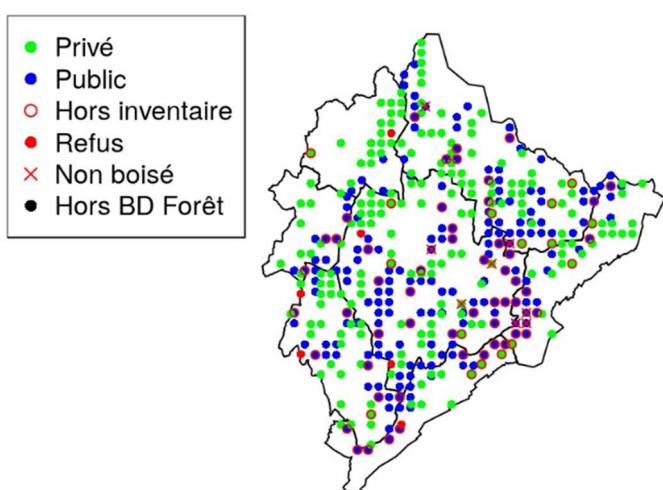


Figure 2 : placettes réalisées sur le terrain

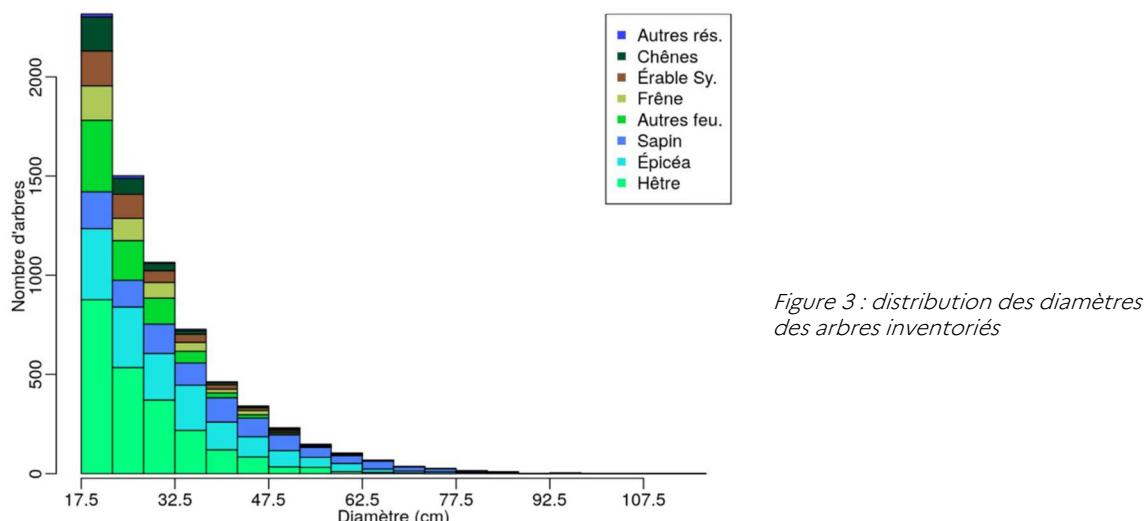
2.1.1.5. Base de données

La base de données des relevés de terrain se compose des fichiers suivants :

- *table_placette_v20190214.xlsx* : données sur les placettes, arbres et perches ;

- *dico_attribut.xlsx*: méta données sur la table précédente ;
- *perche.prive.csv*: fichier avec des informations additionnelles sur les perches en forêt privée ;
- *rege.prive.csv*: données sur la régénération en forêt privée ;
- *bois.mort.sol.prive.csv*: données sur le bois mort au sol en forêt privée ;
- *bois.mort.sol_rege.public.xlsx*: données sur le bois mort au sol et la régénération en forêt publique.

7057 arbres vivants de plus de 17,5 cm de diamètre ont été inventoriés. La distribution des diamètres est présentée dans la Figure 3.



2.1.2. Données LiDAR

Une acquisition de données LiDAR aéroporté a été réalisée sur l'emprise du PNR du Massif des Bauges (département 74), afin de compléter les données existantes sur le département 73.

2.1.2.1. Acquisition des données LiDAR

Les données ont été acquises sur appel d'offre par le PNR du Massif des Bauges. L'ONF a apporté un appui technique pour la rédaction du cahier des charges, la sélection du prestataire et la réception des données. Le cahier des charges et le rapport de réception des données sont consultables dans le livrable 1.2A « Acquisition de données LiDAR sur le PNR du Massif des Bauges (74) » [Munoz et Paccard, 2019]. Les données LiDAR sont disponibles sur demande auprès du PNR.

2.1.2.2. Données LiDAR utilisées

Deux sources de données LiDAR ont donc été utilisées (Figure 4).

« LiDAR Savoie zone B » Ces données, mises à disposition par la RGD 73-74 dans le cadre d'une convention avec l'ONF, couvrent une surface d'environ 53 600 ha. L'acquisition (vol) a été réalisée par l'IGN entre juin et septembre 2016 avec une densité d'émission moyenne de 4 points/m² (avec une répartition géographique hétérogène). Le traitement des données (classification, création des produits dérivés) a été réalisé par la société Sintégra.

« LiDAR zone PNR 74 » Ces données, financées par le PNR du Massif des Bauges dans le cadre du projet PROTEST afin de compléter les secteurs non couverts par les données « LiDAR Savoie zone B », couvrent une surface d'environ 37 350 ha. L'acquisition (vol) et le traitement des données ont été réalisés par la société Opsia en septembre 2018. La densité moyenne d'émission est de 13 points/m² (avec une répartition géographique hétérogène).

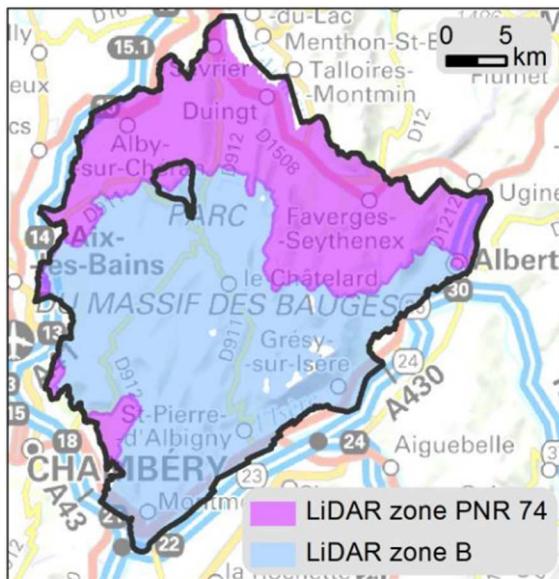


Figure 4 : données LiDAR

2.1.3. Modélisation et cartographie

La modélisation et la cartographie des peuplements, obtenues en couplant les relevés de terrain et les données de télédétection LiDAR, sont présentées en détail dans le livrable 1.2B « Cartographie de la ressource » [Munoz 2019]. Les étapes de la méthodologie sont présentées dans les paragraphes suivants.

2.1.3.1. Détection des individus

La détection des couronnes d'arbres a été réalisée à l'aide de l'outil Computree [Piboule et al., 2013] en utilisant la chaîne de traitement SEGMA mise au point par l'Université du Québec à Montréal. SEGMA permet de délimiter les enveloppes présumées des arbres à partir d'un modèle numérique de hauteur (MNH) LiDAR. Pour chaque individu détecté, on calcule ensuite des indicateurs permettant de les décrire : hauteur, surface et volume de couronne, forme du houppier.

2.1.3.2. Correspondance entre arbre terrain et détection LiDAR

Pour vérifier la correspondance entre la détection LiDAR et les arbres réels, les arbres relevés sur les placettes de l'inventaire terrain sont utilisés. Les placettes ont été positionnées sur le terrain à l'aide d'un récepteur GNSS Trimble, puis un recalage manuel a été effectué afin de faire correspondre le mieux possible la position des arbres terrain avec les couronnes des arbres visibles sur le MNH LiDAR. Les placettes posant un problème de positionnement (écart important par rapport au LiDAR) ou présentant un écart entre l'acquisition LiDAR et la mesure terrain (exploitation, chablis) ont été exclues des traitements. Au final, les placettes utilisées pour la calibration des modèles sont au nombre de :

- 177 placettes sur la zone « LiDAR Savoie zone B » (13 placettes exclues sur les 190 placettes boisées) ;
 - 121 placettes sur la zone « LiDAR zone PNR 74 » (12 placettes exclues sur les 133 placettes boisées)

Les données terrain ont été appariées avec les détections LiDAR : c'est-à-dire qu'on a fait correspondre chaque arbre terrain positionné avec sa détection LiDAR. On obtient ainsi un jeu de données d'arbres échantillon contenant pour chaque individu les informations relevées sur le terrain (essence, diamètre) et issues du LiDAR (hauteur, surface, volume et forme de couronne).

2.1.3.3. Prédiction de la famille d'essence et du diamètre sur les individus détectés

Le modèle de prédiction de l'essence par individu a été calibré avec une partie de l'échantillon apparié dans lequel le nombre d'individus par famille (feuillus / résineux) a été équilibré afin d'éviter un sur-apprentissage des espèces les plus représentées. La classification, réalisée par la méthode statistique des forêts aléatoires, utilise des variables explicatives de forme, de surface et de hauteur de couronne ainsi que des informations stationnelles comme l'altitude. Les taux de bonne prédiction sont de l'ordre de 80 %, quelle que soit la zone LiDAR traitée.

2.1.3.4. Estimation des paramètres forestiers par placette

Ainsi, afin d'estimer les paramètres forestiers, tels que la surface terrière, la densité ou le diamètre moyen, les modèles de prédiction de l'essence et du diamètre sont appliqués à l'ensemble des apex détectés. Le calcul pour chaque peuplement présent sur une placette consiste à faire la somme ou la moyenne des caractéristiques des apex sur la placette. L'estimation directe des paramètres (somme des caractéristiques apex de chaque placette) est corrigée par l'application d'une régression linéaire. Le Tableau 2 présente les erreurs des modèles de prédiction des paramètres forestiers à l'échelle de la placette.

Paramètre forestier prédit	« LiDAR Savoie zone B »		« LiDAR zone PNR 74 »	
	Erreur (EQM)	Coef. de détermination (R^2)	Erreur (EQM)	Coef. de détermination (R^2)
Surface terrière G (m^2/ha)	7,2 (27%)	77 %	7,0 (24 %)	79 %
Surface terrière des gros bois GGB (m^2/ha)	4,9 (51%)	82 %	5,0 (39 %)	84 %
% de gros bois (%)	16 %	70 %	16 %	71 %
Diamètre dominant D0 (cm)	4,9 (12 %)	80 %	5,3 (11 %)	77 %
Diamètre quadratique moyen Dg (cm)	3,6 (11%)	78%	3,5 (10 %)	76 %
Densité N (t/ha)	122 (36%)	52 %	107 (33 %)	60 %
% résineux / feuillus (en % de G)	13 %	87 %	12 %	86 %
Surface terrière résineux GR (m^2/ha)	5,6 (41 %)	86 %	4,7 (28 %)	90 %
Surface terrière feuillus GF (m^2/ha)	5,3 (42%)	76 %	5,3 (44 %)	75 %

Tableau 2 : erreur des modèles de prédiction

2.1.3.5. Application des modèles (cartographie)

Une fois les modèles de prédiction établis, il est possible de les appliquer à l'ensemble de la zone couverte par la mission LiDAR pour produire une cartographie en continu. Cette spatialisation nécessite d'abord un découpage de l'espace selon un maillage systématique, ici des « pixels » carrés de 26,6 m de côté afin de correspondre à la surface des placettes de calibration terrain.

Les résultats obtenus sur les deux zones LiDAR ont été agrégés en couches uniques. Lors des modélisations, les placettes ou cellules considérées comme non précomptables (diamètre des arbres inférieur à 17.5 cm) ou chétives ont été exclues. De même, les cellules de forte pente (non exploitables et dont la hauteur des arbres détectés risque d'être fortement erronée) ont été exclues.

2.2. Cartographie de l'accessibilité

Sylvaccess est un logiciel développé par INRAE en collaboration avec l'ONF. Cet outil est disponible en open-source [Dupire, 2021]. Il permet, à partir d'information géographique sur l'emprise des forêts, la topographie et le réseau de desserte forestière, de simuler automatiquement les conditions d'action des matériels de débardage forestier (tracteur, porteur, câble). Le produit final est une cartographie des possibilités techniques d'intervention des différents matériels. Les résultats ont été obtenus avec la version 3.5 du logiciel. Le paramétrage et les résultats sont présentés plus en détail dans le livrable 1.3A « Cartographie de l'accessibilité des forêts du PNR du Massif des Bauges » [Monnet et al., 2021].

2.2.1. Paramétrage et données

Deux matériels de débardage ont été simulés : le tracteur et le câble de type « câble-mat sur camion ».

La surface forestière de référence est celle définie par la BD Forêt V2 de l'IGN (excluant les catégories « formation herbacée », « lande » et « peupleraie »). La topographie utilisée est un MNT au pas de 5 m issu des acquisitions LiDAR réalisées par la RGD (2016) et par le PNR (2018).

Le débardage des bois par le tracteur se fait par treuillage, et par traînage sur les pistes et à l'intérieur des forêts (quand la pente le permet) jusqu'à la route forestière la plus proche, ou à la connexion entre une piste et une route du réseau public. Le logiciel Sylvaccess a besoin d'un fichier de desserte forestière comportant les linéaires de ces trois catégories :

- piste à tracteur : une piste permet au tracteur de circuler, de treuiller les bois et de traîner les bois ;
- route à camion forestier : une route permet au tracteur de circuler et de treuiller les bois, mais le traînage y est interdit ;
- réseau public.

Le fichier de desserte a été construit en combinant les informations d'un fichier de desserte datant de 2005 et celles de la BD Topo de l'IGN. Ce travail a été réalisé par un groupe d'étudiants AgroParisTech [Charlet et al., 2018] puis validé et complété par Éric Mermin (INRAE).

Toutes les routes à camion forestier ont été considérées comme permettant le débardage amont ou aval par câble, ce qui est une hypothèse optimiste. Les obstacles au débardage ont été extraits de la BD Topo.

2.2.2. Résultats

Un aperçu des résultats est présenté sur la Figure 5.

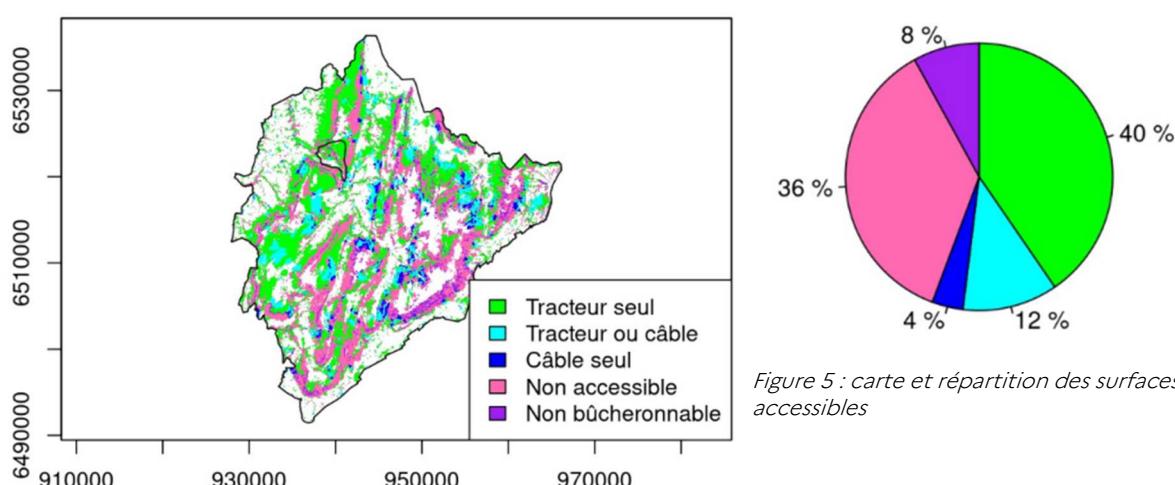


Figure 5 : carte et répartition des surfaces accessibles

3. Prospective territoriale

La seconde tâche vise à conduire un travail de prospective territoriale et à définir des scénarios de gestion forestière qui combinent déterminants forestiers, environnementaux et sociaux. Les facteurs sociaux et leurs possibles évolutions sont définis sur la base d'enquêtes de terrain et d'avis d'experts. En fonction de ces facteurs et d'une typologie des parcelles, différents scénarios de gestion forestière (ensemble de règles sylvicoles) sont formalisés pour pouvoir simuler les comportements possibles des gestionnaires.

Le travail reprend une méthode déjà existante et mise à l'épreuve dans le cadre d'un projet similaire, qui avait pour terrain d'étude les Landes de Gascogne (projet INTEGRAL). La démarche prospective est envisagée comme un outil d'aide à la décision permettant, par l'anticipation, d'envisager quelles sont les évolutions possibles du territoire, de déterminer quels sont les attendus, et d'orienter en fonction, les acteurs dans leurs choix et stratégies. Pour cela, le travail est découpé en trois grandes étapes :

- 1) L'état des lieux du développement forestier et des variables structurantes, ou diagnostic territorial ;
- 2) La construction de scénarios exploratoires plausibles et cohérents, obtenus par combinaison de l'évolution possible des différentes variables ;
- 3) L'analyse rétroactive : à partir d'un futur souhaité défini, les stratégies possibles pour y arriver sont mises en place avec les acteurs impliqués.

