



MASTER 2 Mention GAED
Parcours GEMO
Année universitaire 2023-2024

Élaboration d'une méthodologie pour une Trame forestière fonctionnelle dans le Parc Naturel Régional des Pyrénées Ariégeoises

Marie SALLEBERT
Mémoire soutenu le 12 septembre 2024

Photographie de la chaîne des Pyrénées prise depuis la commune de Lasserre le 05/04/2024

Mémoire de stage

Stage encadré par:
Raphaële Hemeryck (PNR PA)
Gérard Briane (UT2J)



Avant propos

Ce présent mémoire «Élaboration d'une méthodologie pour une Trame forestière fonctionnelle dans le Parc Naturel Régional des Pyrénées Ariégeoises» a été rédigé dans le cadre de mon stage de fin d'étude du Master Gestion et évaluation des environnements montagnards, dispensé à l'université Toulouse Jean Jaurès II. Il s'est déroulé du 04 mars au 30 août 2024 au sein du Parc Naturel Régional des Pyrénées Ariégeoises.

J'ai choisi de réaliser ce stage afin de diversifier mes connaissances et compétences, ayant travaillé au cours de mon stage l'année passée sur des thématiques agricoles. Cette expérience me permet de me rapprocher d'un domaine plus axé sur l'écologie et la conservation des milieux. De plus, la question de la préservation des écosystèmes forestiers face aux changements climatiques est une problématique qui m'intéresse particulièrement, tant par son importance écologique que par sa complexité.

Remerciements

Mes premiers remerciements vont à Elodie Roullier et Raphaële Hemeryck qui m'ont permis de réaliser ce stage dans la structure du PNR PA, qui m'ont aussi accompagnée et guidée sur ce sujet. Je les remercie de m'avoir offert l'opportunité de réaliser de stage et de participer au séminaire inter Parcs et à l'atelier FISSA à Nancy.

Je remercie Gaspard et Nathanaële, forestiers indépendants, pour ces journées passées sur le terrain où ils m'ont beaucoup appris. Je les remercie pour leur bonne humeur et pour avoir rendu ces journées plus faciles.

Je remercie Gérard Briane, maître de conférence en Géographie de l'environnement à l'université Toulouse Jean Jaurès, pour son accompagnement et pour ses conseils quant à la réalisation de ce mémoire.

Je remercie mes collègues stagiaires Marjorie, Vincent et Timéo pour avoir permis une ambiance de travail conviviale et pour leur soutien au cours de ce travail. Je les remercie pour leur aide et conseil au cours du déroulé de mon stage.

Je remercie Yannick Barascud, chargé de mission Trame Verte et Bleue, pour les échanges enrichissants, ses conseils et sa bonne humeur.

Je remercie mes chers amis, Romane, Eden et Théo pour leur relecture, les encouragements et leur soutien tout au long de ce stage.

Je remercie également Romain, pour la relecture de mon travail, son soutien, ses précieux conseils et la joie qu'il m'a apportée tout au long de ce travail, parfois difficile.

Je remercie toute l'équipe du PNR PA pour m'avoir accueilli de manière chaleureuse et permis de passer ces 6 mois de stage dans des conditions favorables.

. Résumé

Dans le cadre de ma deuxième année de Master GAED (Géographie, Aménagement, Environnement et Développement), parcours GEMO (Gestion et évaluation des Environnements MONTagnards), j'ai effectué un stage au Parc Naturel Régional des Pyrénées Ariégeoises (PNR PA) sur la thématique des forêts. L'objectif était de poursuivre la calibration du LiDAR sur le terrain commencée en 2023 et de développer une stratégie pour une Trame forestière fonctionnelle, visant à protéger et optimiser les connexions entre les milieux forestiers d'intérêt écologique.

Les forêts, particulièrement en milieu montagnard, sont menacées par le changement climatique. Leur adaptation est cruciale pour assurer leur résilience. Mon stage a constitué une première étape pour établir cette Trame, en élaborant une méthodologie pour identifier les secteurs à enjeux écologiques, proposer des outils de protection et collaborer avec des partenaires. Afin de réaliser ce travail, j'ai effectué des recherches, échangé avec des agents externes sur leur retour d'expérience, participé à des ateliers, et utilisé la modélisation de la Trame Verte et Bleue (TVB) du PNR PA.

La mise en place de cette Trame repose sur des données existantes, notamment sur les vieilles forêts, les forêts anciennes, et les «cœurs de biodiversité» du projet TVB. La prochaine étape impliquera un travail cartographique pour intégrer ces données et procéder à une analyse spatiale. La modélisation LiDAR, produite a posteriori de ce rapport, fournira des informations complémentaires, comme l'indice de maturité (IMAT) des forêts, pour identifier de nouveaux secteurs à enjeux écologiques, après un traitement et une analyse de ces données.

Des outils de protection adaptés, tels que les Obligations Réelles Environnementales (ORE) et les Réserves Biologiques Intégrales, seront nécessaires pour la mise en œuvre de cette Trame forestière. Pour maximiser ses bénéfices, il faudra intégrer les enjeux de connectivité et adapter les paramètres en fonction des contraintes, qu'elles soient géographiques, entre montagne et plaine, ou liées au statut des forêts, privées ou publiques.

Mots-clés: Trame forestière, LiDAR, protection de l'environnement, écosystèmes forestiers, continuités écologiques

Abstract

As part of my second year of the GAED Master's program (Geography, Planning, Environment, and Development), specializing in GEMO (Management and Evaluation of Mountain Environments), I completed an internship at the Parc Naturel Régional des Pyrénées Ariégeoises (PNR PA) focusing on forest-related topics. The objective was to continue the field calibration of LiDAR started in 2023 and to develop a strategy for a functional forest network aimed at protecting and optimizing connections between forest areas of ecological interest.

Forests, particularly in mountainous areas, are threatened by climate change. Their adaptation is crucial to ensure resilience. My internship was a first step in establishing this network by developing a methodology to identify ecologically sensitive areas, propose protection tools, and collaborate with partners. To achieve this, I conducted research, engaged with external experts to gather feedback, participated in workshops, and utilized the Green and Blue Infrastructure (TVB) modeling of the PNR PA.

The implementation of this network relies on existing data, particularly on old-growth forests, ancient forests, and the «biodiversity cores» from the TVB project. The next step will involve cartographic work to do spatial analysis. LiDAR modeling, produced after this report, will provide additional information, such as the forest maturity index (IMAT), to identify new ecologically sensitive areas, following data processing and analysis.

Appropriate protection tools, such as Environmental Real Obligations (ORE) and Integral Biological Reserves, will be necessary for the implementation of this forest network. To maximize its benefits, it will be essential to incorporate connectivity issues and adapt parameters according to constraints, whether geographical, such as between mountains and plains, or related to the status of forests, whether private or public.

Keywords: Forest network, LiDAR, environmental protection, forest ecosystems, ecological connectivity

Sommaire

Remerciements.....	1
Sommaire.....	3
Liste des sigles et abréviations:.....	4
Introduction.....	5
I. Structure et territoire.....	7
A. Le PNR des Pyrénées Ariégeoises.....	7
B. Les forêts du PNR des pyrénées Ariégeoises.....	13
II. Cadrage théorique: Les forêts, des écosystèmes aux multiples enjeux.....	23
A. Les forêts au temps du réchauffement climatique.....	23
B. Des milieux à préserver.....	27
C. Les apports de la télédétection pour la connaissance des forêts.....	31
D. Retours d'expériences.....	35
III. Cadrage méthodologique: du travail de terrain de calibration LiDAR à la stratégie de mise en place d'une Trame forestière dans le PNR PA.....	42
A. Le travail de terrain.....	42
B. Stratégie pour une Trame forestière fonctionnelle.....	45
IV. Les résultats: des données de calibration LiDAR à la stratégie de mise en place d'une Trame forestière dans le PNR PA.....	51
A. Les données récoltées sur le terrain.....	51
B. Les outils à mobiliser pour identifier les zones prioritaires.....	52
C. Mise en place d'une Trame fonctionnelle.....	63
D. Perspectives.....	70
V. Discussions.....	73
A. Synthèse et interprétation global des résultats.....	73
B. Retour critique sur le travail produit.....	75
C. De potentielles limites au projet.....	77
D. Étapes restantes et piste de travail.....	78
Conclusion.....	80
Bibliographie.....	82
Table des matières.....	87
Liste des figures.....	89
Annexes.....	91

Liste des sigles et abréviations:

ABE: Adaptation basée sur les écosystèmes

ADEME: Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

ANA CEN Ariège: Association des naturalistes d'Ariège, Conservatoire d'espace naturel Ariège