3.1. Diagnostic territorial

Cette analyse a été conduite par Aubéline BELLOM, étudiante à l'IUGA, stagiaire INRAE encadrée par Arnaud SERGENT. La méthodologie et les résultats sont présentés en détail dans son mémoire de master [Bellom, 2019] qui constitue le livrable 2.1AB « Analyse du contexte socio-économique ».

L'analyse s'articule autour de la question suivante : « comment produire davantage de bois et améliorer les fonctions économiques de la forêt, sans pour autant entacher ses autres fonctions et usages ? ». En effet, la demande institutionnelle d'une mobilisation supplémentaire des bois se heurte potentiellement à des controverses locales et à des incertitudes associées par exemple au changement climatique. Il s'agit alors de réfléchir à l'identification des différents facteurs individuels et structurels, ainsi que les points de conflit, qui déterminent le développement et la gestion des milieux forestiers, à l'échelle du territoire du Parc Naturel Régional du Massif des Bauges, en vue de l'élaboration de scénarios prospectifs.

3.1.1. Contexte national et local

Le territoire du PNR s'inscrit dans un contexte national qui est celui d'une forêt française marquée par des enjeux en termes de mobilisation des bois en augmentation et de gestion durable. Les forêts du territoire baujue sont des forêts qui disposent d'un fort potentiel en termes de ressources en bois : les forêts sont denses, diversifiées, et il est possible de mobiliser davantage de bois en termes de volumes. En effet, la forêt baujue progresse, demeure encore relativement peu exploitée, mais elle est soumise depuis quelques années à des problématiques sanitaires liées en partie aux changements climatiques. Le territoire des Bauges est cependant marqué par certaines particularités que sont un réseau de desserte insuffisant ainsi qu'une filière caractérisée par un manque d'entreprises à certains échelons tel que la première transformation.

Les enjeux en termes de gestion durable sont encore plus prégnants sur le territoire des Bauges, notamment parce que les milieux de montagne sont les plus touchés par le changement climatique, mais également parce que ces territoires doivent faire face à de fortes attentes en termes de mobilisation de bois et en termes de tourisme.

La méthode utilisée dans un second temps consiste en une consultation des acteurs du territoire à travers la conduite d'une quinzaine d'entretiens semi-directifs, enregistrés et retranscrits, qui permettent l'acquisition de données qualitatives faisant l'objet d'une analyse sémantique fine.

3.1.2. Travail bibliographique

Tout d'abord, un travail bibliographique a été mené, afin de réaliser un état des lieux des tendances des pratiques de gestion, anciennes et actuelles, marquées ou émergentes.

3.1.2.1. Source des données

Deux types de littératures ont été consultés. La littérature dite académique ou scientifique, a été mobilisée notamment au travers des documents produits par les autres membres de l'équipe de recherche, permettant d'affiner le diagnostic territorial d'une part, et la méthodologie à mettre en place pour la présente étude d'autre part. La littérature institutionnelle a également été mobilisée, au travers des documents officiels, très nombreux, qui permettent de caractériser le territoire et sa filière forêt-bois. Ces documents ont été consultés de manière non exhaustive du fait de leur nombre très important, et ont permis d'affiner le diagnostic territorial sur le plan économique, structurel ou encore politique. Ces documents ont été obtenus en majorité directement auprès des acteurs des institutions concernées (PNR, Agglomérations, Région), ou par recherche sur les sites internet de ces institutions.

3.1.2.2. Détermination des facteurs et des variables

L'état de l'art issu de cette consultation bibliographique a permis de déterminer une première liste de facteurs, chacun décliné en plusieurs variables. Ces facteurs sont inspirés des résultats issus du projet INTEGRAL, mais les variables sont issues des informations acquises dans le cadre du diagnostic territorial bibliographique propre à PROTEST. Les facteurs retenus sont les suivants : Politique et institutionnel, Démographie et territoire, Économie, Développement forestier.

Cette liste de facteurs a ensuite été nourrie d'une recherche portant sur les conflits émergents des informations acquises dans la phase de bibliographie. L'objectif de ce travail est d'avoir une base sur laquelle se fonder pour mener à bien les entretiens auprès des acteurs.

3.1.3. Enquête auprès des acteurs du territoire

Cette deuxième phase de travail consiste en une consultation de certains acteurs du territoire, afin de pouvoir affirmer ou infirmer les hypothèses issues du travail bibliographique quant au diagnostic du territoire et aux différents points de conflits, mais également de nourrir ce diagnostic de nouveaux éléments apportés par les acteurs in situ. Il est important de noter que les entretiens menés visent avant toute chose à montrer la diversité des points de vue et des expertises des acteurs du territoire, et ne visent pas une représentation exhaustive et représentative de la population.

Les entretiens menés sont de type semi-directif, ou centré. L'idée est de centrer les propos de l'interrogé autour d'une thématique, mais sans orienter ses réponses, en le laissant libre d'évoquer ce qu'il souhaite. L'objectif est de ne pas enfermer les propos des personnes consultées dans des questions prédéfinies, quand bien même le meneur de l'entretien peut intervenir dans les propos afin de les préciser, par le biais de questions complémentaires.

Les 16 entretiens ont donc été menés en suivant les guides préétablis, à partir d'une question générale servant de point de départ : « Comment intervenez-vous sur les espaces forestiers du territoire des Bauges ? ». L'enjeu principal était de réussir à rebondir à partir des propos tenus par les acteurs vers les points que le meneur de l'entretien avait besoin d'approfondir.

3.1.4. Résultats

La Figure 6 présente les variables associées aux quatre facteurs.

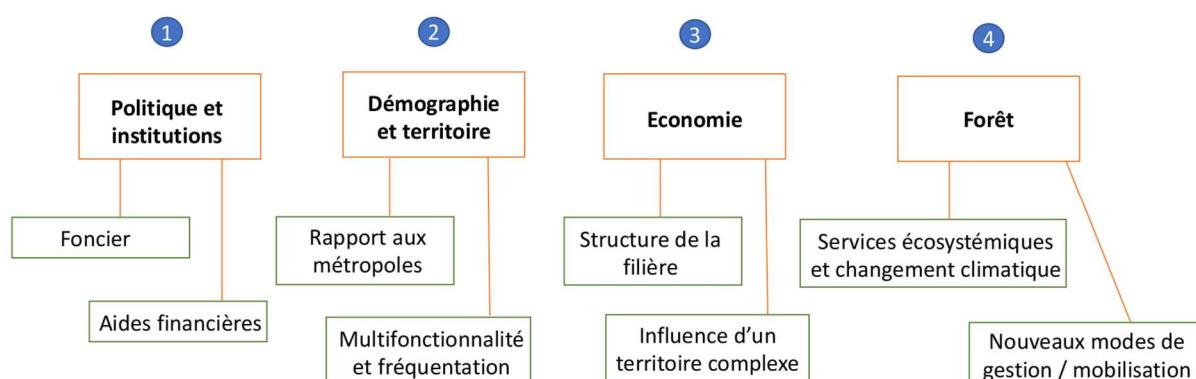


Figure 6 : facteurs et variables issues du diagnostic territorial

- Les variables politiques et institutionnelles correspondent aux éléments qui influent sur l'organisation politique et institutionnelle de la filière forêt-bois des Bauges. Ce sont des éléments majoritairement

structurels, et qui soulèvent un certain nombre de controverses et d'incertitudes auprès des acteurs du territoire.

- Les variables démographiques et territoriales concernent les éléments propres à la démographie et au territoire des Bauges, qui influent sur la gestion forestière et la filière forêt-bois. Ces éléments tiennent principalement à la proximité de ce territoire avec ses quatre grandes villes-portes.

- Les variables économiques sont liées avec la structure de la filière locale et à son intégration dans un territoire complexe.

- Les variables forestières sont en lien avec les spécificités de la forêt des Bauges elle-même, à savoir les services qu'elle fournit aux territoires, mais également l'avenir de cette forêt dans le cadre d'une évolution des conditions climatiques au niveau mondial, et les adaptations qui peuvent et doivent être mises en place.

Le territoire des Bauges est un territoire traditionnellement forestier, où les activités liées à la filière forêt-bois sont anciennes. Le diagnostic a montré que cette activité est confrontée à différents enjeux et obstacles, parmi lesquels il est possible de citer une filière incomplète, une propriété forestière fortement morcelée, un réseau de desserte insuffisant et des inconnues préoccupantes telles que le changement climatique ou encore la surpopulation de la faune sauvage ongulée. L'étude a permis de mettre en valeur également certains points de conflit, certaines zones de tension, par exemple les controverses autour de la relocalisation de la filière, les conflits d'usage sur les chemins forestiers, les stratégies d'adaptation sylvicole, ou encore les tensions entre chasseurs et forestiers sur la question de la faune sauvage.

Il apparaît que la gestion des espaces forestiers baujus est influencée d'une part par des facteurs qui tiennent à une gouvernance nationale adaptée au niveau régional, et d'autre part par des éléments qui eux dépendent principalement des décisions prises au niveau local par les acteurs de la filière. Il existe sur ce territoire, pourtant marqué par des dynamiques de coopération importante, des tensions et des zones de friction pouvant influer sur le devenir des espaces forestiers.

3.2.Scénarios

L'objectif est d'élaborer des scénarios exploratoires permettant d'anticiper l'évolution possible des conditions de gestion forestière à l'échelle territoriale. À partir des facteurs clés déterminés lors de l'étape du diagnostic territorial, il s'agit 1) de définir leurs modalités d'évolution possible ; 2) d'identifier différentes combinaisons envisageables et d'évaluer leur cohérence interne, notamment avec les documents d'aménagement forestier en forêts relevant du régime forestier ; 3) de sélectionner les combinaisons les plus plausibles et les plus contrastées.

Suite à ce travail, cinq scénarios décrivant des futurs possibles ont été proposés. Les principales caractéristiques de chaque scénario sont listées dans les paragraphes suivants.

3.2.1. Adaptation forcée (ADA)

Sévères attaques répétées de pathogènes sur le massif (peuplement d'épicéas) et mise en place d'une série de plans de crise : coupe et régénération artificielle, financés par l'État.

Forte sensibilisation de la population aux conséquences du changement climatique : l'opinion publique soutient l'interventionnisme.

Implication des collectivités territoriales dans le soutien à l'adaptation des peuplements forestiers (dessertes, coupes d'irrégularisation, enlèvement des gros bois).

Forte dynamique de regroupement des propriétaires et de développement des coopératives forestières.

Le PNR est animateur et coordinateur de ce programme d'adaptation.

3.2.2. Transition énergétique (TRE)

Forte augmentation de la demande en bois énergie et augmentation des prix.

Mise en place d'un dispositif réglementaire de « consentement tacite » des propriétaires dans le cadre d'opérations groupées de « développement forestier ».

Multiplication des opérateurs forestiers (coopératives, exploitants).

Implication forte des métropoles dans le financement des infrastructures forestières.

Nouvelles opportunités de développement économique sur le territoire (scieries locales, artisanat et chaufferies locales) avec un enjeu de hiérarchisation des usages.

Forte mobilisation des usagers et des populations contre l'exploitation forestière.

Le PNR gère les tensions entre les acteurs (métropoles, filière bois locale, usagers et résidents des Bauges).

3.2.3. Redynamisation forestière (DYN)

Soutien à la gestion adaptative des peuplements forestiers via un programme national et des investissements fonds privés carbone.

Croissance soutenue de la demande et des prix (bois énergie et bois d'œuvre) : amélioration de la compétitivité du tissu économique régional.

Concentration industrielle et développement des coopératives forestières.

Stratégie de planification du développement forestier (ségrégation spatiale du territoire et infrastructures), soutenue par les collectivités territoriales.

Forte dynamique de regroupement des propriétaires forestiers sur les zones à enjeu productif.

Le PNR anime un programme d'aménagement territorial et gère le partage de l'espace et des usages.

3.2.4. Patrimonialisation (PTR)

Stagnation du prix des bois.

Développement du tourisme et forte valorisation marchande des activités récréatives (chasse, randonnée...).

Croissance démographique et développement de l'économie tertiaire ; soutien à l'élevage sur le massif.

Consolidation des associations de propriétaires et développement de groupements forestiers « écologiques » avec investissement citoyen.

Maintien d'un tissu d'artisans alimentant le marché de la construction (segment maison individuelle).

Le PNR maintient l'équilibre entre les différents usages et travaille à l'intégration des nouvelles populations.

3.2.5. Sanctuarisation (SCT)

Politique nationale de stockage carbone et de promotion de la biodiversité.

Opinion publique favorable au maintien d'espaces de nature : massif à enjeu biodiversité et carbone.

Croissance démographique aux marges (forte attractivité) avec fort développement de résidences secondaires.

Tourisme de nature et d'observation.

Diminution des activités sylvicoles mais maintien de quelques activités artisanales.

Développement des groupements forestiers « écologiques » avec financements fonds privés et institutionnels.

Le PN(R) est gestionnaire de la valorisation environnementale, du contrôle des activités et de l'intégrité du massif.

4. Simulations d'évolution forestière

L'objectif de cette tâche est de simuler l'évolution du territoire forestier pour les différents scénarios. Plusieurs intérêts sont associés à cette simulation.

Simuler les scénarios sur les peuplements forestiers suppose de prolonger la réflexion en se posant la question des sylvicultures associées ainsi que de leur répartition sur le territoire. L'état des peuplements simulés peut être ensuite utilisé pour estimer les services écosystémiques associés et donc comparer les scénarios via l'image des forêts et des services rendus sur le territoire. Ces informations viennent alimenter la dernière étape de la démarche prospective.

Simuler l'évolution des peuplements sur un territoire aussi complexe que le PNR du Massif des Bauges suppose de faire de nombreuses hypothèses, de simplifier les peuplements ainsi que les modes de gestion, tout en choisissant un grain spatial de modélisation qui permette les calculs tout en restant pertinent pour l'interprétation. Les résultats de modélisation ont une portée limitée pour l'évaluation des scénarios pris séparément. Par contre la comparaison des résultats obtenus pour les différents scénarios du point de vue des services écosystémiques reste porteuse de sens, notamment pour donner des éléments de discussion dans la démarche prospective.

L'utilisation des données LiDAR pour initialiser les peuplements, et des scénarios prospectifs pour définir les itinéraires sylvicoles a été l'occasion d'identifier les limites et perspectives d'amélioration pour la combinaison de ces différents outils et données.

4.1. Simulations d'évolution avec SIMMEM

Le simulateur SIMMEM (Simulateur Multi-Module pour l'Echelle Massif) est un module de la plateforme de simulation Capsis. Son objectif est de capitaliser sur le développement des différents modules de Capsis, la plupart adaptés à des situations sylvicoles particulières (une essence, un mode de gestion sylvicole), pour aborder l'échelle du massif forestier composé de plusieurs systèmes plus ou moins complexes. SIMMEM a été développé au travers de plusieurs projets, notamment les projets FORGEKO (ANR Systerra) et SATAN (projet REACCTIF de l'ADEME).

Dans le cadre du projet PROTEST, le simulateur SIMMEM est couplé au modèle peuplement SALEM [Aussenac et al., 2021a], dont les essences disponibles couvrent celles du territoire du PNR du Massif des Bauges. Les limites de SIMMEM sont celles du modèle sous-jacent. L'intérêt principal du modèle SALEM est sa bonne couverture des différentes essences du territoire, ainsi que sa bonne prise en compte des caractéristiques environnementales (sol, climat moyen, etc.) des différentes parcelles simulées. En revanche, le modèle est développé pour les futaies régulières. L'appliquer sur des peuplements en gestion irrégulière a nécessité une adaptation des règles sylvicoles pour s'approcher de ce type de peuplement. La difficulté principale est la prise en compte du recrutement, mais l'horizon temporel des simulations dans PROTEST rend ce problème assez négligeable. D'autre part, les simulations dans PROTEST incluent la mortalité engendrée par compétition dans les peuplements hyper denses, mais n'incluent pas la mortalité liée aux événements extrêmes comme les tempêtes ou les sécheresses potentiellement induites par le dérèglement climatique. Enfin, le climat moyen de la parcelle est inclus dans SALEM, mais l'influence des fluctuations climatiques annuelles n'est pas encore développée pour le territoire des Bauges.

4.2. Initialisation biophysique des peuplements

SIMMEM permet de faire évoluer les caractéristiques d'un ensemble de peuplements selon des itinéraires sylvicoles prédéfinis. Il a besoin pour cela que chaque peuplement soit décrit d'une part par son emprise géographique et d'autre part par les paramètres forestiers suivants : l'indice de fertilité, la composition en essence (pur ou mélange de deux essences), la surface terrière par essence, le nombre de tiges par essence (ou le diamètre quadratique moyen pour chaque essence).

L'emprise géographique résulte d'un découpage du territoire. Les paramètres forestiers sont obtenus par modélisation à partir de variables biophysiques ou de télédétection qui doivent être disponibles pour chaque peuplement (sur l'ensemble du territoire d'étude), ainsi qu'aux localisations des placettes IFN ou PROTEST qui servent pour la calibration.

L'étape d'initialisation biophysique des peuplements est présentée en détail dans le livrable 3.1A « Initialisation des peuplements forestiers » [Aussenac et al., 2021b].

Afin de tenir compte des essences présentes sur la zone et de celles qui peuvent être modélisées par le simulateur, il a été décidé de simuler les essences en peuplements purs et en mélanges suivants : hêtre, épicéa, sapin, chêne sessile, mélange hêtre-sapin, mélange hêtre-épicéa, mélange sapin-épicéa. Les mélanges de feuillus sont simulés comme des peuplements purs de hêtre ou chêne selon laquelle de ces deux espèces est prépondérante.

4.2.1. Découpage du territoire

L'emprise des forêts dont l'évolution est simulée, est définie par la BD Forêt v2 fournie par l'IGN, en excluant les catégories « landes », « formations herbacées », « peupleraies ». L'entrée principale pour le paramétrage de la croissance des peuplements étant les essences, les polygones définis par les catégories TFV de la BD Forêt sont utilisés comme base pour le découpage du territoire.