ARTISAN: Accroître la résilience des territoires au changement climatique par l'incitation aux solutions d'adaptation fondées sur la nature

CEN: Conservatoire d'espace naturel

CNPF: Centre national de la propriété forestière

DDT: Direction départementale des territoires

DMH: Dendromicrohabitat

ENS: Espace naturel sensible

GIEC: Groupement d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

IBP: Indice de biodiversité potentielle

IGNF: Institut géographique national forestier

IMAT: Indice de maturité

INSEE: Institut national de la statistique et des études économiques

LiDAR: Light detection and ranging

MNT: Modèle numérique de terrain

NEO: Nature en Occitanie

OFB: Office français de la biodiversité

ONF: Office national des forêts

ORE: Obligation réelle environnementale

PNR: Parc naturel régional

PNR LF: Parc naturel régional du Livradois Forez

PNR PA: Parc naturel régional des Pyrénées Ariégeoises

Projet FISSA: Forecasting forest socio-ecosystems' sensitivity and adaptation to climate change

RBI: Réserve biologique intégrale

RBD: Réserve biologique dirigée

Réseau FRENE: FoRêts en libre Évolution NaturElle

RNCFS: Réserve nationale de chasse et de faune sauvage

SIG: Système d'information géographique

SMCC: Sylviculture mixte à couvert continu

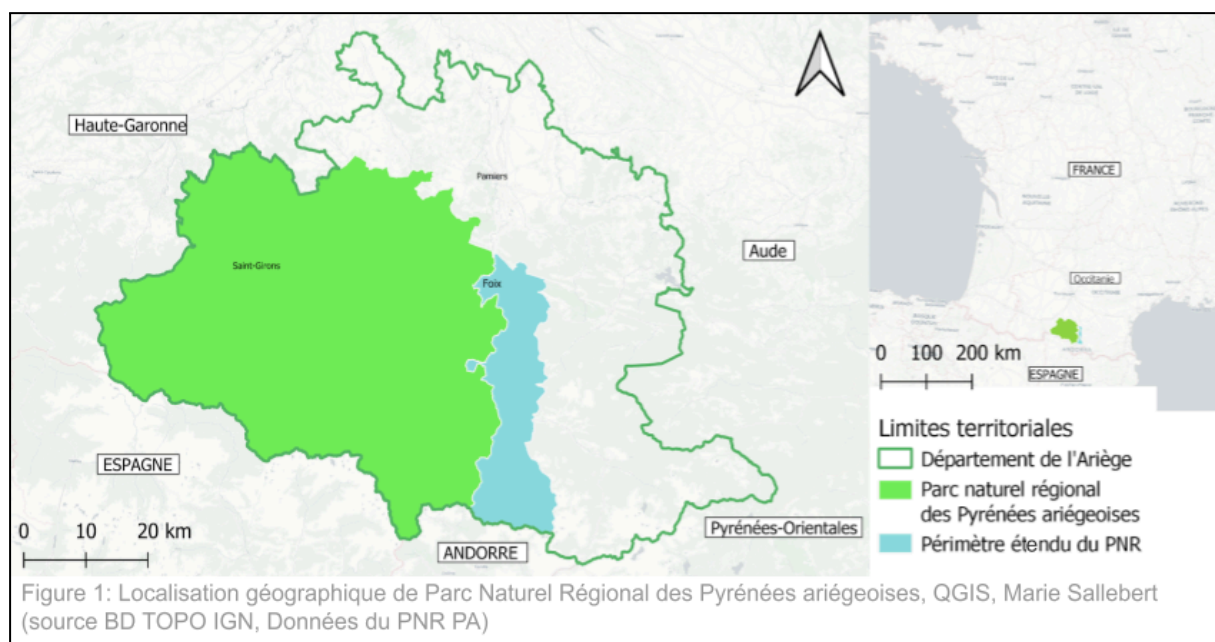
TVB: Trame Verte et Bleue

Introduction

Dans le cadre de ma deuxième année de Master GAED (Géographie, Aménagement, Environnement et Développement) parcours GEMO (Gestion et évaluation des Environnement MONTagnards), j'ai eu l'opportunité de réaliser mon stage de fin d'études au Parc Naturel Régional des Pyrénées Ariégeoises (PNR PA) sur la thématique des forêts. L'objectif du stage était d'une part, de continuer le travail de terrain pour la calibration du LiDAR débuté en 2023, et d'autre part de travailler sur une stratégie portée sur la Trame forestière du Parc, c'est-à-dire sur les connexions des milieux forestiers d'intérêt.

Le Parc Naturel Régional des Pyrénées Ariégeoises existe depuis 2009 et se compose de 140 communes. Il s'étend sur 2 465 kilomètres carrés dans le département de l'Ariège, soit plus de la moitié du département. Il se situe au sud de la région Occitanie, comme l'illustre la *figure 1*.

Dans le cadre de la révision de la charte (2025-2040) du PNR PA, le territoire est en projet d'élargissement, d'où la délimitation du périmètre étendu (figure 1), le parc se prépare à ce que ces communes intègrent son périmètre d'ici 2025 et mène ses études à moyen long terme sur ce nouveau périmètre.



Dans l'imaginaire commun, la forêt est symbole de nature idéale et sacrée, elle incarne un symbole de la préservation de l'environnement et les activités qui viennent la menacer font souvent l'objet de mobilisation et d'opposition (Géoconfluence, s. d.). On constate un intérêt grandissant de la population pour les forêts, avec notamment une hausse de leur fréquentation, mais aussi des préoccupations naissantes pour leur avenir. Le sondage Parlons forêts, réalisé par Viavoice en 2021 et commandité par l'ONF révèle que 69% des interrogés ont le sentiment que la forêt française est aujourd'hui menacée, sur ces 69%, 61% pensent que la raison principale en est la déforestation. Pourtant les forêts recouvrent aujourd'hui 31% du territoire français et ont connu une hausse de leur surface depuis le XIXe siècle, qui se poursuit aujourd'hui. Le sujet qui préoccupe le monde forestier est l'état de santé des forêts qui ne cesse de se détériorer. D'après l'observatoire national

des forêts (Institut national de l'information géographique et forestière, s.d., Santé des forêts. IGNF), il y a eu une hausse de près de 80 % de la mortalité des arbres entre 2005-2013 et 2013-2021. «*On définit alors la mauvaise santé des forêts comme un écart à un état normal. Une forêt est malade lorsqu'elle n'est plus capable de se maintenir dans le temps, de préserver ses dynamiques, ses services écosystémiques et ses capacités évolutives.*» (Observatoire des Forêts Françaises, s. d.)

Le GIEC (Groupement d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) publie en 2019 un rapport consacré au réchauffement climatique et aux sols, abordant: la désertification, la dégradation des terres, la gestion durable des terres, la sécurité alimentaire et les flux de gaz à effet de serre dans les écosystèmes terrestres. Ce document alerte sur l'importance d'une gestion forestière intégrée et durable, rappelant que la préservation des sols par le maintien d'un couvert végétal forestier permet une absorption de 30% des émissions de CO₂ (Rapport du Giec 2019 : La gestion durable des forêts, un levier essentiel pour lutter contre le changement climatique, ONF, 2023).

Les milieux forestiers apportent diverses contributions aux sociétés et au bien-être humain, telles que la production de bois, la purification de l'air et de l'eau, le maintien des sols, la fourniture d'habitats naturels pour la biodiversité¹, et des opportunités pour les activités de loisirs. Cependant, les forêts et leurs contributions sont exposées à des risques croissants comme les incendies, les ravageurs, les pathogènes et les grands herbivores. Les effets progressifs du changement climatique aggravent ces pressions, même si l'ampleur des effets du réchauffement climatique est incertaine, les conséquences sur les milieux forestiers et leur contribution éco-systémique pourraient être significatives. L'enjeu est de parvenir à maintenir un équilibre, à l'échelle nationale, entre l'adaptation des forêts au changement climatique, la réduction des gaz à effet de serre, la production de bois, la préservation de la biodiversité et toutes les autres contributions des forêts. (« Les Forêts Françaises Face Au Changement Climatique », 2023)

Les forêts sont donc des milieux vulnérables aux effets du changement climatique, tout particulièrement en milieu montagnard, où l'on constate un réchauffement et des perturbations plus importantes qu'en plaine. Les forêts de montagne sont donc en première ligne des changements climatiques, le contexte de pente combiné à l'assèchement des sols favorise l'érosion et fragilise les forêts en augmentant les risques de glissement de terrain, les risques d'incendie sont aussi accrus, même pour les territoires jusque-là plutôt épargnés. Une des mutations majeures envisagées pour les forêts de montagne est la remontée des étages de la végétation en altitude en raison de la hausse des températures (Montagne : en première ligne face au réchauffement climatique, s.d, Centre de Ressources Pour L'adaptation Au Changement Climatique).

L'adaptation des forêts face à ces bouleversements est primordiale, d'autant plus qu'elles contribuent à la résilience² des territoires aux travers des services écosystémiques qu'elles apportent.

Dans ce contexte de modification du climat, il semble primordial de préserver la qualité des milieux forestiers, cela passe en partie par l'amélioration du niveau de connaissances de ces écosystèmes. Une meilleure connaissance de ces milieux permet une meilleure prise en compte des enjeux dans la gestion et la conservation.

¹ La biodiversité peut être considérée comme la diversité du monde du vivant (gènes, espèces, écosystèmes) mais ne se limite pas à cela et comprend également les interactions de processus écologiques et de leurs écosystèmes (Boeuf G. 2012 et Bioret F. 2009).

² La résilience est définie comme la capacité d'un système à absorber les perturbations tout en conservant ses fonctions et sa structure essentielles.

Le projet d'élaboration d'une stratégie de Trame forestière pour les milieux forestiers est né de la volonté du PNR PA de proposer des orientations en matière de préservation de ces milieux, à partir de la modélisation LiDAR des forêts du territoire. C'est en cela que mon stage doit répondre à différents enjeux qui sont les suivants:

Comment identifier les zones forestières à enjeux écologiques et ainsi permettre une Trame forestière fonctionnelle en mobilisant des outils de protection efficaces ? Et comment la modélisation LiDAR peut-elle permettre d'atteindre cet objectif ?

Pour répondre à cette question le mémoire s'organisera de la manière suivante:

- I. Contextualisation du stage et du terrain d'étude
- II. Cadrage théorique: les forêts, des écosystèmes aux multiples enjeux
- III. Cadrage méthodologique: du travail de terrain à la stratégie de mise en place d'une Trame forestière dans le PNR PA
- IV. Résultats: du travail de terrain à la stratégie de mise en place d'une Trame forestière dans le PNR PA
- V. Discussion et retour critique

I. Structure et territoire

Les PNR ont été fondés en 1967, ce sont des territoires «*dont le patrimoine naturel et culturel ainsi que les paysages présentent un intérêt particulier.*» (Chapitre III : Parcs Naturels Régionaux (Articles L333-1 À L333-4) - *Légifrance, s. d.*). Ils s'appuient sur la notion de développement durable, c'est à dire allier développement économique et social tout en prenant en compte la préservation des environnements naturels. Les PNR ne disposent pas de pouvoirs réglementaires à la différence, notamment, des parcs nationaux. Les PNR sont des syndicats mixtes ouverts, car ils sont des groupements de plusieurs collectivités territoriales, avec les communes et communautés de communes, et ouverts car ils intègrent également la région et le département et potentiellement d'autres établissements publics. Les équipes de ces PNR, composées de techniciens spécialisés sur des domaines variés, apportent un conseil aux communes, associations et collectivités territoriales, et peuvent chercher des financements pour mettre en place différentes actions. Ils traitent généralement les thèmes de l'agriculture et de l'alimentation, de la biodiversité, de la culture, du patrimoine bâti, du tourisme,... Les orientations et objectifs du Parc sont définis par une charte.

A. Le PNR des Pyrénées Ariégeoises

Le Parc Naturel Régional des Pyrénées Ariégeoises s'étend, comme son nom l'indique, sur une partie de la chaîne pyrénéenne, s'étirant sur environ 430 kilomètres du golfe de Gascogne à la mer Méditerranée. Cette chaîne de montagne est le résultat d'une collision entre les plaques tectoniques eurasienne et ibérique, elle s'étend sur le sud de la France, l'Andorre, et le Nord de l'Espagne, et son sommet en est l'Aneto qui culmine côté espagnol à 3404 m d'altitude, dans le territoire du PNR c'est le Montcalm qui domine à 3077 m. Ce contexte de montagne propose une grande diversité paysagère et de milieux naturels

avec une biodiversité riche et des espèces endémiques, symbolique comme le desman des Pyrénées.

1. La structure du PNR PA

Dans le cadre de la gouvernance du Parc naturel régional des Pyrénées Ariégeoises, les décisions sont prises lors de réunions du Comité syndical ou du Bureau du syndicat mixte du PNR PA, et l'équipe technique est chargée de les mettre en œuvre.

L'assemblée générale du Parc est constituée du comité syndical, désigné par les collectivités du Parc. Ce comité se réunit afin de voter le budget, les programmes d'actions, les créations de postes,...

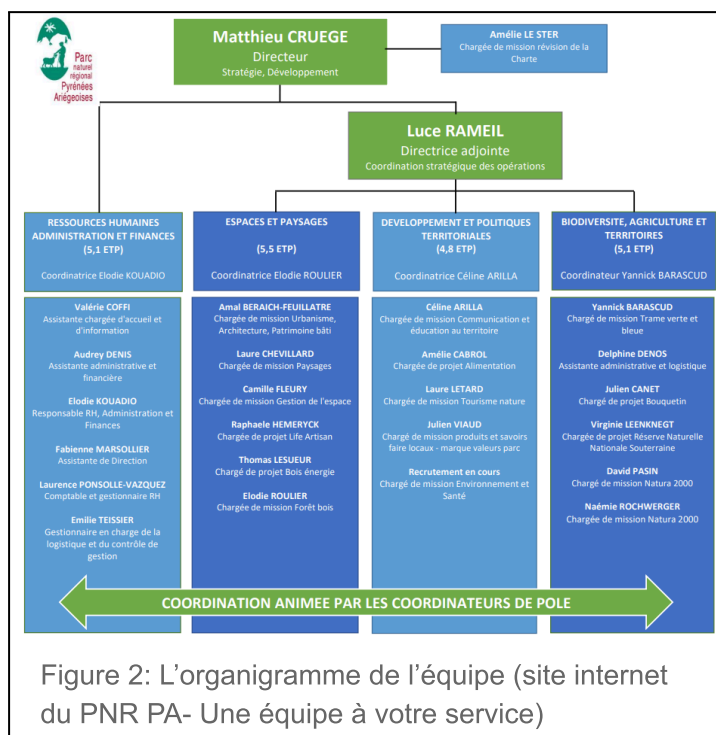
Le bureau est élu par le comité syndical où siègent des délégués membres représentants des communes, intercommunalités, de la région et du département.

Le PNR dispose de différents partenaires avec qui travailler sur la mise en place de différents projets, comme le conseil scientifique qui joue un rôle de conseil, de recherche avec une vision d'experts. Un autre de ses partenaires est l'association «Les amis du Parc» qui produisent différents travaux, animations et soutiennent les actions du PNR.

Le Parc est financé par différents moyens, tout d'abord les financements statutaires viennent à 50% de la Région Occitanie, 25% du département de l'Ariège, et 25% des communes et intercommunalités. L'Etat finance une partie du fonctionnement du parc dans le cadre de la mise en place de ses actions. D'autres financements sont mobilisés avec pour objectifs de développer des projets spécifiques, comme notamment les appels à projets

avec des fonds nationaux, européens (FEDER, LEADER,...) comme c'est le cas pour le projet Life ARTISAN (Accroître la Résilience des Territoires au changement climatique par l'Incitation aux Solutions d'adaptation fondées sur la Nature), dans lequel s'inscrit mon stage. Ces financements servent à porter certaines actions, et permettent la création de postes de chargés de projets dédiés à ces missions spécifiques. (Le Syndicat Mixte : Organisation, Élus, Équipe - PNR PA, 2023)

Dans sa forme opérationnelle, le PNR se compose de différents services, avec un total de 24 agents. Cette équipe se compose de chargés de mission et d'une



équipe administrative.

Le Parc est structuré autour de quatre services: Ressources humaines, administration et finances, Espace et paysage, Développement et politiques territoriales, Biodiversité agriculture et territoire.

Mon stage s'inscrit dans le projet Life ARTISAN, porté par l'OFB avec l'Union européenne, axé sur la mise en œuvre de solutions fondées sur la nature pour restaurer et préserver les écosystèmes et ainsi améliorer la résilience des territoires face au réchauffement climatique. Parmi ces solutions fondées sur la nature, on peut citer le débroussaillage en sous-bois des milieux boisés pour limiter les risques d'incendies, ou encore la plantation de mangroves dans les territoires ultra marins contre des aléas climatiques comme la submersion marine. Ces actions visent à favoriser le rétablissement des écosystèmes tout en offrant des avantages tangibles pour les communautés locales et la société dans son ensemble, en termes de protection de l'environnement, de préservation de la biodiversité et de réduction des risques naturels liés au changement climatique. (Le Projet Life Intégré ARTISAN, OFB, s. d.)