D'autres entrées sont jugées importantes pour déterminer si les peuplements sont gérés, et le cas échéant, quel itinéraire sylvicole leur est appliqué : la propriété (publique / privé), la taille moyenne des parcelles cadastrales, les conditions d'accessibilité.

Le découpage du territoire selon toutes ces catégories aurait résulté en un nombre trop grand de polygones, il a été décidé de découper itérativement les polygones TFV de la BD Forêt en polygones d'une taille maximale de 3 ha. Cette surface permet d'atteindre un compromis entre le nombre de polygones à traiter (environ 27000) et une taille de polygone assurant une certaine homogénéité au peuplement.

4.2.2. Extraction des variables

Les variables suivantes sont extraites pour les polygones ainsi que pour les placettes IFN et PROTEST.

Les **catégories d'essences** TFV de la BD Forêt simplifiées en 5 catégories : Forêt fermée à mélange de feuillus, Forêt fermée de sapin ou épicéa, Forêt fermée à mélange de feuillus prépondérants et conifères, Forêt fermée à mélange de conifères prépondérants et feuillus, Forêt fermée de hêtre pur.

Les variables **dendrométriques** : diamètre quadratique moyen des arbres de plus de 7,5 cm de diamètre, surface terrière des arbres de plus de 7,5 cm de diamètre, pourcentage en surface terrière des arbres feuillus dans le peuplement, obtenues par agrégation de valeurs modélisées par LiDAR. Une modélisation différente de celle présentée au paragraphe 2.1.3 a été effectuée. En effet pour les simulations de territoire, les variables dendrométriques doivent intégrer les arbres à partir de 7,5 cm et être disponibles sur l'intégralité des forêts définies par la BD Forêt v2. La méthode utilisée précédemment se base sur la détection d'arbres, elle est performante mais moins pertinente pour les peuplements peu capitalisés ou chétifs. Une méthode basée uniquement sur le nuage de point a donc été mise en œuvre pour produire les données dendrométriques nécessaires aux simulations [Monnet, 2019].

Le code de la **grande région écologique (GRECO)** est extrait pour chaque polygone.

La **pente**, l'**exposition Nord/Sud**, l'**exposition Est/Ouest** et l'**altitude** extraites du MNT à 5 m, ou mesurées sur le terrain pour les placettes IFN.

Le **code carbonate** et le **code hydro** tirés des couches de géologie.

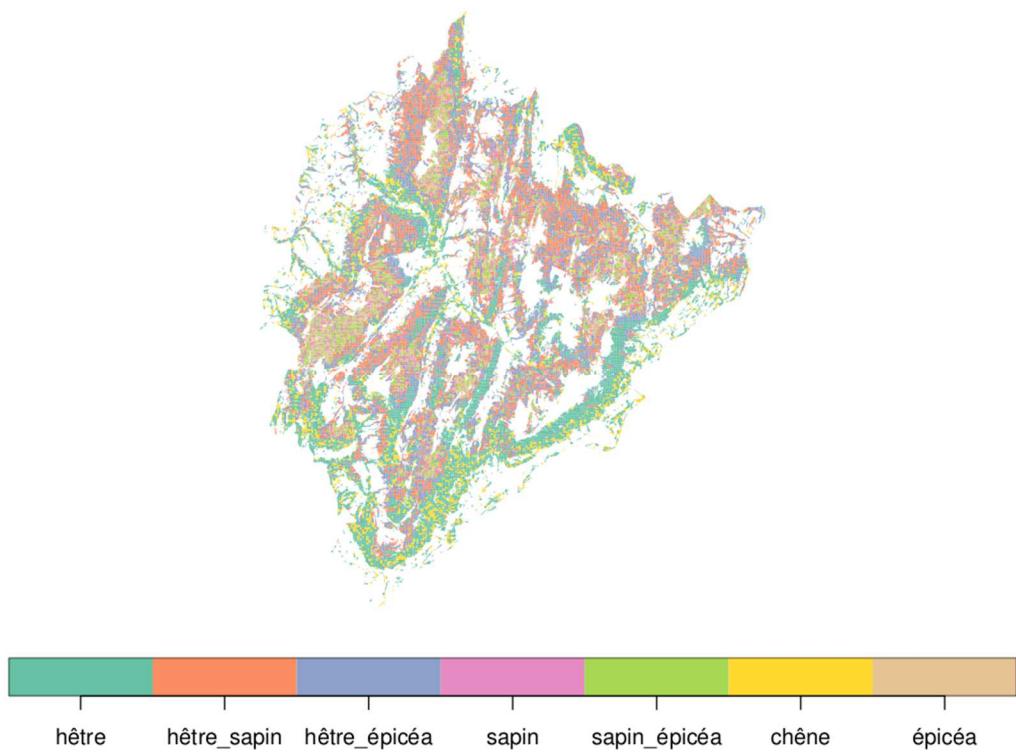
La **réserve utile maximale** et le **pH des sols forestiers** disponibles sur le portail Silvae, ou calculés à partir des relevés de terrain pour les placettes IFN.

4.2.3. Modélisation des variables

L'indice de fertilité pour chaque espèce est modélisé à partir des données des placettes IFN, puis prédit sur les polygones.

La **composition en essence** est affectée aux polygones (Figure 7) en prenant en compte la proportion feuillus / résineux, le code TFV et la distribution des compositions sur les placettes PROTEST.

La **dendrométrie par essence** est modélisée puis affectée aux polygones.



4.3. Initialisation de la gestion des peuplements

La procédure précédente permet de découper les forêts en un ensemble de polygones, et de leur affecter des caractéristiques forestières initiales (composition, dendrométrie) ainsi qu'un indice de fertilité. La procédure qui suit vise à leur attribuer des itinéraires de gestion sylvicole, et à préparer les fichiers d'entrée qui permettront au module SIMMEM de simuler l'évolution de ces peuplements.

L'application des scénarios sur le territoire se fait selon une matrice qui indique la répartition des catégories de peuplements dans les différents itinéraires. La répartition pour le scénario "patrimonialisation", considéré comme le scénario tendanciel, a été faite par FCBA sur la base de l'avis des gestionnaires forestiers et de la structure des peuplements relevée sur le terrain par les placettes PROTEST et IFN [Carrette et Thivolle-Cazat, 2021]. La répartition pour les autres scénarios est indiquée relativement à ce scénario de référence, afin de tenir compte de l'esprit de chaque scénario tout en restant plausible.

Afin que l'affectation des polygones aux itinéraires soit réaliste, celle-ci se fait par modélisation à partir de variables jugées pertinentes. Le processus de modélisation induit que les pourcentages obtenus pour chaque itinéraire sur le territoire peuvent être légèrement différents de ceux proposés dans la matrice.

Les variables considérées sont : la propriété (publique / privé), la superficie des parcelles cadastrales, les conditions d'accessibilité, la présence de zones à statut de protection.

L'affectation d'un itinéraire sylvicole à chaque polygone se fait en réalisant les étapes suivantes : extraction des variables pour chaque polygone, modélisation de la probabilité de gestion / non-gestion, affectation d'un itinéraire. Ces étapes sont présentées ci-dessous. Elles sont détaillées dans le livrable 2.3 « Méthode d'initialisation de la gestion forestière » [Aussenac et al., 2021c].

4.3.1. Extraction des variables

Les variables suivantes sont extraites pour les polygones.

Surface moyenne des parcelles cadastrales intersectant chaque polygone, extraite à partir de la BD PARCELLAIRE v1.2 de l'IGN.

Propriété publique ou privée. Un polygone est considéré comme public si plus de la moitié de sa surface correspond au parcellaire des forêts publiques.

Accessibilité. Le modèle Sylvaccess est utilisé sur le territoire du PNR pour cartographier les zones bûcheronnables et celles accessibles aux engins forestiers (paragraphe 0). On désigne par non-bûcheronnable les zones où l'on considère que la pente (supérieure à 110 %) rend l'accessibilité à pied difficile et le bûcheronnage impossible. On désigne par non-accessible les zones auxquelles les engins forestiers de débardage ne peuvent pas accéder d'après le modèle Sylvaccess. Les caractéristiques suivantes d'accessibilité sont extraites pour chaque polygone : bûcheronnable ou non, accessible ou non aux engins, distance moyenne de débardage (si accessible). L'accessibilité est la même pour tous les scénarios, sauf :

- TRE (Transition énergétique) où un projet de desserte supplémentaire a été ajouté (conversion d'une piste en route forestière).
- DYN (Redynamisation forestière) où des dessertes fictives ont été ajoutées.

Proportion de la surface du polygone non couverte par une zone protégée. Trois types de zones protégées ont été prises en compte : les réserves biologiques, la trame de vieux bois (réseau FRENE) et les arrêtés préfectoraux de protection de biotope.

4.3.2. Gestion ou non gestion

4.3.2.1. Modélisation de la probabilité de gestion

Dans le cadre du projet OUI-GEF, une enquête a été mise en œuvre par Mihai Tivadar (UR LESSEM, INRAE Grenoble) sur les conditions influençant la gestion des parcelles. Sur le massif des Bauges, 311 parcelles ont été enquêtées. On s'intéresse notamment à la réponse à la question : « avez-vous réalisé une opération de gestion sur votre parcelle ? ». Plusieurs choix étaient proposés, la réponse a été convertie en réponse binaire oui/non. Pour chaque parcelle enquêtée sont extraites les variables suivantes, de la même manière que pour les polygones : la surface cadastrale moyenne, la distance moyenne de débardage, polygone accessible ou non.

Un modèle linéaire généralisé avec une loi binomiale est utilisé pour modéliser la probabilité de gestion en fonction de deux variables : le logarithme de la surface et la distance de débardage. Pour la calibration, seules les parcelles considérées comme « accessibles » avec une distance de débardage inférieure à 2000 m sont utilisées.

Ce modèle est ensuite appliqué aux polygones en propriété privée pour estimer la probabilité de gestion (quelle que soit la distance). Pour les polygones en forêt publique, on considère qu'ils ont tous une surface de 300 ha.

4.3.2.2. Spécificités liées aux scénarios

Une première différence entre scénarios est la part des peuplements non gérés. Afin de faire varier cette proportion, on utilise les variables intégrées dans le modèle gestion / non gestion :

- une augmentation du prix du bois pourra être simulée comme une diminution de la distance de débardage, sous l'hypothèse qu'un prix du bois plus élevé permet de couvrir des coûts de débardage supérieurs ;
- une augmentation de l'animation et le regroupement de propriétaires pourront être simulés comme une diminution de la taille moyenne des parcelles contenues dans le polygone ;
- une contrainte externe visant à augmenter la proportion de gestion pourra être simulée en augmentant directement la probabilité de gestion issue du modèle, pour une zone ou une catégorie de peuplement donné.

Les polygones avec une distance de débardage non renseignée, ou se trouvant en zone non débordable ou non bûcheronnable sont affectés d'une probabilité de gestion de 0. Enfin, la probabilité de gestion est pondérée par la proportion du polygone ne se trouvant pas dans une aire protégée.

4.3.2.3. Choix gestion / non-gestion

Un tirage au sort selon la probabilité de gestion est ensuite effectué pour déterminer si un polygone est géré ou non. Les polygones non bûcheronnables ou non accessibles sont donc systématiquement non-gérés, pour les autres cela dépend de la surface moyenne des parcelles cadastrales qu'ils contiennent (pour les forêts privées), et de la distance à la route forestière.

4.3.3. Affectation des itinéraires sylvicoles

Afin de limiter la quantité de paramétrages à effectuer pour les itinéraires, il a été choisi de limiter à la fois le nombre d'itinéraires sylvicoles, et le nombre de catégories de peuplements.

4.3.3.1. Typologie des peuplements

On considère que les itinéraires appliqués vont dépendre de la propriété (public / privé) et de la composition en essence. Une typologie des peuplements selon ces deux critères est donc proposée :

- sapin et/ou épicéa en public
- sapin et/ou épicéa en privé
- mixte public : hêtre et (sapin ou épicéa) en public
- mixte privé : hêtre et (sapin ou épicéa) en privé
- hêtre (mélange de feuillus avec hêtre prépondérant par rapport au chêne)
- chêne (mélange de feuillus avec chênes prépondérants par rapport au hêtre).

La répartition des types de peuplement sur le territoire est présentée sur la Figure 8.

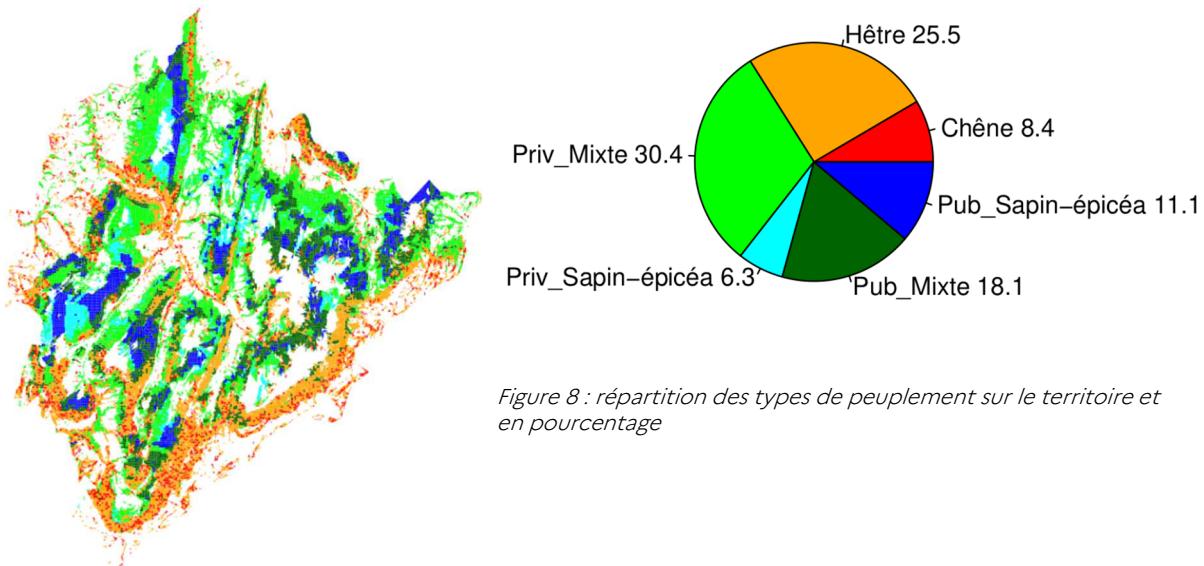


Figure 8 : répartition des types de peuplement sur le territoire et en pourcentage

4.3.3.2. Typologie des itinéraires

Les itinéraires proposés et leur implémentation dans le simulateur sont décrits ci-dessous :

Amélioration puis coupe rase. L'éclaircie se fait par le bas, puis l'ensemble du peuplement est coupé quand le diamètre objectif est atteint.

Coupe rase. Le peuplement est auto-éclairci par mortalité puis la coupe est déclenchée quand le diamètre dominant objectif est atteint. Cela correspond à des peuplements de type taillis.

Irrégulier. L'éclaircie se fait parmi les arbres les plus gros, de manière permanente, en assurant le renouvellement de manière continue.

Inaction. Auto-éclaircie par mortalité.

Dans le cas de peuplements mélangés, le comportement par défaut du simulateur est de tendre vers l'équilibre des deux espèces. Après la coupe finale, le renouvellement se fait avec les mêmes essences.

4.3.3.3. Répartition des itinéraires

Chaque scénario se caractérise par une matrice de répartition de chaque catégorie de peuplement dans les différents itinéraires. Tout d'abord les polygones non-bûcheronnables sont placés en "Inaction". Pour les polygones bûcheronnables, un tableau de répartition a été proposé par FCBA [Carrette et Thivolle-Cazat, 2021] sur la base de l'analyse des structures des placettes PROTEST et IFN (ces placettes étant jugées représentatives des peuplements qu'il est possible d'atteindre), et lors d'entretiens avec l'ONF et la Chambre d'Agriculture.

Pour chaque polygone, la valeur de RDI (index de densité relative) est calculée pour chaque espèce du mélange (le cas échéant) et pour l'ensemble du peuplement. Sur la base du RDI et du diamètre quadratique moyen du polygone, une probabilité d'être un peuplement irrégulier est calculée.