Le PNR PA fait partie des 10 sites pilotes du projet Life ARTISAN, lui, focalisé sur l'enjeu forestier. Un diagnostic de l'ADEME réalisé en 2016 a révélé que la forêt était parmi les secteurs d'activité les plus vulnérables aux effets du réchauffement climatique mais aussi comme enjeu clé pour l'adaptation du territoire du PNR PA. (Adaptation des Forêts Au Changement Climatique - PNR, 2024)

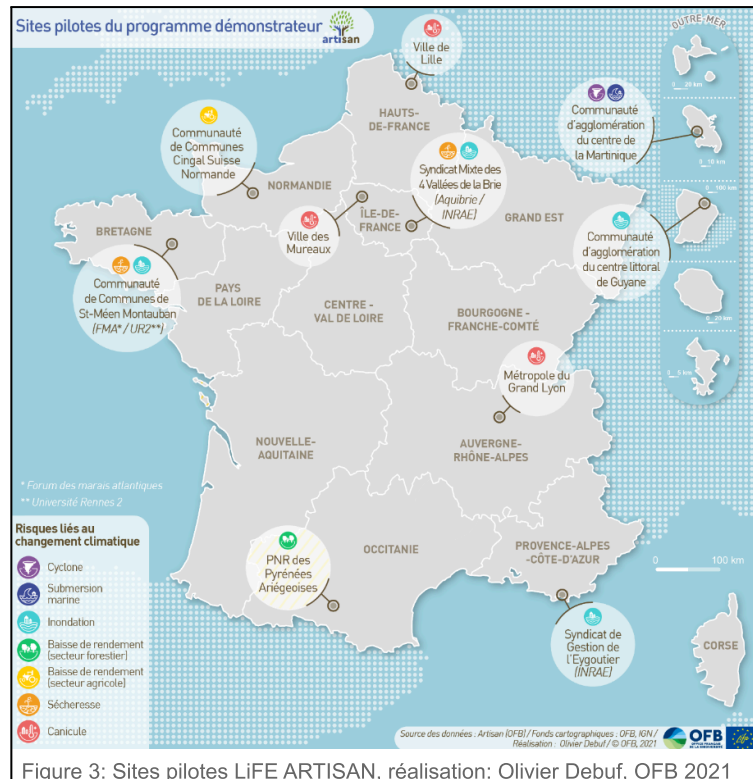
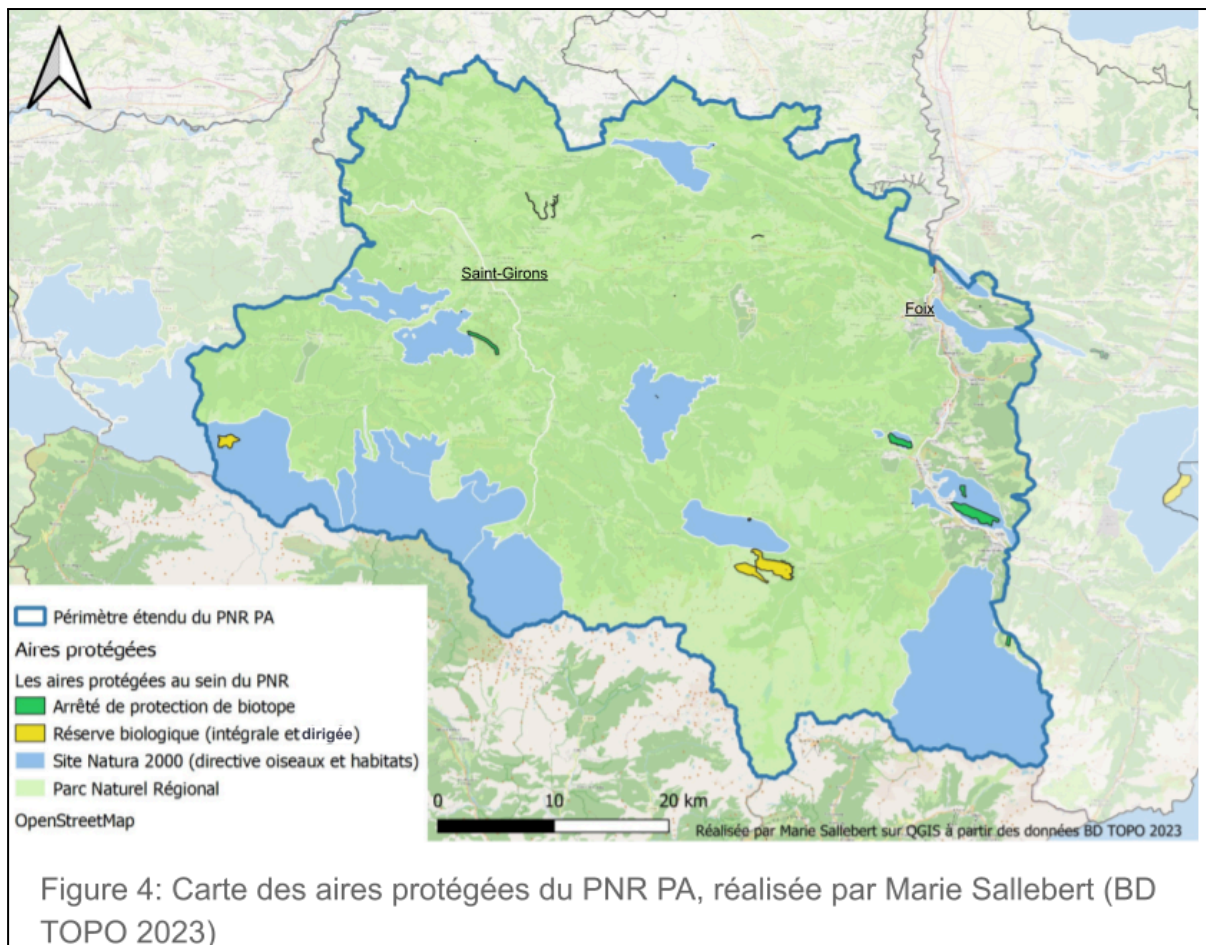


Figure 3: Sites pilotes LIFE ARTISAN, réalisation: Olivier Debuf, OFB 2021

2. Un territoire aux multiples enjeux environnementaux

Le territoire du PNRPA est un territoire rural de montagne, avec une densité moyenne assez faible, d'environ 18 habitants par km² (en France densité de 105 habitants/km²) (données INSEE). L'économie de l'Ariège repose sur plusieurs secteurs clés, notamment l'agriculture, le tourisme, l'artisanat, l'industrie et les services. L'industrie locale comprend la menuiserie, la papeterie, la métallurgie, l'énergie, et une filière bois active. L'agriculture se divise en quatre zones: les plaines pour les cultures céréalières et maraîchères, les coteaux pour la polyculture-élevage, la montagne pour l'élevage bovin, et la haute montagne pour l'estive.



Sur le périmètre élargi du Parc naturel régional des Pyrénées Ariégeoises se trouvent différentes aires de protection, des sites Natura 2000 (directive habitats et oiseaux), des arrêtés de protection de biotope, et des réserves biologiques intégrales et dirigées,... On observe la répartition de ces aires protégées sur la Figure 4.

Les arrêtés de protection de biotope sont utilisés pour protéger des sites spécifiques abritant des espèces ou des habitats sensibles. Sur le territoire du PNR PA, on compte 19 de ces arrêtés spécifiques avec par exemple la falaise de Sourroque dans la partie ouest (figure 4), le Quié de Lujat couvrant une surface importante à l'Est (Figure 4), au Sud de celle-ci (Figure 4) la Pinède à Crochet de plateau de Beille. Sont aussi en arrêté de protection de biotope des tronçons de cours d'eau, ainsi que des réseaux souterrains,...

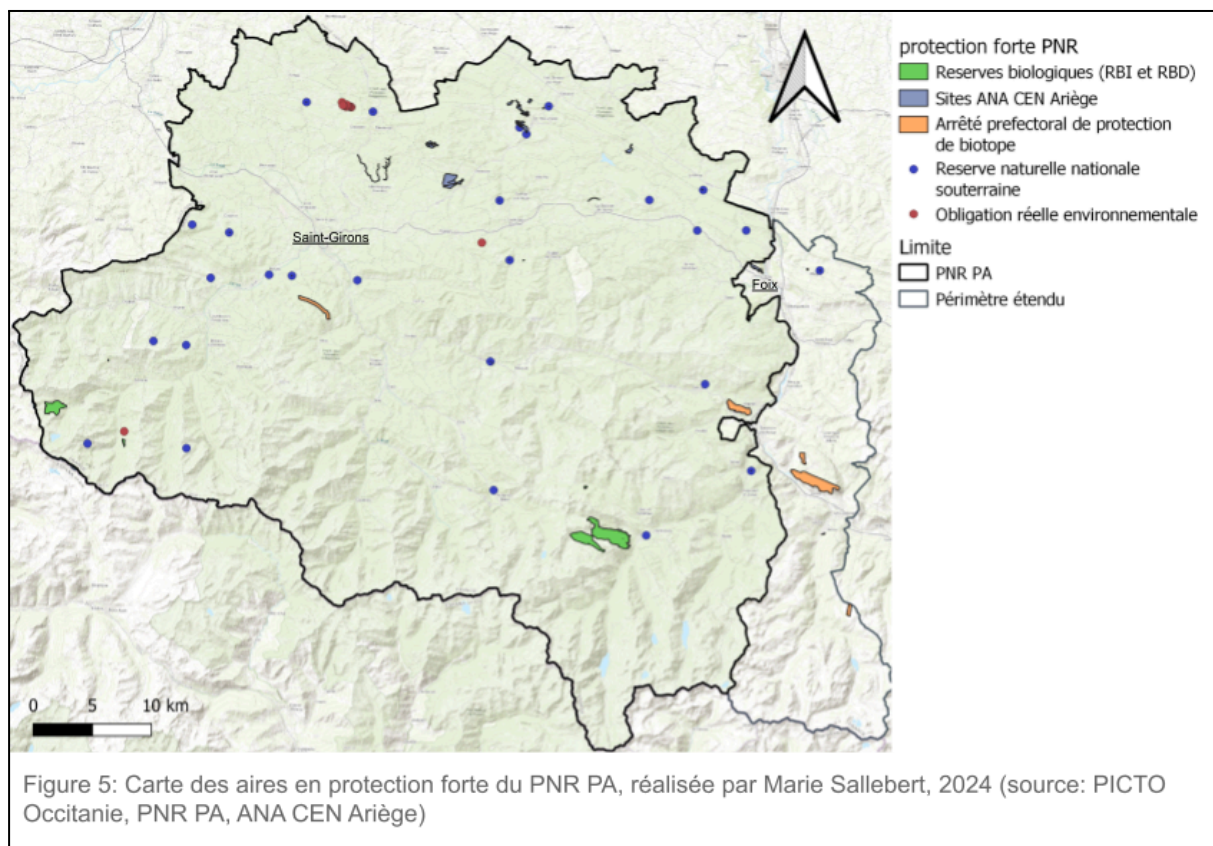
Sur la carte des aires protégées (Figure 4) on peut observer trois réserves biologiques: la réserve biologique dirigée de la sapinière de l'Isard à l'ouest, la réserve biologique dirigée du Montcalm et la réserve biologique intégrale du Montcalm. Ces modes de protection constituent des protections dites «fortes» par leur caractère contraignant sur les activités humaines et leur volonté de garantir une protection maximale des forêts et de leur biodiversité.

On retrouve au Sud (Figure 4) une grande concentration de sites Natura 2000 des directives habitats, sur les secteurs du massif du Mont Valier et de la vallée de l'Isard. Cela est notamment dû à la présence de pelouses, landes, rochers, forêts caducifoliées qui offrent des habitats naturels pour diverses espèces endémiques, végétales et animales. Ces sites Natura 2000 directive habitats se superposent à ceux de la directive oiseaux, car on y

retrouve des espèces protégées au nom de cette directive, tel que le Gypaète barbu, le Grand tétras ou le Merle à plastron.

Les PNR, eux, visent à concilier la protection de l'environnement avec le développement socio-économique des territoires. Ils ne disposent pas d'outils réglementaires et ne peuvent interdire aucune pratique ni usage du territoire.

Par rapport aux enjeux environnementaux que présente le territoire du PNR des Pyrénées Ariégeoises, on ne retrouve que peu de modes de protection forte (Figure 4). La mosaïque de milieux que présente l'Ariège n'est pas efficacement protégée est nécessiterait une stratégie adaptée afin de préserver son patrimoine naturel et sa biodiversité. De plus, dans le cadre de la nouvelle politique nationale SNAP (stratégie nationale pour les aires protégées) la France attend que chaque territoire classe en protection forte 10% de sa surface et de ses milieux. Ces modes de protection dits «forts» peuvent renvoyer à de la libre évolution, où toutes les activités humaines sont restreintes voire interdites.



Ces aires protégées apparaissent comme des outils réglementaires importants à mobiliser dans le cadre d'une stratégie de mise en place de Trame écologique forestière. Elles permettent la pérennité de la protection des milieux forestiers, structurée par un cadre légal réglementaire.

3. Missions et problématique

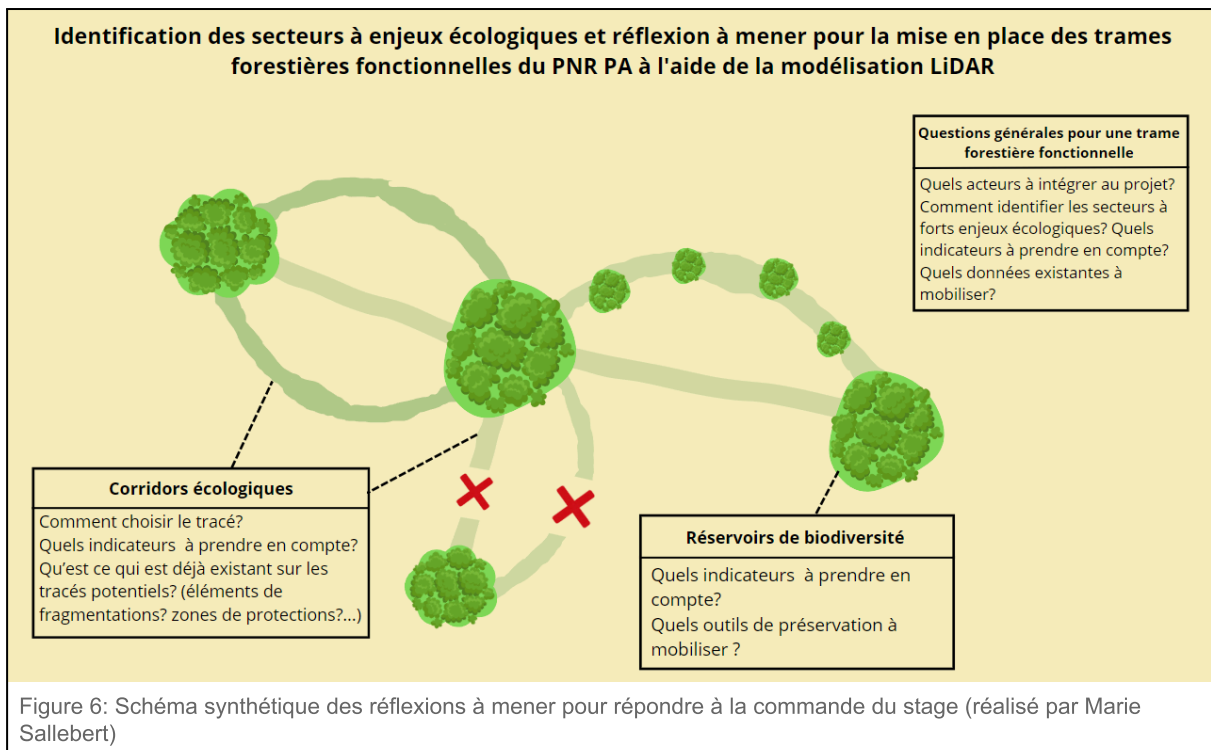
Dans le cadre de mon stage sur la thématique des forêts, la demande du Parc Naturel Régional des Pyrénées Ariégeoises s'est composée de deux missions principales. La première mission était de réaliser les mesures de placettes sur le terrain pour la

calibration du LiDAR, la campagne de terrain devant impérativement être terminée en 2024 pour éviter de trop grands changements dans la végétation. Ces relevés de terrain initiés en 2023 étaient une priorité dans le cadre de mon stage, et dans celui d'autres stagiaires présents sur la même période et sur cette thématique. Ce travail se traduisait par l'organisation et la gestion logistique des sorties sur le terrain, notamment avec les gestionnaires forestiers indépendants qui nous accompagnaient pour réaliser ces mesures. Nous réalisons ces travaux de terrain à hauteur d'environ deux jours par semaine, et effectuons ensuite le déchargement et l'archivage des données collectées pour garantir leur disponibilité et leur utilisation dans les étapes ultérieures du projet.