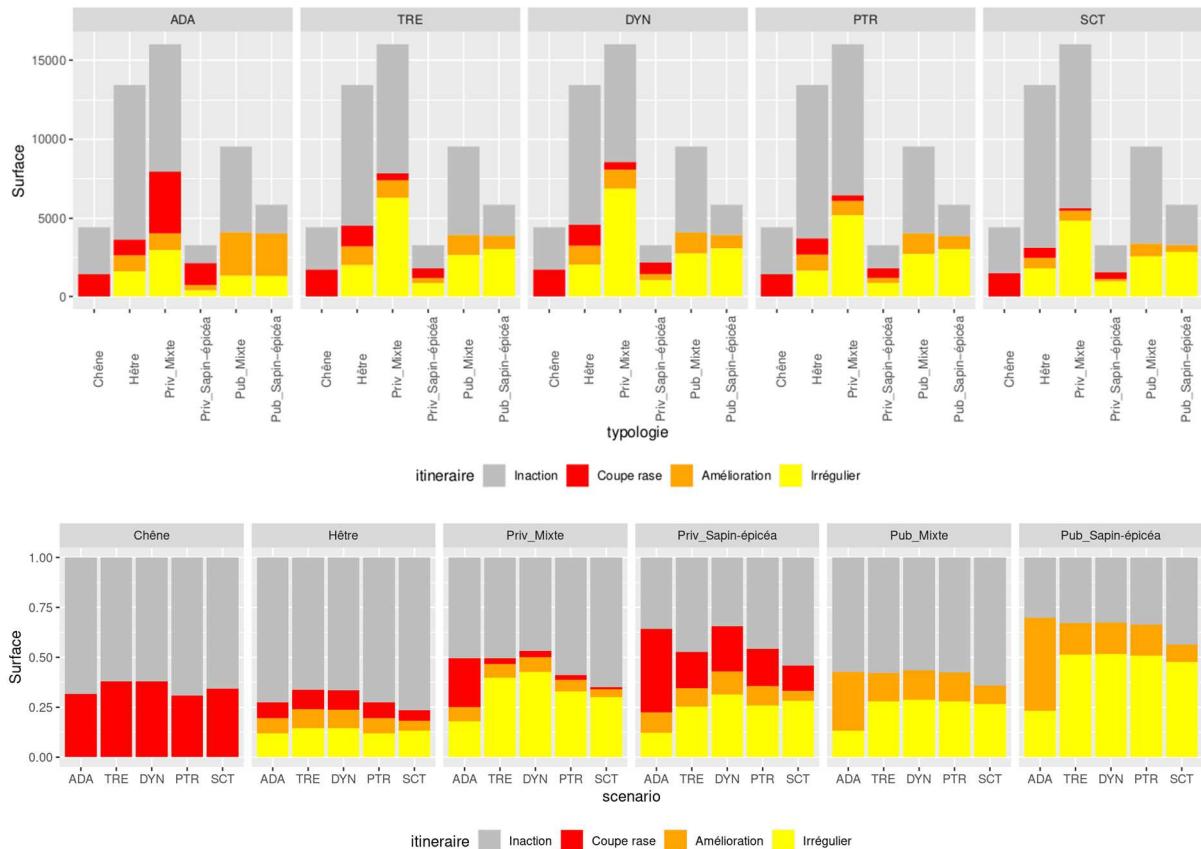


Figure 9 : répartition des peuplements par itinéraire en surface (haut) et en proportion (bas)

Pour chaque catégorie de peuplement, les étapes successives pour l'affectation des polygones bûcheronnables aux itinéraires sont les suivantes.

- Les polygones considérés comme non-gérés sont placés en « Inaction ».
- Parmi les polygones restants, des polygones sont affectés à l'itinéraire « Irrégulier » jusqu'à atteindre le pourcentage indiqué, par tirage au sort prenant en compte la probabilité des polygones d'être des peuplements irréguliers.
- Parmi les polygones restants, des polygones sont affectés par tirage au sort à l'itinéraire « Coupe rase » jusqu'à atteindre le pourcentage indiqué.
- Les polygones restants sont affectés à l'itinéraire « Amélioration puis coupe rase ».

La répartition en surface des types de peuplements par itinéraires est présentée pour chaque scénario sur la Figure 9.

4.4. Résultats des simulations

SIMMEM est un module de la plateforme CAPSIS qui gère l'évolution d'un ensemble de peuplements qui sont ici individuellement simulés par le module Salem. Le fonctionnement de Salem a été décrit dans un article rédigé dans le cadre du projet [Aussenac et al., 2021a]. Le nombre de polygones simulés est de 26654, pour une surface totale de 52570 ha. On s'intéresse à une durée simulée de 30 années, avec un pas de simulation de 3 ans. Ceci permet de constater des écarts entre les scénarios tout en restant dans des délais où les simulations d'évolution restent pertinentes.

Les résultats sont présentés plus en détail dans le livrable 3.1b « Résultat des simulations et comparaison des scénarios » [Monnet et al. 2021]. Un groupe d'étudiants AgroParisTech a contribué à la mise en œuvre et à l'analyse des scénarios [De Roo et al., 2020].

4.4.1. Aperçu général

4.4.1.1. Volumes coupés et surface traitée annuellement

Le simulateur comptabilise le volume (volume sur écorce du tronc jusqu'à la découpe 7 cm) des arbres coupés. On entend par surface traitée la superficie des polygones où a eu lieu une intervention sylvicole de coupe (éclaircie, coupe finale ou rase, coupe en irrégulier) lors d'une année donnée. Les surfaces traitées et volumes coupés en moyenne annuelle sont présentés sur la Figure 10, le scénario « Patrimonialisation » (PTR) représentant la base 100.

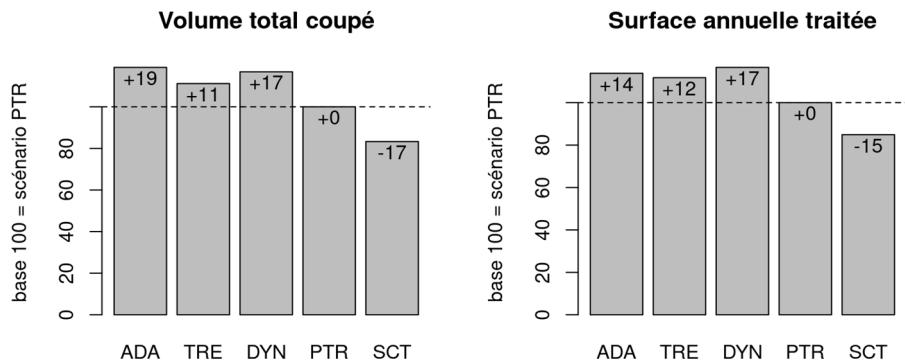


Figure 10 : volumes coupés et surface traitée

Les augmentations pressenties par rapport au scénario PTR étaient, pour les volumes coupés et surfaces traitées en moyenne annuelle [Carrette et Thivolle-Cazat, 2021] :

- + 67 % en volume et + 8 % en surface pour « Adaptation forcée » (ADA),
- + 67 % en volume et 0 % en surface pour « Transition énergétique » (TRE),
- + 42 % en volume et + 8 % en surface pour « Redynamisation forestière » (DYN),
- 33 % en volume et - 33 % en surface pour « Sanctuarisation » (SCT).

Les résultats de simulation sont moins contrastés. Il paraît difficile de décorrélérer les volumes coupés et surfaces traitées, sauf à introduire des modifications plus importantes sur la sylviculture, notamment les diamètres objectifs et les régimes d'éclaircie. Pour mobiliser davantage, les deux principaux leviers sont en effet :

- l'augmentation de la surface traitée obtenue par l'augmentation de l'accessibilité et/ou l'augmentation de la probabilité de gestion,
- l'augmentation du prélèvement, qui se traduit par une diminution du stock sur pied dans la mesure où les différences entre itinéraires n'ont qu'une influence marginale sur la productivité.

Les principales modifications par rapport au scénario de référence PTR sont, seules ou combinées selon les scénarios :

- multiplication de la surface cadastrale moyenne (facteur 5 à 10) pour certaines catégories de peuplement selon les scénarios (effet simulé du regroupement forestier) ;
- multiplication de la probabilité de gestion par 1,1 (zones de dépeuplement, secteurs d'animation, selon scénario) ;
- diminution de la distance de débardage pour certaines catégories de peuplement (équivalent à une augmentation du prix du bois).

Étant donné que le massif est dans l'ensemble peu accessible et que l'effet de la taille de la parcelle sur la probabilité de gestion est d'ordre logarithmique, les efforts même importants consentis ci-dessus ont un effet limité sur la surface additionnelle entrant en gestion. Ainsi l'augmentation de la surface cadastrale moyenne selon de telles proportions nécessiterait un travail d'animation très conséquent, même s'agissant d'une partie seulement des peuplements. L'augmentation de la surface traitée via l'accessibilité représente de même un effort très important. La création de 45 km de route forestière, soit +8 % du linéaire, et de 40 km de pistes forestières dans le scénario DYN, ne permet pas d'augmenter la surface traitée dans une même proportion par rapport aux scénarios ADA et TRE.

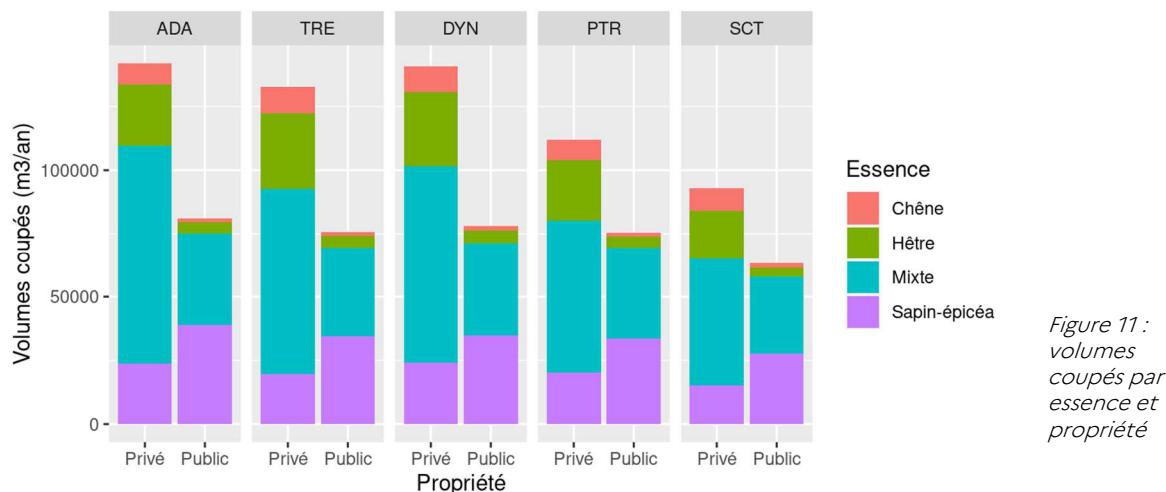
Enfin le seul scénario comportant un transfert important entre itinéraires sylvicoles avec une diminution des diamètres d'exploitation est le scénario ADA. C'est le seul pour lequel l'augmentation du volume mobilisé est supérieure à celle de la surface traitée.

Le Tableau 3 montre la surface gérée, la surface traitée en moyenne annuelle, le volume total coupé en moyenne annuelle, et le volume coupé moyen en m^3 par an et par hectare de forêt gérée. Le haut du tableau présente les chiffres en valeur absolue, le bas en relatif par rapport au scénario PTR.

Scénario	Surface gérée (ha)	Surface traitée (ha/an)	Volume coupé moyen ($m^3/ha/an$)	Volume coupé total (m^3/an)
ADA	23300	1270	9.6	223000
TRE	23900	1250	8.7	208000
DYN	24900	1300	8.8	219000
PTR	21400	1120	8.8	187000
SCT	18500	950	8.4	156000

Scénario	Surface gérée (ha)	Surface traitée (ha/an)	Volume coupé moyen ($m^3/ha/an$)	Volume coupé total (m^3/an)
ADA	+9 %	+14 %	+9 %	+19 %
TRE	+12 %	+12 %	0 %	+11 %
DYN	+17 %	+17 %	0 %	+17 %
SCT	-13 %	-15 %	-4 %	-17 %

Tableau 3 : récolte et surface traitée (bas : évolution par rapport au scénario PTR)



Dans les simulations, ADA comporte une augmentation de récolte en privé et public. Pour les scénarios TRE et DYN, l'augmentation est réalisée majoritairement en privé. La répartition des volumes coupés change peu avec le scénario SCT. Du point de vue des essences, les scénarios restent peu contrastés. ADA a une proportion plus importante de volumes coupés en mixte, et très légèrement en sapin-épicéa. TRE et dans une moindre mesure DYN ont des volumes coupés un peu plus importants en feuillus. SCT a une proportion plus importante en chêne. En public, les volumes coupés sont majoritairement en sapin-épicéa, et en mixte. Il y a moins de peuplements feuillus qu'en privé (Figure 11).

ADA est caractérisé par une augmentation de la proportion de coupe rase (surtout en privé) et d'amélioration (surtout en public) par rapport aux autres scénarios. SCT a une proportion plus importante d'irrégulier.

4.4.1.2. Interventions sylvicoles

Dans les polygones gérés, le nombre moyen d'interventions sur 30 ans est de 1,45 pour le scénario de référence. Il est plus élevé pour les autres scénarios (ADA et TRE 1,61 soit +11%, DYN 1,69 soit +17%), sauf SCT 1,25 (soit -14%). L'intensité moyenne des interventions est environ de 170 m^3/ha pour tous les scénarios. Cependant la distribution des intensités n'est pas la même. Ainsi le scénario ADA comporte 42 % de surface en plus que PTR pour les opérations d'intensité supérieure à 200 m^3/ha . La surface avec une

forte coupe diminue pour SCT qui comporte à la fois moins de surface traitée et une plus forte proportion de gestion en irrégulier (Tableau 4).

	Intensité moyenne (m ³ /ha)	Intensité moyenne (écart avec PTR)	Surface traitée (écart avec PTR)	Surface traitée >200m ³ /ha (écart avec PTR)
ADA	175	+5 %	+14 %	+42 %
TRE	167	-1 %	+12 %	+10 %
DYN	168	0 %	+17 %	+17 %
PTR	168	0 %	0 %	0 %
SCT	165	-2 %	-15 %	-26 %

Tableau 4 : intensité de récolte

4.4.1.3. Surface terrière sur pied

Pour tous les scénarios, on observe une nette augmentation de la surface terrière, essentiellement due aux peuplements en inaction. Sur la durée simulée, on constate une légère diminution de la surface terrière sur pied dans les peuplements gérés. Celle-ci est plus importante pour le scénario ADA, et quasi inexistante pour SCT (Figure 12). Pour ADA, ce sont essentiellement les peuplements mixtes en forêt privée qui voient leur surface terrière diminuer. La surface terrière des polygones gérés est légèrement croissante en forêt publique (sauf ADA), la diminution se faisant essentiellement en forêt privée.

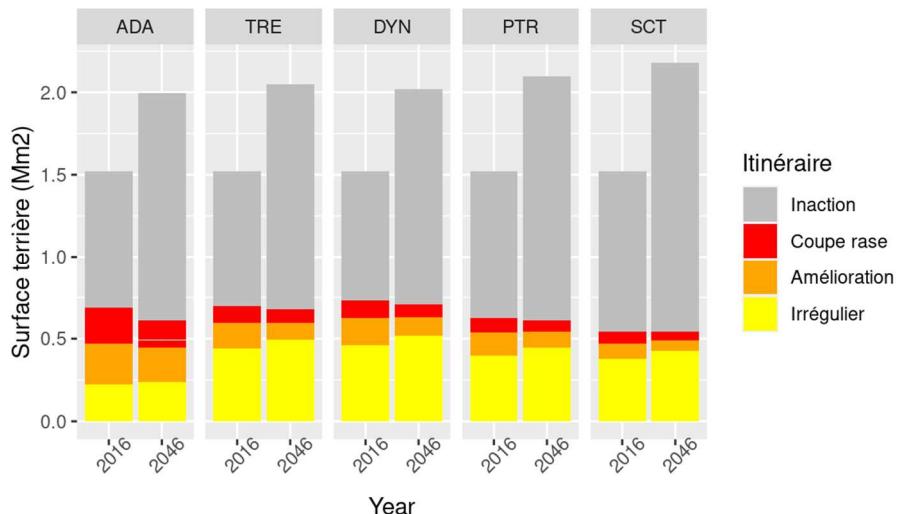


Figure 12 : évolution de la surface terrière

4.4.2. Services écosystémiques

Le calcul des services écosystémiques de production de bois et de stockage de carbone a été réalisé avec l'outil CAT [Pichancourt et al., 2018]. L'option choisie est « GIEC - Chêne, Hêtre, Epicéa, Sapin » pour les paramètres de biomasse.

Les calculs des autres services écosystémiques (prévention des avalanches, protection contre les chutes de bloc, prévention de l'érosion) se basent sur le mémoire de master de Vanneck Nzeta Kenne qui constitue le livrable 3.2A « Fonctions de lien pour le calcul de services écosystémiques » [Nzeta Kenne, 2019].

On constate de manière générale assez peu de différences entre les scénarios du point de vue des services écosystémiques, sauf stockage de carbone et récolte de bois, calculés à partir des résultats de simulation. La majeure partie du massif étant non gérée, les modifications de sylviculture s'appliquent sur une part minoritaire des forêts. Les différences de services écosystémiques entre les structures forestières qui en découlent étant également faibles, l'écart entre scénarios pour l'ensemble du massif est le plus souvent tenu. Cependant des différences plus conséquentes peuvent exister localement. Elles n'ont pas été étudiées dans le cadre du projet.