La campagne LiDAR constitue un enjeu primordial pour le PNR dans le cadre de l'amélioration des connaissances des nombreuses forêts du territoire. Dans un contexte de montagne avec une forte couverture forestière, les relevés de terrain sont fastidieux et ne peuvent pas être exhaustifs. Les perspectives de la technologie LiDAR offrent au Parc une possibilité d'améliorer grandement le niveau de connaissance des forêts du territoire et ainsi de mettre en place une stratégie de gestion plus adaptée aux enjeux.

La deuxième mission principale de ce stage était de mener une réflexion sur la mise en place d'une stratégie de Trame forestière fonctionnelle en proposant des méthodes pour identifier les zones à forts enjeux écologiques, en identifiant des outils de protections pertinents pour les milieux forestiers, et prendre contact avec des acteurs mobilisés sur ces questions. Dans le cadre de cette mission, il était également impératif de réfléchir à la contribution des futurs résultats de la modélisation LiDAR pour la mise en place d'une Trame forestière fonctionnelle (voir p.15 pour mieux comprendre ce qu'est le LiDAR). Ce travail doit permettre aux agents du PNR d'avoir une méthodologie opérationnelle à mettre en place une fois les résultats de la modélisation LiDAR obtenus, et d'avoir une vision d'ensemble de ce qui peut être mis en place grâce à cette modélisation, en termes d'analyse des forêts et de leurs enjeux, de modes de protection à déployer et de personnes à intégrer dans cette démarche.

Le schéma représenté figure 6 illustre les attendus de mon stage et les questionnements à intégrer au cours de mon rapport. Il constitue une synthèse schématique de ma problématique et des objectifs de mon stage. Il illustre les corridors écologiques et les réservoirs de biodiversité avec les interrogations et objectifs associées.

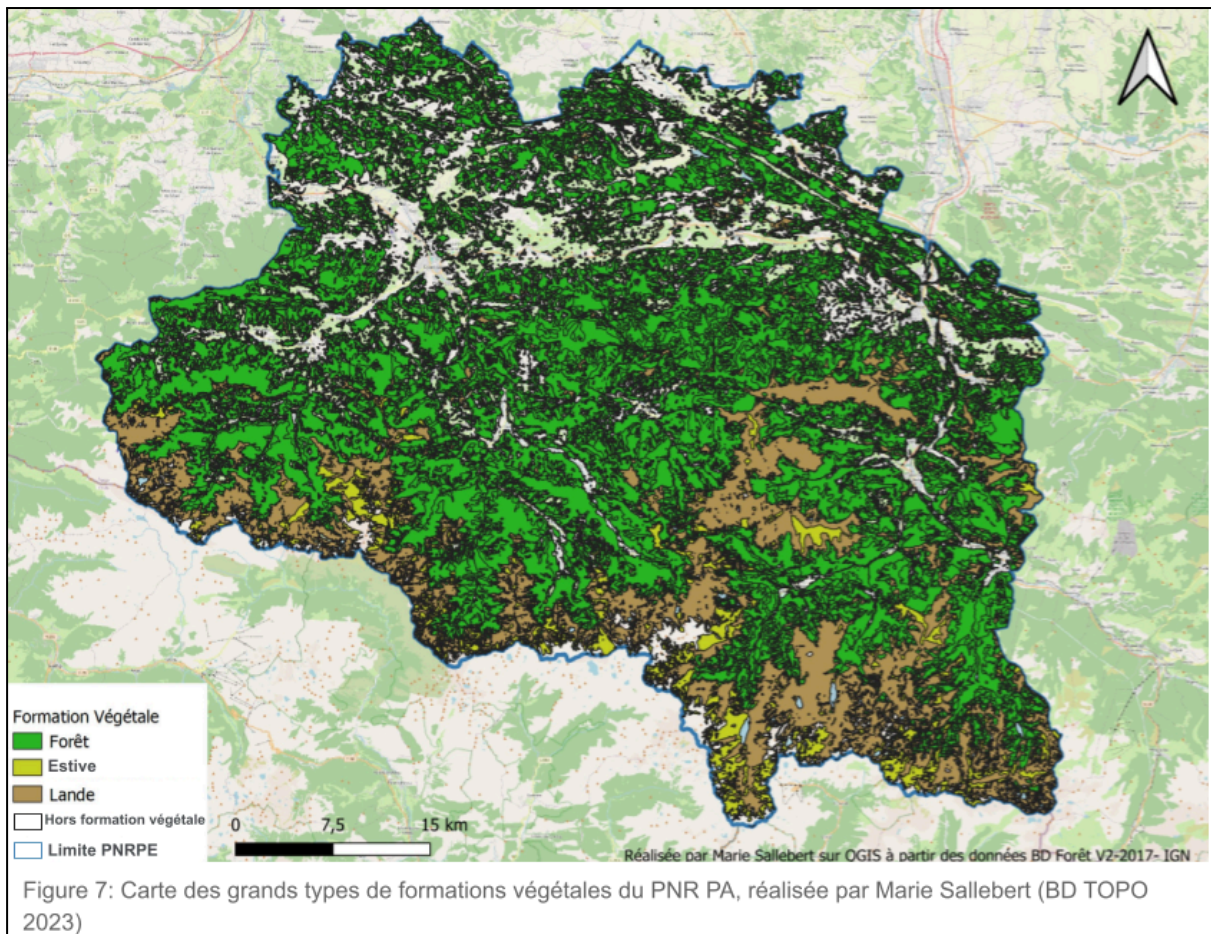


Ce mémoire est l'aboutissement d'un travail réalisé au cours des 6 mois de stage passés au PNR PA, au cours duquel j'ai mené une réflexion autour de ces interrogations: **Comment identifier les zones forestières à enjeux écologiques et ainsi structurer une Trame forestière fonctionnelle en mobilisant des outils de protection efficaces ? Et comment la modélisation LiDAR peut-elle permettre d'atteindre cet objectif ?** Pour appuyer cette démarche, il a été nécessaire de comprendre les enjeux derrière ce travail: **Quels enjeux pour le territoire du PNR PA à mettre en place une Trame forestière fonctionnelle, c'est-à-dire de développer de la protection forestière? Et comment la modélisation LiDAR peut être mobilisée pour améliorer la connaissance des forêts du territoire?**

À travers ce mémoire, mon objectif est de combiner ces questions complémentaires, d'analyser les travaux déjà réalisés sur ces thématiques, et de développer une méthodologie de travail construite dans l'objectif d'apporter des résultats significatifs.

B. Les forêts du PNR des pyrénées Ariégeoises

Sur le territoire du Parc Naturel Régional des Pyrénées Ariégeoises, la surface boisée représente environ 57%, ce qui est bien supérieur à la moyenne nationale de 31%. La figure 7 nous permet de visualiser la part considérable qu'occupe la forêt.



1. Des forêts marquées par un contexte socio-économique

Le paysage traditionnel d'Ariège, avant le XXe siècle, se composait de villages entourés de prairies, de pelouses pastorales, de haies bocagères et de forêts. Ces paysages sont le fruit d'une histoire et sont aménagés par les activités, notamment pastorales du territoire. Ce paysage s'est vu perturbé à la fin du XIXe siècle avec l'exode rural, le nombre d'habitants a drastiquement chuté, ainsi que le nombre d'éleveurs. Le paysage s'en est vu transformé entre le XIXe et le XXe siècle, marqué par l'abandon des pratiques pastorales et l'enfrichement comme en témoignent la re-photographie ci-dessous (figure 8). Rapidement les haies n'étant plus entretenues, se sont enfichées, ainsi que les prairies et pelouses, les espaces à vocations pastorales ont peu à peu laissé place à de la forêt. Cette fermeture des milieux a été subie par les habitants du territoire, car ce paysage faisait partie de l'identité locale et du patrimoine (Paysans et Paysages En Biros – MIROIR, 2023).



Figure 8: Re-photographie de 1920 et de 1995 sur la commune d'Antras en Ariège (Source: Paysans et paysages en Biros – MIROIR. (2023, 20 octobre). <https://blogs.univ-tlse2.fr/miroir/1997/07/01/docu-paysans-et-paysages-en-biros/>)

Les activités métallurgiques ont aussi eu un impact fort sur les milieux forestiers. Les forges étant alimentées en charbon de bois, la présence de charbonnières s'est répandue dans les vallées. Ces activités présentes sur le territoire depuis l'antiquité, combinées aux activités pastorales et à une hausse de la population, ont conduit à une intensification des coupes forestières, jusqu'au minimum forestier au milieu du XIXe siècle (Davasse et Galop, 1990).

Ce contexte historique explique le caractère récent des forêts: sur le territoire du PNR PA on ne retrouve que très peu de vieilles forêts³. On assiste donc de plus en plus à un enrichissement pouvant être comparé à une libre évolution subie, qu'il faudrait encadrer dans une optique de réouverture de certains milieux, ou, au contraire de pérenniser la libre évolution de certaines forêts d'intérêt. Il est à noter qu'une diversité de milieux naturels, c'est-à-dire des mosaïques d'habitats naturels, permettent une plus grande diversité biologique. L'uniformisation du paysage vers la forêt porterait préjudice à d'autres types de milieux comme les pelouses et prairies riches en biodiversité spécifique.

2. Des forêts aux multiples usages

Les forêts d'Ariège sont marquées par le contexte et l'héritage historique que l'on vient d'évoquer, ces forêts sont en accroissement, et une partie n'est pas exploitée en raison des difficultés d'accès liée à la topographie du territoire. Le territoire cherche à valoriser les ressources forestières comme le bois, pour mettre en place une gestion intégrée de ces milieux croissants. La filière bois local et la filière bois énergie tendent à se développer sur le territoire malgré les difficultés liées à la desserte forestière dans un contexte montagnard. La filière forêt/bois est une source d'emploi importante pour le territoire qui concentre des types d'emplois très variés. Les usages du bois sont multiples: bois d'œuvre, bois de chauffage, papeterie, piquets,... Les forêts ont une fonction de production de bois mais pas seulement, les forêts d'Ariège sont aussi le terrain d'activités de tourisme, avec la présence de grands sites touristiques en milieu forestier, comme par exemple la cascade d'Ars situé au coeur d'une hêtraie qui attire une grande quantité de touristes. Ces paysages attirent de nombreux randonneurs, promeneurs, VTTistes, ou autres adeptes d'activités de pleine nature. La forêt est aussi le lieu d'activités bien encadrées telles que la chasse, pratique

³ «Une « vieille forêt » est un espace boisé perturbé ou non par les activités humaines dans le passé, qui ne fait plus l'objet d'intervention depuis plusieurs dizaines à centaines d'années. Elle a donc en grande partie retrouvé un fonctionnement et un aspect naturels, comparables à ceux de forêts exemptes d'influence humaine» (J.M Savoie et al., 2021)

courante des lisières et milieux forestiers. La fédération de chasse effectue des suivis de population du gibier et a pour vocation de réguler les populations, notamment des ongulés, qui peuvent limiter voire empêcher la régénération des forêts. Malgré cela, leur population est en augmentation, notamment la population de cerfs, ce qui génère une hausse des dégâts sur les milieux forestiers. Une autre pratique emblématique des milieux forestiers en Ariège est la cueillette des champignons, qui compte un grand nombre d'adeptes selon le diagnostic de territoire du PNR PA de 2012. Cette grande diversité d'usagers de la forêt peut mener à des conflits d'usage entre différents acteurs.

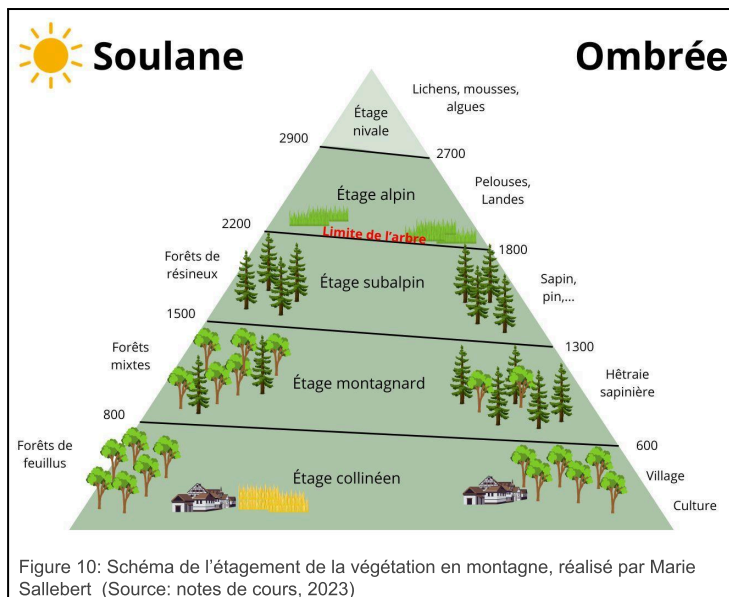
Ces différents usages de la forêt sont souvent désignés par les notions de services écosystémiques ou de contributions aux sociétés et aux bien-être humains. Elles englobent différents types de services: régulation, culture, et production, comme illustré sur la figure 9 ci-dessous.



Figure 9: Services écosystémiques rendus par les milieux forestiers, réalisé par Marie Sallebert (Dufrêne 2017 et Carnol 2010)

3. Des environnements forestiers spécifiques avec une biodiversité riche

Le Parc Naturel Régional des Pyrénées Ariégeoises se trouve dans la Grande région écologique des Pyrénées de la Haute chaîne pyrénéenne, et se caractérise par une zone de piémont (jusqu'à 800m d'altitude) et un secteur de hautes montagnes (jusqu'à 3000m d'altitude). Le Parc est sous l'influence de trois types de climats: méditerranéen (pluviométrie modérée, sécheresses estivales), atlantique (pluviométrie abondante, répartie sur l'année), et montagnard (températures basses, précipitations fréquentes) (Robain, 2023).



Le territoire du PNR présente une grande diversité paysagère dû à son contexte topographique de montagne induisant une mosaïque de milieu: pelouses sèches, tourbières, collines calcaires et forêts.

Les écosystèmes forestiers sont répartis sur trois étages de végétation: collinéen, montagnard et subalpin, l'étage alpin, au-delà d'environ 2000m d'altitude, marque la limite de l'arbre (figure 10).

Les peuplement forestiers du PNR PA sont caractérisés par une

dominante de feuillus avec des hêtraies pures, des chênaies, des peuplements feuillus mixtes. On y trouve aussi des peuplements de résineux artificiels (sapins pectinés, épicéas, douglas) (Robain, 2023) et naturels en montagne avec la présence de pins à crochets.

Les milieux ouverts, comme les landes ligneuses et formations herbacées, couvrent aussi une vaste superficie du territoire, notamment en haute montagne (figure 10).

Ces diversités de milieux forestiers induisent une grande diversité d'habitats et de biodiversité. La biodiversité peut être considérée comme la diversité du vivant, allant de l'individu, de l'espèce à l'écosystème. Les forêts accueillent de nombreuses espèces: pour la diversité des végétaux, on a évidemment une diversité de ligneux (plus ou moins importante), mais aussi de fougères, de plantes à fleurs, de mousses ou de lichens. Pour la diversité de la faune, on compte une grande majorité d'insectes, mais aussi des mammifères, des oiseaux, des reptiles ou des amphibiens. Les champignons sont aussi multiples en milieux forestiers, et contribuent grandement à la biodiversité en forêt. Certains facteurs favorisent une diversité importante du vivant au sein d'une forêt. Les forêts de grandes tailles, anciennes, avec une diversité d'essences importante et une présence de bois mort accueillent davantage de biodiversité, en raison de la pluralité des habitats naturels qu'elles proposent. Ce sont des critères importants à prendre en compte dans l'étude des milieux forestiers, pour veiller de manière cohérente à leur protection.