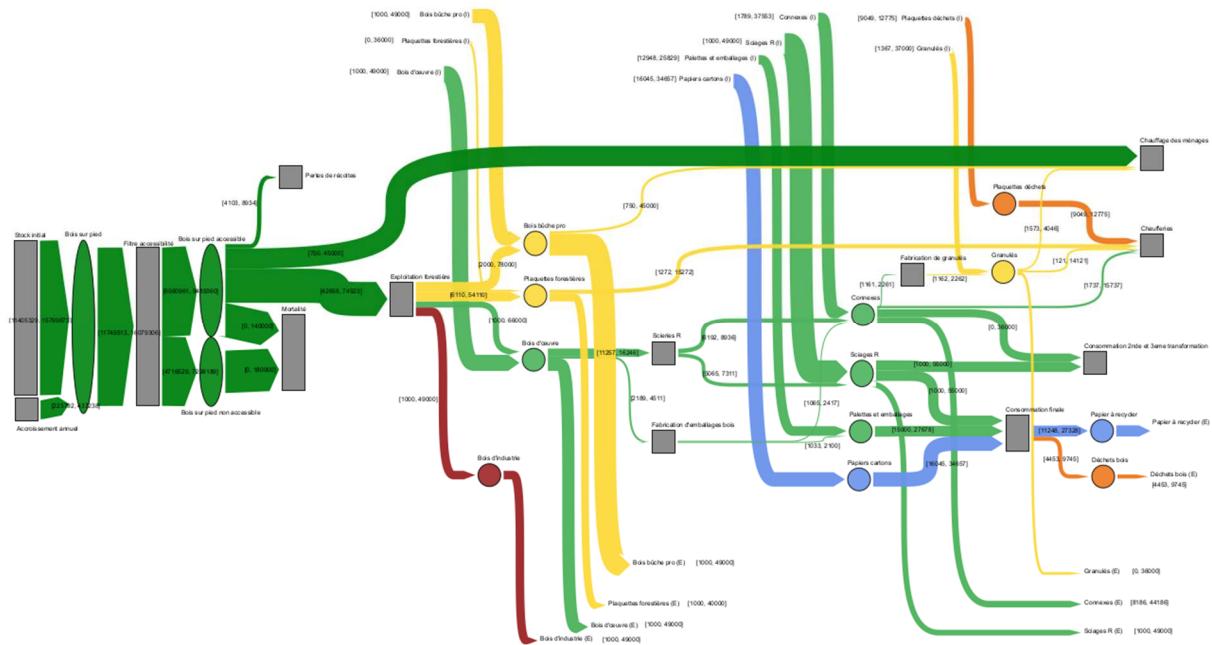


Figure 13 : diagramme de Sankey de la filière bois du massif des Bauges

4.4.2.1. Filière bois sur le territoire

Le calcul des flux de carbone avec l'outil CAT nécessite de modéliser la filière sur le territoire. Ce travail préalable a été effectué par un groupe d'étudiants d'AgroParisTech [Almeida Araujo et al., 2019], en collaboration avec Jean-Yves Courtonne et Quentin Devaux de l'INRIA. Leur rapport met en avant les difficultés pour reconstruire des flux détaillés sur un territoire aussi petit. Le diagramme de Sankey (Figure 13) obtenu avec la méthodologie du projet AF Filières montre d'importantes incertitudes. Considérant l'importance de ces incertitudes, il a été décidé de simplifier la filière du territoire (Figure 14). Tous les scénarios ont la même filière, sauf le scénario « Transition énergétique », qui oriente une part plus importante vers les utilisations bois-énergie. Les différences entre les scénarios sont donc attendues principalement du fait des variations de récolte en volume, essence et type de produits.

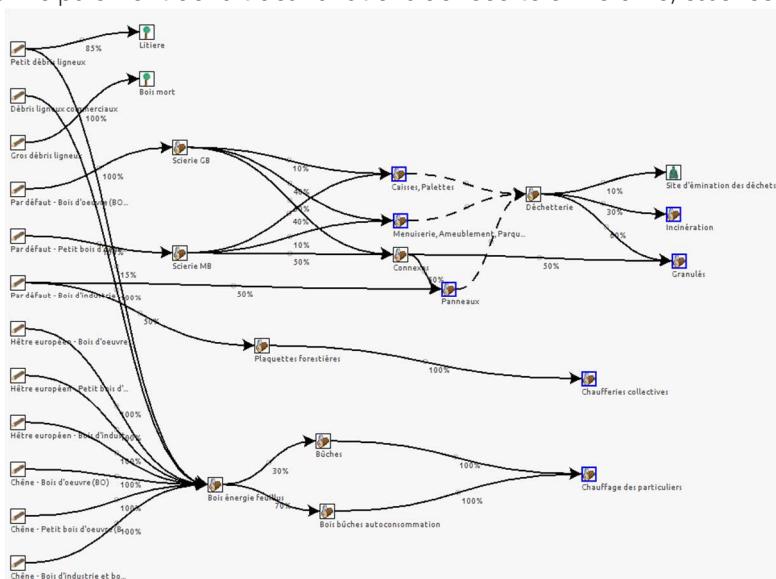


Figure 14 : schéma de la filière bois du territoire

4.4.2.2. Stocks et flux de carbone

La biomasse vivante en début de simulation est estimée à 23100 ktCO₂ pour une surface de 52600 ha, soit 439 tCO₂/ha. À titre de comparaison, le document « Profil climat air énergie du Massif des Bauges (PNR) » édité par l'Observatoire régional climat air énergie Auvergne-Rhône-Alpes [ORCAE 2021b], estime le stock de carbone à 13800 ktCO₂ pour 48400 ha de forêts, soit 285 tCO₂/ha. Dans ce calcul la surface forestière de référence est constituée par les classes 311, 312 et 313 de Corine Land Cover (2018), à laquelle est appliqué le ratio national de 285 tCO₂/ha (source : CLIMAGRI, ADEME) [ORCAE 2021a].

Le Tableau 5 présente le stock de carbone dans la biomasse vivante en fin de simulation (2046). Par rapport au scénario de référence, le scénario SCT a un stock supérieur de 5,1 %, alors que les autres scénarios ont un stock inférieur de 3,6 % (TRE) à 9,7 % (ADA).

Scénario	Biomasse vivante (MtCO ₂)	Biomasse vivante (tCO ₂ /ha)	Écart avec PTR
ADA	32.5	619	-9.7 %
TRE	34.7	660	-3.6 %
DYN	34.2	650	-5.1 %
PTR	36.0	685	0 %
SCT	37.8	720	+5.1 %

Tableau 5 : biomasse vivante en fin de simulation

Sur les trois premières années simulées dans le scénario PTR, le carbone séquestré annuellement par en forêt est de 10 tCO₂/ha/an, incluant la biomasse aérienne, la biomasse souterraine et la matière organique morte. Le ratio utilisé par ORCAE (2021a) pour les forêts de Savoie et Haute-Savoie est de 11,06.

L'évolution sur 30 ans des stocks est présentée sur la Figure 15, le scénario PTR constituant la référence. Le stock de carbone comporte les catégories suivantes :

- biomasse vivante (aérienne et souterraine) en forêt ;
- matière organique morte en forêt ;
- produits bois en usage (bois construction, bois emballage, bois énergie stocké, déchets de bois enfouis et encore non dégradés) ;
- déchets enfouis encore non dégradés ;
- déchets enfouis mais non dégradables.

La substitution maérielle et énergétique représente le stock de carbone non émis du fait de l'utilisation de produits bois à la place d'autres matériaux ou sources d'énergie.

Les émissions de gaz à effet de serre autre que le CO₂ au site d'enfouissement et lors de la combustion des produits bois sont également comptabilisées.

L'évolution est présentée en différentiel par rapport à un scénario de référence car les stocks initiaux ne sont pas connus (sauf biomasse vivante). Le total est la somme des différents stocks.

Pour une meilleure comparaison des scénarios, l'échelle des ordonnées n'est pas la même sur les différents graphiques. Le scénario ADA comporte des coupes sanitaires effectuées en début de simulation, qui se traduisent par un stock de carbone en matière organique morte et en produits en usage plus élevé en début de période.

Avec le scénario PTR comme référence pour la substitution maérielle et énergétique, le scénario SCT présente une substitution négative, alors que les autres scénarios, du fait de volumes récoltés plus importants, ont une substitution positive. La substitution pour le scénario ADA se fait principalement en début de période, la valeur cumulée en fin de période étant proche de celles des scénarios DYN et TRE.

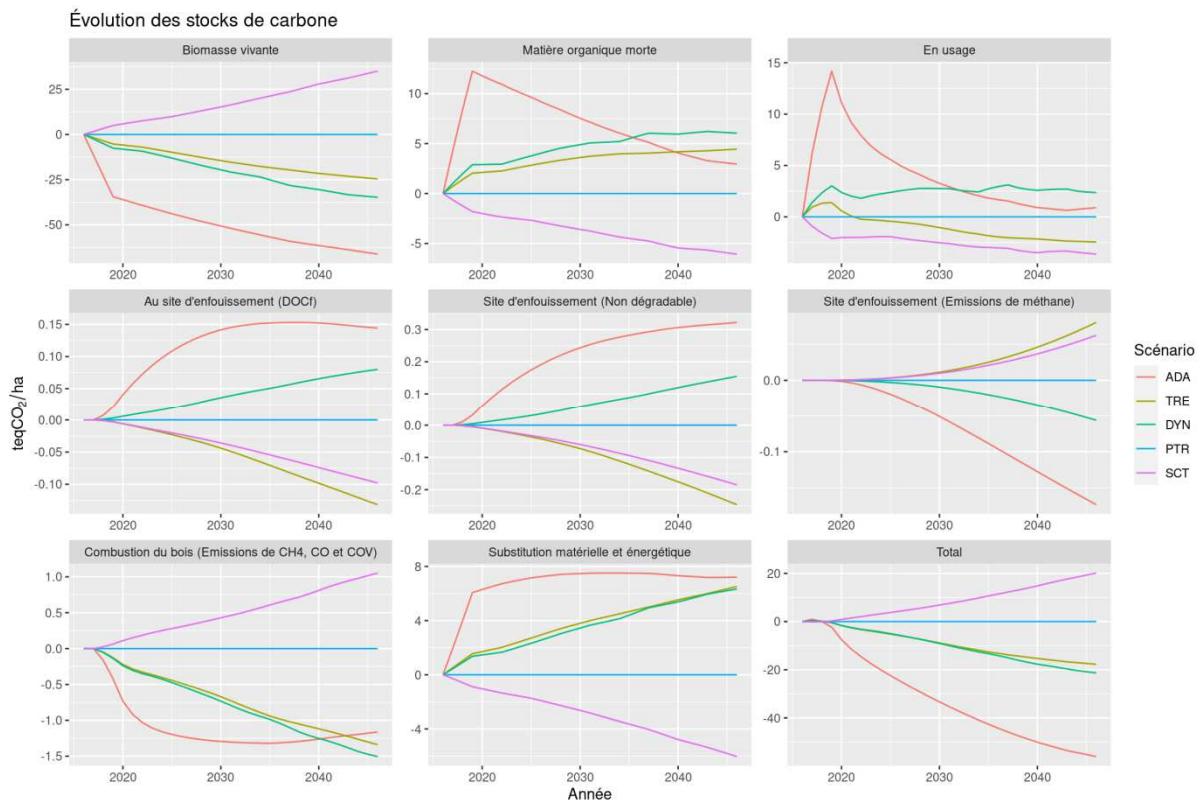


Figure 15 : évolution des stocks de carbone

Le scénario SCT a le meilleur bilan total sur 30 ans (carbone stocké et carbone "évité" par substitution), avec un bilan net de 20 tCO₂/ha par rapport à PTR, contre -56 pour le scénario ADA (Tableau 6). Le stockage de carbone en forêt semble être, à l'horizon 30 ans, la meilleure manière d'atténuer le changement climatique pour le territoire du PNR. L'interprétation de ce résultat doit cependant tenir compte des limites de l'étude (ex : non prise en compte d'une mortalité exceptionnelle liée à des événements extrêmes). Notons également que le stockage de carbone en forêt atteint une limite lorsque les forêts sont à l'équilibre sur un massif, alors que la substitution matérielle et énergétique est cumulative lorsque ce sont des énergies fossiles qui sont remplacées. Selon le mix énergétique de substitution, on peut donc se demander à quelle échéance temporelle les différences entre scénarios pourraient s'inverser.

Les émissions annuelles de GES sur le territoire du PNR sont de 328 ktCO₂/an, soit 9,8 MtCO₂ sur trente ans à rythme constant (ORCAE 2021b). L'écart de bilan entre les scénarios et PTR représente jusqu'à 30% de cette valeur.

Scénario	Écart avec PTR (teqCO ₂ /ha)	Écart avec PTR (MteqCO ₂)
ADA	-56	-2.9
TRE	-18	-0.9
DYN	-21	-1.1
PTR	0	0.0
SCT	20	1.1

Tableau 6 : écart de stock de carbone avec PTR en fin de simulation

4.4.2.3. Récolte de bois

La récolte annuelle de bois s'échelonne de 3 à 4,3 m³/ha/an, PTR étant à 3,6 (valeurs moyennes incluant les forêts non gérées, Figure 16). En moyenne sur la durée simulée, le scénario ADA est celui qui produit le plus grand volume de billons, principalement par une augmentation des catégories BIBE (bois d'industrie et bois énergie) et petit BO (bois d'œuvre). La répartition dans les différentes catégories est assez similaire pour les autres scénarios. Les scénarios DYN et TRE produisent plus de bois d'œuvre. Le scénario ADA produit plus de bois d'industrie et énergie, principalement par une augmentation en épicea. Les feuillus sont orientés uniquement vers le bois de feu. Le scénario TRE diffère des autres car une partie du résineux est orienté vers le bois énergie plutôt que l'ameublement.

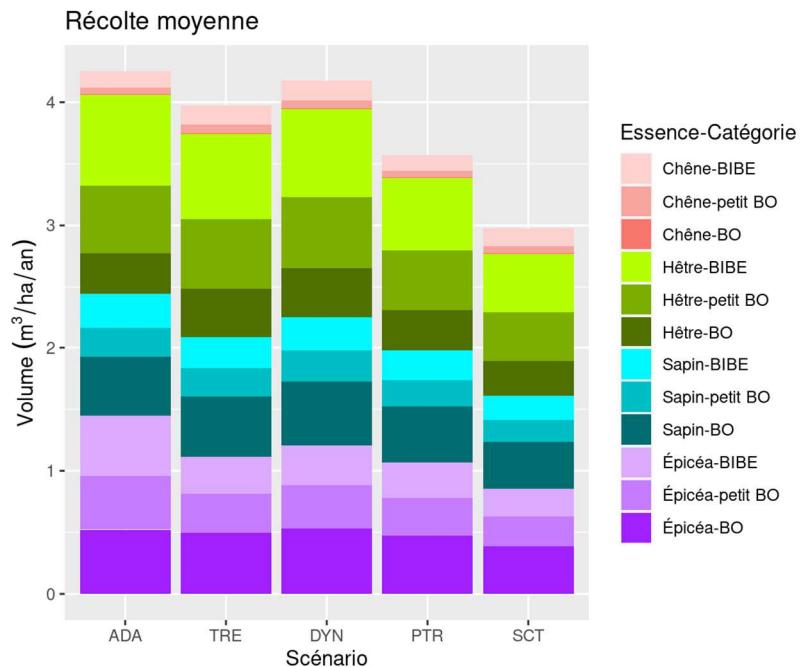


Figure 16 : récolte moyenne

4.4.2.4. Risques naturels

Les résultats et la méthodologie sont présentés plus en détail dans le livrable 3.1b « Résultat des simulations et comparaison des scénarios » [Monnet et al. 2021]

Concernant la **prévention des avalanches**, le scénario SCT a des peuplements avec des indices légèrement plus élevés, ADA légèrement plus faibles. Les différences restent minimes.

Pour la **protection contre les chutes de bloc**, le scénario ADA comporte par contre un peu plus de peuplements avec un haut indice de protection. Ceci est surprenant dans la mesure où ce scénario est celui où la récolte est la plus importante, cependant les peuplements concernés par l'intensification ne sont pas forcément ceux avec un rôle de protection. Le Tableau 7 présente le pourcentage des forêts de protection dans les trois classes de protection (haute, intermédiaire, faible), et l'écart en points de pourcentage par rapport au scénario PTR.

Scénario	Haute	Intermédiaire	Faible	Écart avec PTR - Haute	Écart avec PTR - Intermédiaire	Écart avec PTR - Faible
ADA	95.50	3.37	1.13	0.25	-0.21	-0.04
TRE	95.37	3.46	1.17	0.12	-0.12	0.00
DYN	95.29	3.49	1.22	0.04	-0.09	0.05
PTR	95.25	3.58	1.17	0.00	0.00	0.00
SCT	95.26	3.52	1.23	0.01	-0.07	0.06

Tableau 7 : protection contre les chutes de pierre

4.4.2.5. Prévention de l'érosion

La Figure 17 présente la perte de sol en masse en 2046 pour les différents scénarios par rapport au scénario PTR (base 100). Les résultats et la méthodologie sont présentés plus en détail dans le livrable 3.1b « Résultat des simulations et comparaison des scénarios » [Monnet et al. 2021]

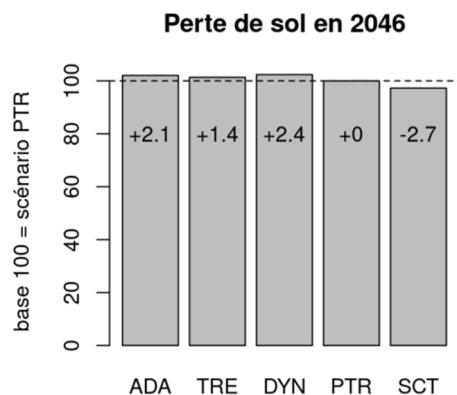


Figure 17 : perte de sol en masse en 2046 par rapport au scénario PTR

4.4.2.6. Biodiversité

L'étude est focalisée sur la flore vasculaire, qui n'est qu'un seul aspect de la biodiversité. Par ailleurs, le modèle de biodiversité calculé à partir des placettes IFN n'intègre que la surface terrière comme variable de peuplement, pour estimer l'indice de Shannon de la diversité de la flore herbacée. Le coefficient associé à cette variable étant négatif, on constate dans les scénarios une diminution globale des valeurs de l'indice lorsque les peuplements ont tendance à se capitaliser. Ce mode d'évaluation est donc peu pertinent. Une perspective intéressante, mais en dehors de PROTEST, serait d'aborder le sujet à l'échelle du territoire (i.e. la biodiversité au sein d'un peuplement, versus la diversité des peuplements d'un territoire). Les données produites par les simulations permettraient en effet de s'intéresser à la mosaïque paysagère, aussi l'utilisation d'indices spatiaux paraît prometteuse, mais cela n'a pas pu être effectué dans le temps du projet. En revanche, un des objectifs du projet [I-MAESTRO](#) [I-MAESTRO, 2021] est l'évaluation à différentes échelles de ce type d'indicateurs. Un package R a été développé pour répondre à cette question, et les résultats d'I-Maestro intégreront ces aspects.

4.4.3. Compromis entre services

4.4.3.1. Stockage de carbone et production de bois

La Figure 18 présente les écarts des flux de carbone cumulés en 2046 dans les différents compartiments (intégrant stockage de carbone en forêt et dans les produits bois et émissions fossiles évitées par substitution) ainsi que la récolte de bois, pour chaque scénario par rapport au scénario PTR. Sur la période simulée de 30 ans, la mobilisation supplémentaire de bois se fait au détriment du stockage de carbone en forêt et l'augmentation du stockage de carbone dans les produits bois et les émissions fossiles évitées par substitution ne compensent que partiellement cet effet. Les chiffres sont rappelés dans le Tableau 8 (carbone en forêt : biomasse vivante et matière organique morte ; produits bois en usage : produits en usage et fraction dégradable des produits enfouis ; autres : fraction enfouie non dégrable et émissions de gaz à effet de serre hors CO₂ par combustion ou au site d'enfouissement). ADA et DYN présentent des écarts de récolte similaire mais ADA stocke moins de carbone en forêt, probablement du fait d'une récolte additionnelle via un prélèvement plus fort. TRE a un effet de substitution similaire malgré une récolte inférieure, cependant le stock dans les produits en usage est beaucoup plus faible.

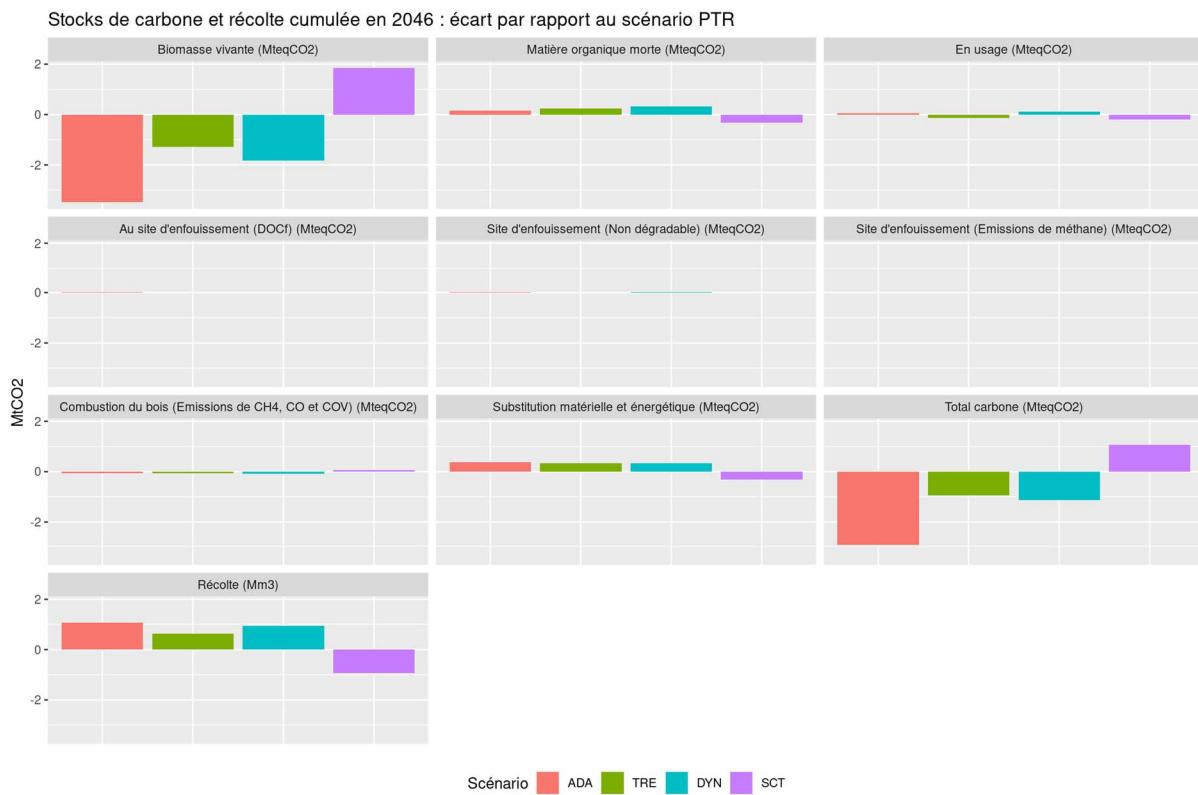


Figure 18 : stocks et récolte cumulée en 2046, écarts par rapport au scénario PTR

Carbone en forêt (MteqCO ₂)	Produits bois en usage (MteqCO ₂)	Substitution matérielle et énergétique (MteqCO ₂)	Autres (MteqCO ₂)	Total carbone (MteqCO ₂)	Récolte (Mm ³)
ADA	-3.33	0.05	0.38	-2.95	1.07
TRE	-1.06	-0.14	0.34	-0.93	0.63
DYN	-1.51	0.13	0.33	-1.12	0.95
SCT	1.52	-0.20	-0.32	1.06	-0.94

Tableau 8 : écarts de stocks et de récolte par rapport au scénario PTR

Si l'on compare ce bilan global et la récolte cumulée pour le scénario ADA, pour chaque m³ récolté en plus par rapport au scénario PTR, 2,8 teqCO₂ en moins sont stockées (Tableau 9). Pour le scénario SCT, pour chaque m³ récolté en moins, 1,1 tonnes de CO₂ sont stockées en plus. Ces chiffres ne doivent pas être comparés directement avec des coefficient de conversion ou de substitution car ils sont calculés à partir du ratio des écarts avec PTR.

Carbone en forêt	Produits bois en usage	Substitution matérielle et énergétique	Autres	Total carbone
ADA	-3.12	0.05	0.36	-2.76
TRE	-1.69	-0.22	0.55	-1.48
DYN	-1.59	0.14	0.35	-1.18
SCT	-1.62	0.21	0.34	-1.13

Tableau 9 : ratio des écarts de stock et récolte (teqCO₂/m³)

4.4.3.2. Érosion et production de bois

Par rapport au scénario PTR, l'augmentation de production de bois engendre une augmentation de la perte de sol. Pour un m³ supplémentaire récolté, une perte additionnelle de 5,2 à 6,6 kg de sol est estimée. La valeur est plus faible dans le scénario ADA car l'exploitation est augmentée dans des zones peu sujettes à l'érosion. Dans le scénario SCT, l'érosion diminue de 7,7 kg pour chaque m³ non récolté. Les chiffres sont rappelés dans le Tableau 10.

Écart de récolte (m ³ /ha/an)	Écart de perte de sol (kg/ha/an)	Ratio récolte/perte de sol (kg/m ³)
ADA	0.7	3.5
TRE	0.4	2.3
DYN	0.6	4.0
SCT	-0.6	-4.6

Tableau 10 : compromis érosion / récolte, écart par rapport au scénario PTR

4.4.3.3. Impact paysager de la gestion

Si le volume moyen récolté change peu entre les scénarios, il a été montré auparavant que des différences existent dans la répartition des intensités d'exploitation. Le scénario ADA qui comporte plus de peuplements gérés en régulier engendre ainsi une augmentation de 42% des coupes de plus 200 m³/ha. Selon la localisation de ces coupes, un effet paysager important pourrait être ressenti par les habitants du territoire.

4.4.3.4. Autres services écosystémiques

Pour les autres services, les différences sont très faibles au niveau agrégé. Une analyse spatialisée pourrait être menée afin de voir si des interactions sont remarquables au niveau local.

5. Valorisation

La valorisation du projet a porté sur deux aspects complémentaires : les résultats, à destination des acteurs du territoire, et les outils et méthodes, à destination des chercheurs et gestionnaires.

5.1. Valorisation des résultats sur le territoire

Le PNR du Massif des Bauges a tenu à ancrer le projet dans le territoire et a joué le rôle de relais entre les partenaires du projet et les acteurs locaux. Des échanges réguliers ont été organisés afin que le projet bénéficie de l'expertise des acteurs et que les actions du projet soient pertinentes pour le territoire et valorisées efficacement.

5.1.1. Communication autour du projet

Le projet et son avancement ont été présentés aux acteurs lors de deux présentations organisées à la maison du PNR le 6 février 2018 et le 26 mars 2019. Une restitution finale a eu lieu le 13 décembre 2021.

Un stand présentant le projet a été tenu lors de la fête du bois et de la forêt les 29 et 30 septembre 2018 à Thorens-Glières (Haute-Savoie).

Le site internet <https://protest.inrae.fr/> présente le projet, et a été actualisé régulièrement avec les avancées et résultats. Il constitue le livrable 4.1A « site internet avec service cartographique » [Maldonado et Monnet, 2018]. Une page permet d'accéder à l'ensemble des documents du projet (<https://protest.inrae.fr/rapports/>).

5.1.2. Observatoire permanent

L'inventaire de placettes forestières sur le terrain était nécessaire pour la cartographie des forêts par LiDAR aéroporté. Afin que cet effort de terrain conséquent ne soit pas à usage temporaire, une concertation a été menée entre les partenaires du projet et les acteurs forestiers pour que le protocole de mesure permette d'une part de valoriser les données sur long terme et d'autre part une analyse qui ne se cantonne pas au volume de bois mobilisable.

Il a donc été décidé de partir du protocole qui était en cours de mise en place par l'ONF pour l'observatoire des forêts de Savoie, afin de garantir un socle de base homogène. À ce protocole a été ajoutée la mesure des bois morts au sol, pour permettre des analyses de biodiversité et de maturité des forêts.

Afin de garantir la représentativité des placettes mesurées, il était nécessaire d'échantillonner dans les forêts privées et publiques. L'ONF R&DI était relais auprès des propriétaires publics. Pour les propriétaires privés, le PNR a été garant de la transparence du processus d'inventaire :

- des arrêtés préfectoraux ont été pris pour définir les conditions d'accès en forêt privée,
- une information a été faite par affichage en mairie et par courrier aux propriétaires des parcelles concernées par les mesures, grâce à un recouplement fait par la Chambre d'Agriculture,
- les 6 parcelles dont les propriétaires ont notifié le refus d'inventaire n'ont pas été visitées,
- les 6 propriétaires qui l'ont demandé ont reçu un descriptif des données relevées sur la placette située dans leur parcelle.

Les données mesurées ont été agrégées en une base de données (livrable 1.1 « Base de données de relevés forestiers », [Combaz-Deville et al., 2021]). Celle-ci a fait l'objet d'une analyse par un groupe d'étudiants AgroParisTech [Charlet et al., 2018].

5.1.3. Cartographie de la ressource et de l'accessibilité

Un article de vulgarisation présentant l'intérêt de la télédétection aéroportée pour la gestion des forêts de montagne a été publié dans la revue Sciences, Eaux et Territoires [Monnet et al., 2020].

5.1.3.1. Conditions de diffusion

Un groupe de travail a été mis en place pour définir les conditions de diffusion des cartographies forestières. Le descriptif de ce travail et les préconisations émises font l'objet du livrable 4.2B « Comité de valorisation des données et cartes forestières LiDAR » [Carrette et De Morogues, 2021]. Les principaux éléments sont résumés dans ce paragraphe.

Pour réussir l'introduction et l'appropriation des techniques de télédétection appliquées à la gestion des forêts, il est nécessaire de prendre en compte les attentes et la dynamique des acteurs. En effet, l'information produite sur la ressource et ses conditions de mobilisation est très précise géographiquement, de l'ordre de l'infra parcelle. Son croisement avec d'autres données offre un outil d'aide à la décision performant notamment en termes de prospection.

Cependant, des craintes sur les conséquences de l'utilisation de ces informations sont émises par des acteurs notamment des propriétaires forestiers. Ces craintes constituent un frein à la valorisation de ces données notamment quant à la mutualisation nécessaire pour l'acquisition des données et peuvent bloquer le développement de l'utilisation des techniques de télédétection.

L'objectif de cette tâche était d'objectiver les craintes, trouver des solutions pour les réduire et proposer des solutions à mettre en œuvre par le PNR du Massif des Bauges pour la diffusion des données.

Pour atteindre ces différents objectifs, la méthode retenue est la co-construction avec les acteurs locaux du PNR des Bauges. Il s'agit d'identifier, avec un ensemble d'acteurs divers dans leur relation à la forêt, les enjeux et points de vigilances associés à l'existence d'une information à la dimension infra parcellaire, et formuler des recommandations pour sa diffusion. Pour tenir compte des diversités de connaissance des différentes techniques de télédétection d'une part et pour faciliter la mobilisation des participants d'autre part, il a été créé deux groupes de travail, l'un regroupant les opérateurs institutionnels, et l'autre constitué des usagers opérationnels.

La méthode mise en œuvre s'articule en trois étapes en entonnoir :

1. Créativité, février 2020 (session Post it) : objectiver les attentes, craintes et vigilances quant à la diffusion de données de télédétection.
2. Ateliers solutions sur les thématiques issues de la créativité, janvier 2021 (session World café en visioconférence) : produire des idées de « solutions » pour concilier les attentes et craintes par thème et donner ainsi de la matière pour rédiger des recommandations
3. Rédaction de recommandations, février 2021 (FCBA)

Les principales conclusions sont les suivantes.

Les acteurs, y compris les professionnels qui n'ont pas encore la compétence pour bénéficier pleinement des données de télédétection, ont bien conscience des facilités qu'apportent ces technologies mais expriment aussi des craintes et présentent des points de vigilances. Ils expriment leurs attentes pour une régulation de la production et de la diffusion de ces données de télédétection :

- L'acquisition des données de télédétection est une mission des pouvoirs publics, elles doivent être en open data ;
- Le propriétaire forestier a le droit à la confidentialité sur l'état de son patrimoine et de sa valorisation ;
- Sous réserve de la confidentialité, une offre de services peut valoriser les données pour un usage interne (coopératives, gestionnaires, syndicats, associations, ...) ou commercial ;
- La gouvernance doit :
 - être vue comme neutre ;
 - garantir la cohérence technique (définitions, interopérabilité, mise à jour...) ;
 - définir les services génériques et informations à diffuser ;

- se fixer une obligation de résultats quant aux usages des informations ;
 - doit être apprenante (observatoire des usages, identifier les risques, ...).

Ces prescriptions générales trouvent une application concrète dans les recommandations pour la diffusion des données du projet PROTEST :

- Le respect de la confidentialité du patrimoine forestier reste un principe de base pour la diffusion : Simple visualisation de cartes sans outils de mesures
 - Serveur internet <https://protest.inrae.fr/webgis/>
 - Atlas forestier à l'échelle communale
 - Protéger les propriétaires d'une pression d'acteurs commerciaux tout en permettant une exploitation de ces données pour un intérêt général.
 - Acteurs publics ou hors commerce pris en charge par le PNR
 - Acteurs du monde marchand pris en charge par la chambre d'agriculture (l'accès est sous réserve de l'accord du propriétaire)
 - Gouvernance et contrat de mise à disposition des données : Une gouvernance constituée d'un collectif d'acteurs territoriaux ad hoc : ONF, Chambre d'agriculture, CRPF, COFOR, associations sylviculteurs, ...

5.1.3.2. Serveur cartographique

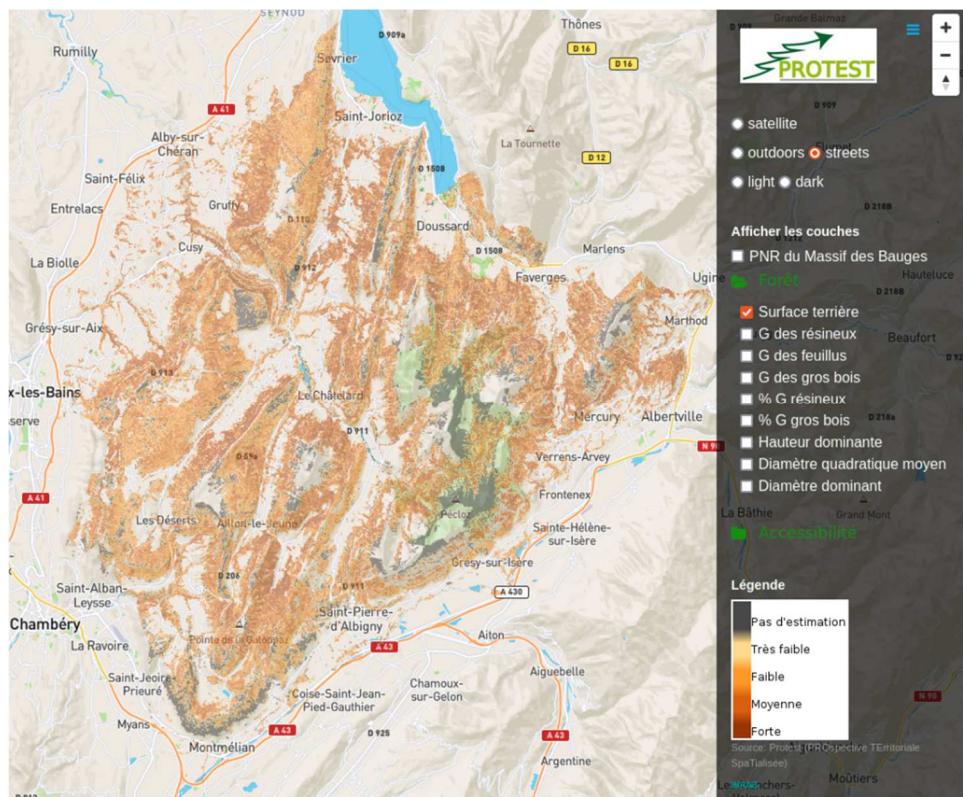


Figure 19 : capture d'écran du serveur cartographique PROTEST

Conformément aux recommandations issues du groupe de travail sur la diffusion, un serveur permettant l'affichage des cartographies de la ressource et de l'accessibilité (Figure 19) a été mis en ligne sur la page <https://protest.inrae.fr/webgis/>.

Les données visualisables sont celles des livrables 1.2B « Cartographie de la ressource forestière à haute résolution » et 1.3A « Cartographie de l'accessibilité des forêts du PNR du Massif des Bauges ». Un fond de carte OpenStreetMap permet de se repérer géographiquement.

5.1.3.3. Sémantique des cartes

Le grand public n'est pas habitué à visualiser des données forestières sur la ressource ou l'accessibilité au format raster. Par ailleurs les premières cartes de ce type, produites par différents organismes, adoptaient des codes couleurs différents, ce qui rend leur appropriation plus difficile par les utilisateurs. Un travail sur la sémantique des cartes a donc été entrepris par Basile Boccon-Gebeaud, lors de son stage de Master 2 Géographie encadré par FCBA. Les principales informations à faire figurer et les codes couleurs associés ont fait l'objet de recommandations [Boccon-Gebeaud, 2019].

5.1.3.4. Atlas forestier

Un atlas forestier à l'échelle communale a été produit par le PNR du Massif des Bauges [PNR du Massif des Bauges, 2021]. Cet atlas constitue le livrable 4.1B du projet. L'objectif est d'informer les élus et citoyens des enjeux liés aux forêts de leur commune. L'atlas comporte 7 cartes thématiques : composition des forêts, accessibilité pour l'exploitation forestière, capital sur pied de la ressource bois (Figure 20), propriété forestière, rôle de protection de la forêt face aux risques naturels, activités de loisirs en forêt, enjeux de la biodiversité en forêt. Les trois premières sont issues des résultats du projet.

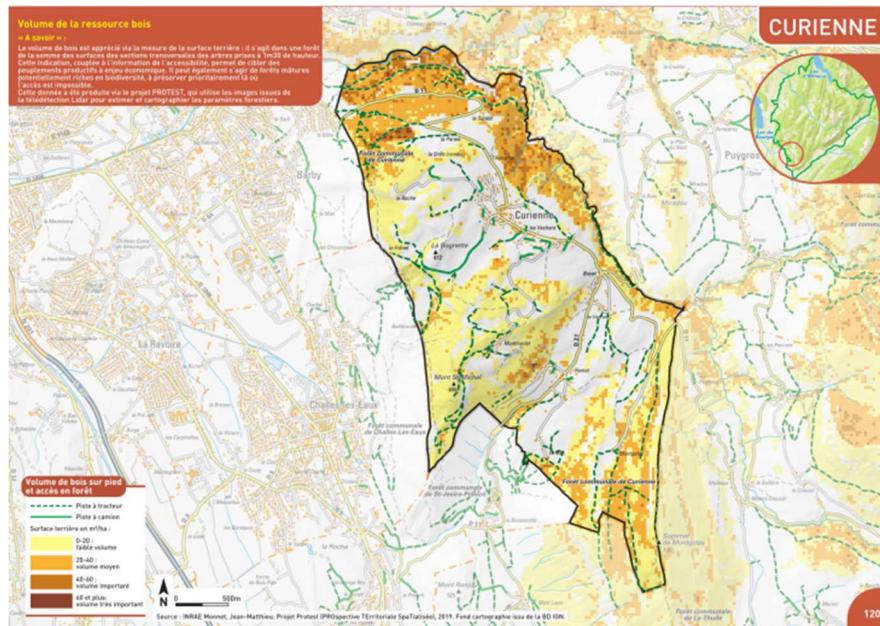


Figure 20 : extrait du projet d'atlas communal (carte de volume pour la commune de Curienne)

En décembre 2021, l'atlas a été envoyé par courrier à chacune des 65 communes du PNR, dans un envoi commun avec l'atlas du projet Métis réalisé par les communes forestières. Le courrier d'accompagnement fait apparaître les contacts suivants : COFOR, ONF, PNR du Massif des Bauges.

5.1.4. Démarche prospective

Les premiers éléments concernant les scénarios prospectifs de gestion forestière ont été présentés lors de la réunion préparatoire à la révision de la charte du PNR du Massif des Bauges le 19 septembre 2019. Les participants ont été invités à réagir par rapport à ces scénarios, au regard des objectifs forestiers du territoire.

5.2. Valorisation des méthodes et outils

Afin de pouvoir reproduire la méthodologie mise en œuvre, il faut que soient simultanément disponibles : les données, les outils et les compétences. Le projet PROTEST a essayé autant que possible de s'appuyer sur des données publiques et disponibles sur l'ensemble du territoire métropolitain. De même l'utilisation et le développement d'outils libres a été privilégié, et un effort particulier a été fait pour documenter les procédures et chaînes de traitement mises en œuvre.

5.2.1. Disponibilité des données

5.2.1.1. Plan LiDAR HD

Le LiDAR aéroporté est une donnée précieuse pour inventorier la ressource forestière et son accessibilité sur un territoire. Ces données restent cependant onéreuses, et leur utilisation dans la filière forestière était limitée par une disponibilité hétérogène sur le territoire. En 2020 l’Institut national de l’information géographique et forestière (IGN) a annoncé coordonner le programme LiDAR HD financé dans le cadre du plan de relance, et dont l’objectif est de couvrir l’ensemble du territoire métropolitain par des données LiDAR haute densité (10 points par mètre carré) en 5 ans. Il est prévu que les données soient diffusées en open data.

5.2.1.2. Données publiques de l’IGN

L’IGN a récemment mis en téléchargement libre les principales données nécessaires à la méthodologie : BD Forêt v2 et BD TOPO. La BD Forêt définit la surface forestière de référence et permet de catégoriser les peuplements.

Il n’existe pas d’information homogène sur la desserte forestière au niveau France. Les données sont disséminées dans différents organismes et ne sont pas forcément à jour. Leur exactitude spatiale et sémantique est également très variable. Il est cependant possible d’utiliser la BD TOPO comme base pour constituer une information de desserte pour la cartographie de l’accessibilité. La consultation en libre accès de la BD ORTHO et du Scan 25 est une aide précieuse pour affiner la classification des linéaires de la BD TOPO selon leur utilisation forestière.

5.2.1.3. Données de l’Inventaire Forestier National

Les données des placettes relevées dans le cadre de l’Inventaire Forestier National sont disponibles sur l’ensemble du territoire français, et peuvent être utilisées pour produire des statistiques ou pour la modélisation dès lors que le territoire considéré est assez grand pour contenir un nombre suffisant de points. Elles sont notamment utilisées dans le projet pour modéliser la fertilité par essence. Leur valorisation pourrait être encore plus poussée si une solution pour l’utilisation de l’information de leur localisation précise était envisageable. D’une part cela permettrait d’opérer des croisements plus précisément avec les données biophysiques en vue de la modélisation de la fertilité, et d’autre part il serait possible de limiter le nombre de relevés de terrain additionnels (qui représentent un coût important) pour la modélisation préalable à la cartographie de la ressource par LiDAR.

5.2.2. Cartographie par télédétection LiDAR

5.2.2.1. Outils et méthodes

Les ressources suivantes sont disponibles en vue de la réplication de l’analyse à d’autres territoires.

Le livrable 1.1 « Base de données de relevés forestiers » [Combaz et al., 2021] présente **l’échantillonnage et le protocole de relevés de terrain** pour la constitution des placettes de référence.

Au cas où une acquisition LiDAR devrait être réalisée sur mesure, le livrable 1.2A « Acquisition de données lidar sur le PNR du Massif des Bauges (74) » [Munoz et Paccard, 2019] comporte un exemple de **cahier des charges et une procédure de réception des données LiDAR**.

Le livrable 1.2B « Cartographie de la ressource forestière à haute résolution » [Munoz, 2019] présente la méthode mise en œuvre par l’ONF pour la **modélisation et la cartographie par télédétection LiDAR**. La chaîne de traitement fait appel :

- à Computree (<http://computree.onf.fr/>), une plateforme de traitement de nuages de points 3D issus de capteurs LiDAR ou de traitements photogrammétriques [Piboule et al., 2013]. Elle vise à regrouper des algorithmes pour l’analyse de scènes forestières, afin d’extraire des données sur la structure des arbres et des peuplements. Elle est gérée par le groupe Computree, composé du GIP ECOFOR, de l’ONF, de l’IGN, de INRAE et de l’Université de Sherbrooke. Computree est modulaire, les algorithmes étant regroupés dans des plugins développés indépendamment et elle est ouverte : le cœur du système est sous licence GPL/LGPL mais la licence de chaque plugin est laissée au libre choix de son développeur.

- au logiciel libre R pour les phases de modélisation statistique.

Le document [Monnet, 2019] décrit la méthode employée pour la **modélisation et cartographie par télédétection LiDAR** qui a servi à initialiser les peuplements pour la simulation d’évolution forestière. Elle utilise le package lidaRtRee du logiciel libre R. Des tutoriels et données permettant de mettre en œuvre différentes **analyses forestières à partir de données LiDAR aéroporté** [Monnet, 2021] ont été préparés dans le cadre du projet PROTEST. Ils sont téléchargeables sur le site <https://gitlab.irstea.fr/jean->

matthieu.monnet/lidartree_tutorials/-/wikis/home. Pour des raisons de confidentialité, ce sont des relevés forestiers plus anciens, situés sur une autre zone, qui sont fournis pour illustrer les chaînes de traitement. Ces scripts ont servi de support pour le TD « Cartographie des forêts par LiDAR aéroporté » qui a eu lieu pendant l'École d'été AnaEE France 2021 « La télédétection pour l'étude des écosystèmes terrestres ».

5.2.2.2. Recherche

En complémentarité du développement d'outils et de la rédaction de ces méthodologies, des travaux de recherche ont également été menés dans le cadre du projet, dans une perspective de progression des connaissances et d'amélioration des outils et méthodes.

L'UMR TETIS a publié deux articles scientifiques. Le premier étudie l'influence des paramètres d'acquisition LiDAR et de données forestières sur la précision des cartographies qui en sont dérivées [Bouvier et al., 2019]. Le second s'intéresse à l'effet de l'angle de scan du LiDAR aéroporté sur les indicateurs qui caractérisent la végétation [Dayal et al. 2020]. Ces éléments permettront d'émettre des préconisations pour la réalisation future d'inventaires forestiers assistés par LiDAR.

Sylvie Durrieu et Dino Ienco (UMR TETIS) ont encadré le stage de master 2 de Florian Teste, qui a évalué la fusion de données Sentinel et LiDAR aéroporté pour la caractérisation des types de couverts forestiers [Teste, 2021]. Cette étude montre l'intérêt des séries temporelles Sentinel-2 pour déterminer la composition spécifique des peuplements, apportant ainsi une complémentarité aux données LiDAR.

Un travail complémentaire à ce travail a été mené par Kamel Lahssini lors de son travail de master professionnel. Il a évalué l'apport des méthodes d'apprentissage profond (deep learning) pour la fusion de données lidar aéroporté et sentinel-2 pour la caractérisation de la ressource forestière [Lahssini, 2021]. Un article présentant une synthèse des résultats a été soumis [Lahssini et al., *soumis*].

5.2.3. Cartographie de l'accessibilité

Le logiciel Sylvaccess et son guide d'utilisation [Dupire, 2021] sont disponibles à l'adresse https://gitlab.com/SDupire/sylvaccess_public. Le livrable 1.3A « Cartographie de l'accessibilité des forêts du PNR du Massif des Bauges » détaille sa mise en œuvre pour la cartographie de l'accessibilité sur un territoire comme le PNR du Massif des Bauges [Monnet et al., 2021].

5.2.4. Démarche prospective

La démarche prospective est présentée et détaillée dans son application au territoire du PNR dans le mémoire de stage d'Aubéline Bellom [2019], qui constitue le livrable 2.1AB « Analyse du contexte socio-économique ».

5.2.5. Simulation d'évolution forestière à partir de données terrain et LiDAR

Les différentes étapes permettant la simulation forestière et l'analyse des résultats sont détaillées dans les livrables et rapports produits dans le cadre du projet.

5.2.5.1. Préparation des données

Initialisation des caractéristiques biophysiques des peuplements : livrable 3.1A « Initialisation des peuplements forestiers » [Aussenac et al., 2021b].

Initialisation des itinéraires sylvicoles : livrable 2.3 « Méthode d'initialisation de la gestion forestière » [Aussenac et al., 2021c].

5.2.5.2. Réalisation des simulations

Le modèle Salem auquel fait appel SIMMEM pour simuler l'évolution de chaque peuplement est présenté dans un article scientifique rédigé dans le cadre du projet [Aussenac et al., 2021a].

5.2.5.3. Analyse des simulations

Un travail préalable pour l'identification des fonctions permettant de faire le lien entre les caractéristiques dendrométriques des peuplements et les services écosystémiques qu'ils fournissent est présenté dans le mémoire de Master de Vanneck Nzeta-Kenne [2019] qui constitue le livrable 3.2A « Fonctions de lien pour le calcul des services écosystémiques ».

Le résumé et la comparaison des résultats des simulations, incluant le calcul des services écosystémiques, sont détaillés dans le livrable 3.1B [Monnet et al., 2021].

6. Discussion et perspectives

6.1. Difficultés et valeur ajoutée du pluridisciplinaire

Le projet PROTEST avait l'ambition d'articuler des données et méthodes provenant de thématiques aussi diverses que la télédétection, la simulation d'évolution forestière et la démarche prospective territoriale. L'enjeu final était de tirer parti de la complémentarité de ces approches pour proposer et mettre en œuvre une méthodologie globale cohérente de prospective territoriale spatialisée.

Si les différents composants étaient individuellement assez aboutis, car déjà testés séparément dans des projets précédents, leur assemblage a été quelquefois complexe.

Tout d'abord les composantes provenaient de thématiques de recherche différentes, un travail important d'interconnaissance a été nécessaire pour comprendre les points de vue et attentes de chacun. Par exemple les chercheurs en simulation d'évolution forestière ou en modélisation technico-économique visent à reproduire précisément la réalité afin de prédire de nouvelles situations. Dans PROTEST la précision des simulations n'était pas une fin soi, la valeur ajoutée de la méthodologie résidait plutôt dans le processus de réflexion sur les facteurs d'évolution du territoire et leur impact sur les forêts. Le focus était donc à porter sur la capacité à mettre en image des évolutions cohérentes mais contrastées du territoire.

Une fois fixés les objectifs de la méthodologie d'ensemble, il a fallu connecter les différentes composantes, notamment :

- extraire des cartographies LiDAR, les caractéristiques initiales des peuplements pour le simulateur ;
- traduire les scénarios par une répartition spatiale de la sylviculture sur le territoire et par des règles sylvicoles pour le simulateur.

Par exemple la résolution spatiale LiDAR se traduit par une quantité importante de données, qu'il a fallu agréger par peuplement. Par contre elle manque de précision sur la composition en essence. Des procédures ont été développées pour créer cette information à partir des relevés de terrain et des informations LiDAR. La donnée a été selon les cas soit simplifiée, soit enrichie via des procédures quelquefois complexes.

Quelles que soient les données dont on dispose et la sophistication des modèles de simulation forestière, il est impossible de rendre compte de la complexité des peuplements et situations de gestion d'un territoire forestier tel que le PNR du Massif des Bauges. Les peuplements ont donc été placés dans un nombre limité de catégories croisant essences principales et propriété et ensuite affectés dans un nombre limité d'itinéraires sylvicoles figés. Si cette catégorisation est schématique, sa distribution sur le territoire se veut réaliste car elle s'appuie sur les cartographies issues de télédétection. Les réflexions sur les scénarios prospectifs peuvent s'affiner en intégrant la question de leur mise en œuvre différenciée spatialement au sein du territoire.

L'équilibre entre complexité et simplification semble donc avoir permis d'articuler de manière cohérente plusieurs composantes qui, au-delà de leurs intérêts séparés, confèrent à l'ensemble de la méthodologie une valeur ajoutée pour l'analyse prospective de territoires forestiers.

6.2. Réplicabilité de la méthodologie

La mise en œuvre de la méthodologie sur le territoire forestier complexe du PNR du Massif des Bauges, ainsi que les interactions avec les acteurs ont permis de mieux adapter les résultats aux attentes d'un territoire.

Si certaines étapes de la méthodologie s'appuient sur des outils finalisés et des compétences transférables, le projet a montré que d'autres étapes doivent être effectuées sur des outils en développement et nécessitent des connaissances expertes.

La cartographie de la ressource et de l'accessibilité se base maintenant (ou à court terme) sur des données publiques, des outils disponibles et des savoir-faire répandus dans la filière bois française (IGN, ONF, entreprises de services). Les préconisations de diffusion des données et cartes produites seront également utiles aux institutionnels pour préparer les conditions d'accès aux données.

La démarche prospective a nécessité l'encadrement de chercheurs mais avec une mise en œuvre légère (un stage de master 2).

L'étape de simulation forestière reste la plus délicate à transférer.

La fertilité locale des parcelles forestières est une composante essentielle de la description d'un territoire. Dans les zones très homogènes, l'incidence est faible. En revanche, dans des zones montagneuses comme le PNR du Massif des Bauges, la fertilité des stations varie fortement avec le milieu, suivant par exemple l'altitude ou l'exposition. Des avancées ont été réalisées dans le projet PROTEST, mais une généralisation reste encore nécessaire pour que la démarche puisse être facilement transférable.

L'outil SIMMEM était au départ pensé comme un agrégateur de différents modules de croissance, avec une interface graphique permettant de gérer une multitude de peuplements. Ces avantages se révèlent finalement contraignants. L'intégration de différents modules est complexe et pose la question des droits de diffusion lorsque certains modules ne sont pas libres. L'utilisation d'une interface limite le nombre de peuplements qu'il est possible de simuler et les possibilités d'interaction. Pour ces raisons, il paraît plus judicieux de s'orienter vers une utilisation directe du modèle générique Salem, et de gérer les simulations d'un ensemble de peuplements par des scripts. L'utilisation directe de Salem n'était pas disponible au démarrage du projet dans la mesure où ce modèle n'intégrait qu'un nombre limité de situations forestières. Ses développements récents permettent désormais de l'utiliser dans un nombre bien plus large de situations. C'est l'orientation qui a été prise dans le projet I-MAESTRO, qui poursuit les travaux entamés dans PROTEST sur la simulation d'évolution forestière.

6.3. Comparaison des scénarios

L'objet principal du projet était l'assemblage d'outils de nature variée plutôt que de comparer des scénarios de gestion forestière. Les hypothèses retenues pour les scénarios prospectifs, le paramétrage des outils utilisés ainsi que la portée des résultats obtenus sur un territoire de montagne pourraient être discutés longuement. Cependant les résultats obtenus sur le PNR du Massif des Bauges en comparant des scénarios contrastés font ressortir certains points de vigilance concernant les possibilités et conséquences d'une mobilisation accrue de biomasse forestière.

S'agissant des possibilités de mobilisation, il apparaît que dans un territoire présentant à la fois un morcellement important du parcellaire et une faible accessibilité des peuplements, la mobilisation supplémentaire de bois nécessitera des moyens considérables tant pour la desserte forestière que pour l'animation auprès des propriétaires. Ces investissements semblent nécessaires pour que l'accroissement de la mobilisation ne se fasse pas en décapitalisant les peuplements déjà accessibles et gérés.

S'agissant de la pertinence de la mobilisation, la comparaison des bilans carbone sur 30 ans de simulation montre que la récolte de bois se fait au détriment du stockage de carbone, l'effet de substitution sur cette durée étant inférieur au stockage en forêt. Les scénarios ayant peu de différences du point de vue de la filière, il est difficile de conclure quant à l'intérêt de certains usages du bois plutôt que d'autres, tant sur le plan de la substitution que du stockage.

Si l'atténuation du changement climatique sera plus efficace au moins dans un premier temps par stockage en forêt, cela pose la question du risque de déstockage important par la suite du fait de crises sanitaires ou événements climatiques. Prévenir les conséquences de telles crises suppose d'adapter les peuplements via des récoltes accrues ou des changements d'essence. Les choix sylvicoles posent la question du compromis entre adaptation des peuplements au changement climatique et atténuation de ce même changement climatique.

La gestion forestière est à la croisée d'enjeux locaux et globaux, tout en s'inscrivant dans le temps long, avec son lot d'incertitudes. Les éléments apportés par une démarche comme celle de PROTEST peuvent contribuer à éclairer les débats préalables aux choix de société qui orienteront le futur des territoires forestiers.

6.4. Perspectives

Les restrictions sanitaires des années 2020-2021 n'ont pas été favorables à un projet centré sur une démarche participative et dont l'un des objectifs était de maintenir un lien étroit avec les acteurs du territoire de test. L'ADEME a heureusement autorisé la prolongation du projet d'une durée d'un an.

On peut cependant penser que des échanges plus riches auraient été profitables, notamment lors de la phase de discussion sur la spatialisation des scénarios, et pour avoir des retours sur les résultats de simulation d'évolution forestière.

Ces résultats de simulation sont très fournis. Ils n'ont malheureusement pas pu être exploités pleinement dans le cadre du projet. L'application d'outils d'analyse spatiale voire temporelle serait très intéressante mais dépasse le cadre fixé au projet. Ce type d'analyse faciliterait la présentation des résultats pour l'étape finale de la démarche prospective.

7. Conclusion

Alors que les territoires forestiers sont confrontés à des enjeux exacerbés de multi-fonctionnalité dans un contexte incertain de changement climatique, le projet PROTEST a montré qu'il est possible de mettre en œuvre une méthode d'analyse territoriale de la ressource forestière combinant télédétection, simulation d'évolution des forêts et démarche participative. Au-delà des informations produites par les composantes individuelles, leur intégration dans une démarche globale de prospective territoriale spatialisée apporte une valeur ajoutée pour la préparation et la mise en œuvre d'une politique forestière territoriale qui soit à même de répondre aux enjeux locaux et globaux.

Les conditions requises pour répliquer les étapes de cartographie et de prospective territoriale sont désormais réunies : disponibilité des données, outils et compétences. Le cas d'étude du territoire du PNR du Massif des Bauges a été précisément documenté et pourra servir de canevas pour appliquer cette méthode à d'autres territoires.

À partir des acquis du projet PROTEST, recherche et développement se poursuivent, notamment dans le projet I-MAESTRO, cofinancé par l'ADEME, pour améliorer les données et outils pour la simulation d'évolution forestière à l'échelle du territoire.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Les documents produits dans le cadre du projet PROTEST sont **en gras**. Les livrables du projet et certains documents sont téléchargeables sur <https://protest.inrae.fr/rapports/>

- ALMEIDA ARAÚJO** Camille, **BASTIANELLEI** Camille, **GIORGI** Maxime. 2019. **Étude de filière pour la modélisation des flux de carbone sur le territoire du PNR du Massif des Bauges. Rapport de travail en groupe d'étudiants.** AgroParisTech. 26 p.
- AUSSENAC R., PÉROT T., FORTIN M. et al.**, 2021a. **The Salem simulator version 2.0: a tool for predicting the productivity of pure and mixed forest stands and simulating management operations [version 2; peer review: 2 approved].** Open Research Europe, 1:61 (<https://doi.org/10.12688/openreseurope.13671.2>)
- AUSSENAC Raphaël, MONNET Jean-Matthieu, VALLET Patrick**, 2021b. **Méthode d'initialisation des peuplements forestiers.** Livrable PROTEST 3.1A.
- AUSSENAC Raphaël, MONNET Jean-Matthieu, CARRETTE Thomas, THIVOLLE-CAZAT Alain, VALLET Patrick**, 2021c. **Méthode d'initialisation de la gestion forestière.** Livrable PROTEST 2.3A.
- BELLOM Aubéline**, 2019. **Prospective territoriale et gestion forestière durable : analyse des facteurs influençant le développement forestier sur le territoire du PNR du Massif des Bauges.** Mémoire de Master 2 SHS, IUGA. 90 p. Livrable PROTEST 2.1AB.
- BOCCON-GEBEAUD Basile**, 2019. **Sémantique de carte issue de Lidar. Recommandations issues du mémoire de Master 2 IUGA.** 10 p.
- BOUVIER Marc, DURRIEU Sylvie, FOURNIER Richard, SAINT-GEOURS Nathalie, GUYON Dominique, GRAU Éloi, DE BOISSIEU Florian**, 2019. **Influence of sampling design parameters on biomass predictions derived from airborne LiDAR data.** Canadian Journal of Remote Sensing. (<https://doi.org/10.1080/07038992.2019.1669013>)
- CARRETTE Thomas, DE MOROGUES Francis**, 2021. **Comité de valorisation des données et cartes forestières LiDAR.** Livrable PROTEST 4.2B. 17 p.
- CARRETTE Thomas, THIVOLLE-CAZAT Alain**, 2021. **Spatialisation et définition des variations entre scénarios.** Document interne PROTEST. 9 p.
- CHARLET Antoine, DUTRIEUX Raphaël, MARTIN Marie-Laure, MINCÉ Noémie, SIMEONI Marion**, 2018. **Évaluation de la ressource forestière et de sa disponibilité dans le Parc Naturel Régional du Massif des Bauges. Rapport de travail en groupe d'étudiants.** AgroParisTech. 67 p.
- COLIN Antoine, THIVOLLE-CAZAT Alain**, 2016. **Disponibilités forestières pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035.**
- COMBAZ-DEVILLE Pascal, EVERAERTS Harri, FEPPON Charly, MERMIN Éric, PACCARD Pierre, MONNET Jean-Matthieu, MUÑOZ Alain, RIOND Catherine, PLEVY Guillaume, GEOFFREY Thomas**, 2021. **Base de données de relevés forestiers, livrable PROTEST 1.1.**
- DAYAL K. R., DURRIEU S., ALLEAUME S., REVERS F., LARMANOU E., RENAUD J.-P., BOUVIER M.,** Scan angle impact on LiDAR-derived metrics used in ABA models for prediction of forest stand characteristics : a grid based analysis. 2020. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLIII-B3-2020, 975–982. (<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-975-2020>)
- DE ROO Coralie, ROUQUILLAUD Quentin, ROUVIER Sylvain**, 2020. **Étude de ressource sur le territoire du PNR du Massif des Bauges. Rapport de travail en groupe d'étudiants.** AgroParisTech. 19 p.
- DUPIRE Sylvain**, 2021. Logiciel Sylvaccess. (https://gitlab.com/SDupire/sylvaccess_public)
- I-MAESTRO**, 2021. (<https://i-maestro.inrae.fr/>)
- IGN**, 2012. Quelles sont les ressources exploitables ? L'information forestière 30, 16 p.
- LAHSSINI Kamel**, 2021. **Fusion de données lidar aéroporté et sentinel-2 par apprentissage pour la caractérisation de la ressource forestière du PNR des Bauges.** Mémoire de master SILAT, AgroParisTech.
- LAHSSINI Kamel, TESTE Florian, DAYAL Karun, DURRIEU Sylvie, IENCO Dino, MONNET Jean-Matthieu.** Soumis à IEEE/STARS. **Combining LiDAR metrics and Sentinel-2 imagery to estimate basal area and wood volume in complex forest environment via neural networks.**

- MALDONADO Éric, MONNET Jean-Matthieu, 2018. Site internet du projet PROTEST.**
<https://protest.inrae.fr/>. Livrable PROTEST 4.1A.
- MONNET Jean-Matthieu, 2019. Modélisation des paramètres forestiers. Document interne PROTEST.**
15 p.
- MONNET Jean-Matthieu, 2021. Tutorials for forest analysis with airborne laser scanning.**
https://gitlab.irstea.fr/jean-matthieu.monnet/lidartree_tutorials/. Livrable PROTEST 1.2C.
- MONNET Jean-Matthieu, AUSSENAC Raphaël, VALLET Patrick, 2021. Résultat des simulations et comparaison des scénarios. Livrable PROTEST 3.1B.**
- MONNET Jean-Matthieu, MERMIN Éric, DUPIRE Sylvain, 2021. Cartographie de l'accessibilité des forêts du PNR du Massif des Bauges. Livrable PROTEST 1.3A.**
- MUNOZ Alain, 2019. Cartographie de la ressource forestière à haute résolution. Livrable PROTEST 1.2B.**
- MUNOZ Alain, PACCARD Pierre, 2019. Acquisition de données LiDAR sur le PNR du Massif des Bauges (74). Livrable PROTEST 1.2A.**
- NZETA KENNE Vanneck, 2019. Évaluation spatialisée des services écosystémiques forestiers du Parc Naturel Régional du Massif des Bauges. Mémoire de Master 2 AETPF. 31 p. Livrable PROTEST 3.2A.**
- ONF, 2018. Protocole observatoire forestier Savoie. 4 p.
- ORCAE. 2021a. « Principes méthodologiques de production des données et indicateurs climat, air et énergie ». https://www.orcae-auvergne-rhone-alpes.fr/fileadmin/user_upload/mediatheque/ORCAE/Documents/Publications/ORCAE_Methodologie_globale.pdf.
- ORCAE. 2021b. « Profil climat air énergie du Massif des Bauges (PNR) ». https://www.orcae-auvergne-rhone-alpes.fr/fileadmin/user_upload/mediatheque/orcae/Profils_v1/Profil_FR8000031.pdf.
- PIBOULE A., KREBS M., ESLATINE L., HERVÉ J.-C., 2013. Computree: a collaborative platform for use of terrestrial lidar in dendrometry. International IUFRO Conference MeMoWood, Nancy, France.
- PICHANCOURT J.-B., MANSO R., NINGRE F., FORTIN M., 2018. A carbon accounting tool for complex and uncertain greenhouse gas emission life cycles. Environmental Modelling and Software, 107 : 158-174.
- Préfecture de Haute-Savoie, 2018. Arrêté n°DDT-2018-947 portant autorisation de pénétrer dans les propriétés privées en vue de mettre en œuvre une méthode de PROspective TERRitoriale Spatialisée. 3 p.**
- PNR du Massif des Bauges, 2021. Atlas communal des forêts du Massif des Bauges. Livrable PROTEST 4.1B.**
- PNR du Massif des Bauges, 2018a. Courrier d'information aux propriétaires concernant la réalisation de placettes d'inventaire pour la cartographie et le suivi des forêts du massif des Bauges.**
- PNR du Massif des Bauges, 2018b. Courrier d'information aux communes concernant la réalisation de placettes d'inventaire pour la cartographie et le suivi des forêts du massif des Bauges.**
- TESTE Florian, 2021. Fusion des données Sentinel-2 et LiDAR par deep learning pour la caractérisation des forêts du parc naturel régional du massif des Bauges. Mémoire de Master 2 Géomatique et environnement. 104 p.**

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 1 : nombre de placettes inventoriées	10
Tableau 2 : erreur des modèles de prédiction.....	13
Tableau 3 : récolte et surface traitée (bas : évolution par rapport au scénario PTR)	26
Tableau 4 : intensité de récolte.....	27
Tableau 5 : biomasse vivante en fin de simulation	29
Tableau 6 : écart de stock de carbone avec PTR en fin de simulation.....	30
Tableau 7 : protection contre les chutes de pierre	31
Tableau 8 : écarts de stocks et de récolte par rapport au scénario PTR	33
Tableau 9 : ratio des écarts de stock et récolte (teqCO ₂ /m ³).....	33
Tableau 10 : compromis érosion / récolte, écart par rapport au scénario PTR	34

FIGURES

Figure 1 : organisation du projet	8
Figure 2 : placettes réalisées sur le terrain	10
Figure 3 : distribution des diamètres des arbres inventoriés	11
Figure 4 : données LiDAR	12
Figure 5 : carte et répartition des surfaces accessibles.....	14
Figure 6 : facteurs et variables issues du diagnostic territorial	16
Figure 7 : composition en essence des polygones	21
Figure 8 : répartition des types de peuplement sur le territoire et en pourcentage.....	23
Figure 9 : répartition des peuplements par itinéraire en surface (haut) et en proportion (bas).....	24
Figure 10 : volumes coupés et surface traitée	25
Figure 11 : volumes coupés par essence et propriété	26
Figure 12 : évolution de la surface terrière	27
Figure 13 : diagramme de Sankey de la filière bois du massif des Bauges.....	28
Figure 14 : schéma de la filière bois du territoire.....	28
Figure 15 : évolution des stocks de carbone	30
Figure 16 : récolte moyenne	31
Figure 17 : perte de sol en masse en 2046 par rapport au scénario PTR.....	32
Figure 18 : stocks et récolte cumulée en 2046, écarts par rapport au scénario PTR	33
Figure 19 : capture d'écran du serveur cartographique PROTEST.....	37
Figure 20 : extrait du projet d'atlas communal (carte de volume pour la commune de Curienne)	38

SIGLES ET ACRONYMES

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
COFOR	Communes Forestières
FCBA	Institut Technologique Forêt Cellulose, Bois et Ameublement
GNSS	Global Navigation Satellite System
IFN	Inventaire Forestier National
IGN	Institut de l'Information Géographique et Forestière
INRAE	Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement
LESSEM	Laboratoire ÉcoSystèmes et Sociétés En Montagne
LiDAR	Light Detection And Ranging
MNH	Modèle Numérique de Hauteur
MNT	Modèle Numérique de Terrain
ONF	Office National des Forêts
ORCAE	Observatoire régional climat air énergie Auvergne-Rhône-Alpes
PNR	Parc Naturel Régional
PROTEST	PROspective TErritoriale SpaTialisée (projet)
RGE	Référentiel Grande Échelle
TETIS	Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale (UMR)
UMR	Unité Mixte de Recherche

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME

FAITS ET CHIFFRES



L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.

CLÉS POUR AGIR



L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.

ILS L'ONT FAIT



L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.

EXPERTISES



L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard

HORIZONS



L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



EXPERTISES

Prospective Territoriale Spatialisée (Projet PROTEST)

Le projet PROTEST met en œuvre une méthode d'analyse territoriale de la ressource forestière combinant plusieurs innovations méthodologiques :

- cartographie de la ressource forestière par télédétection LiDAR aéroporté,
- simulations d'évolution forestière à l'échelle du territoire,
- prospective territoriale basée sur des démarches participatives.

L'intégration de ces différentes composantes dans une démarche prospective spatialisée apporte une valeur ajoutée pour la préparation et la mise en œuvre d'une politique forestière territoriale qui soit à même de répondre aux enjeux locaux de multi-fonctionnalité, dans un contexte de changement global.

Le projet met en outre l'accent sur la réplicabilité de la méthode, en privilégiant les données publiques, les outils libres, et en documentant le cas d'étude du Parc Naturel Régional du Massif des Bauges, en lien avec les acteurs du territoire.

Quelle politique forestière locale pour répondre aux enjeux territoriaux et globaux ?

Le projet PROTEST propose une démarche prospective spatialisée s'appuyant sur la télédétection, la simulation d'évolution forestière et les approches participatives, pour accompagner les réflexions des acteurs des territoires.

Le tout avec le Massif des Bauges comme cas d'étude.