4. La Trame forestière au sein de la Trame Verte et Bleue du PNR PA

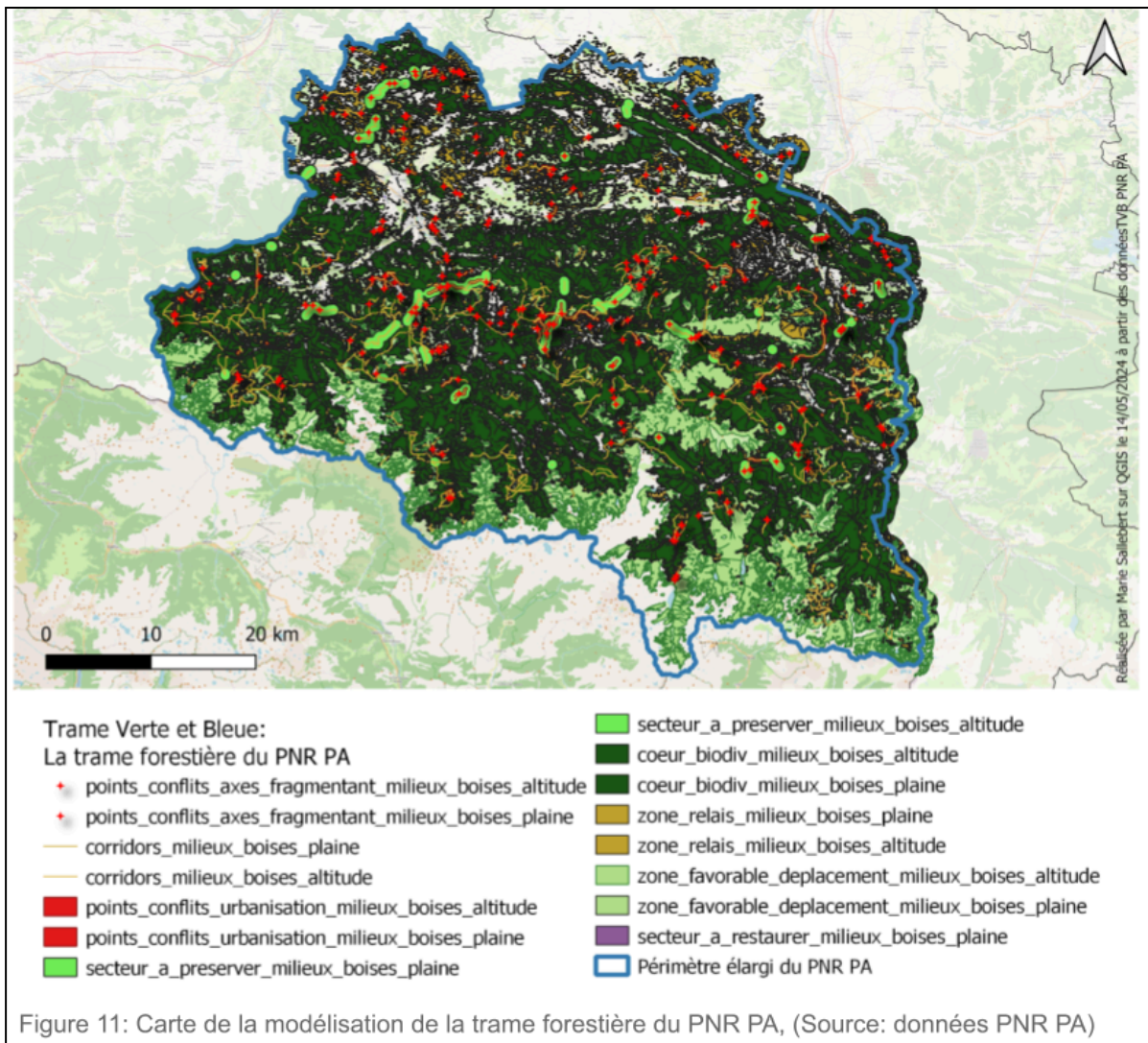
La mise en place de la Trame Verte et Bleue (TVB) en France s'inscrit dans une stratégie nationale en faveur de la biodiversité. Elle est issue de la loi Grenelle 1 de 2007, qui a intégré les TVB dans les politiques d'aménagement du territoire (Cormier et al., 2010). Cette initiative vient du constat que les activités humaines ont pour impact de fragmenter les habitats naturels, ce qui réduit la viabilité des populations d'espèces (Bergès, 2010). La création de corridors pour reconnecter les tâches d'habitats entre elles apparaît comme un enjeu fort pour la préservation de la biodiversité, afin de résorber les fragmentations qui entravent la viabilité des espèces. Dans son aspect opérationnel, la TVB est un outil qui permet de mieux prendre en compte les enjeux de préservation des habitats naturels et des espèces associées, notamment dans le cadre de documents de planification et

d'aménagement régionaux ou locaux. La Trame Verte fait référence aux habitats terrestres et la Trame bleue aux habitats aquatiques ou humides. La TVB se compose de réservoirs de biodiversité, c'est-à-dire des espaces avec une biodiversité riche, où les espèces peuvent réaliser tout ou partie de leur cycle de vie, ce sont des milieux de suffisamment grande taille pour assurer le bon fonctionnement de l'habitat pour la biodiversité (Définitions de la Trame Verte et Bleue | Trame Verte et Bleue, s. d.). Une autre composante de ces TVB sont les corridors écologiques qui permettent une connectivité entre ces réservoirs, offrant aux espèces des moyens favorables de cheminer entre les habitats. Ces corridors peuvent prendre différentes formes: linéaires, ponctuelles ou paysagères, ce sont des espaces naturels ou semi-naturels. (Définitions de la Trame Verte et Bleue | Trame Verte et Bleue, s. d.) Cette connectivité fonctionnelle représente le degré de liaison entre les éléments paysagers (Opdam et al., 2006).

Le PNR des Pyrénées Ariégeoises a fait réaliser la modélisation de sa TVB en 2015, qui a ensuite été actualisée en 2022. Cette modélisation a été réalisée à partir de différentes données d'occupation du sol pour observer les unités spatiales et les discontinuités, avec notamment le bâti, et l'artificialisation présente sur le territoire. La TVB se décline en plusieurs sous Trames écologiques: les milieux forestiers (de piémont et d'altitude), les landes et pelouses (calcicoles de piémont, calcicoles d'altitude et acidiclinales d'altitude), les prairies, les milieux agricoles cultivés, les milieux rocheux, les milieux humides, et les cours d'eau. Cette modélisation permet de repérer les secteurs à forts enjeux de protection, notamment dans le cadre des mesures agroenvironnementales et climatiques (MAEC) pour les zones de prairies. Cela permet de structurer et de prioriser les actions du PNR pour ces différents milieux. La priorité pour le PNR est la préservation des milieux ouverts et des zones humides, minoritaires et menacés, notamment par la fermeture des milieux due à la déprise agricole et à l'enfrichement consécutif, menaçant une biodiversité spécifique des milieux ouverts.

La sous Trame forestière est représentée par différentes couches cartographiques, comme représenté sur la figure 11, chaque couche existante existe à la fois pour les zones de plaine et d'altitude. Sont représentés sur cette carte (figure 11) les points de conflits, c'est-à-dire les zones présentant des éléments de fragmentation des milieux, créant des discontinuités. On retrouve aussi les réservoirs de biodiversité, aussi appelés zones cœurs, et les corridors écologiques. Les secteurs à préserver (figure 11) correspondent à des secteurs à forts enjeux, pouvant être menacés, qu'il faut veiller à maintenir pour garantir la connectivité entre les habitats. Les zones relais (figure 11) sont des zones intermédiaires, qui ne remplissent pas tous les critères des zones cœurs de biodiversité. Les zones favorables aux déplacements (figure 11) correspondent à des secteurs pas forcément boisés mais qui permettent le déplacement des espèces forestières. Enfin les secteurs à restaurer (figure 11) correspondent à des zones où il y a fragmentation des habitats, et sont des zones prioritaires à restaurer en raison de forts enjeux sur la biodiversité.

Mon stage s'inscrit dans la démarche des actions en faveur de la TVB mise en place au sein du parc, et cherche à développer des actions en faveur de la connexion des milieux forestiers d'intérêt, pour l'instant mal identifiés sur la thématique des Trames écologiques du PNR.



5. Le projet Life intégré ARTISAN et l'apport du LiDAR

Depuis 2020, diverses actions se mettent en place au sein du PNR PA dans le cadre du projet Life Artisan. Comme évoqué précédemment, le projet LIFE dans le PNR PA s'articule autour de l'objet forêt. Pour commencer, le PNR a organisé une conférence sur l'impact du changement climatique sur les forêts ainsi que les solutions fondées sur la nature existantes. Par la suite, le PNR a apporté le soutien nécessaire à la création d'un «projet sylvicole territorial» de Sylv'ACCTES sur le territoire du parc. Sylv'ACCTES est une association qui a pour objectif d'accompagner des propriétaires forestiers dans la mise en œuvre d'une gestion forestière conforme à l'idée de durabilité de Sylv'ACCTES. Les modes de gestions que promeut l'association relèvent de la sylviculture irrégulière, basée sur la régénération naturelle, la valorisation d'espèces locales et des exploitations avec un impact faible sur les sols. Life Artisan a aussi permis la réalisation d'une étude sur la vulnérabilité des forêts sur le territoire du PNR, soutenue par les organismes scientifiques AgroParisTech (Nancy) et INRAE (laboratoire Dynafor, Toulouse). De plus, le PNR a organisé divers ateliers thématiques pour les propriétaires forestiers et d'autres participants intéressés. La suite du projet prévoit d'expérimenter concrètement des solutions fondées sur la nature, cela permettra de tester diverses méthodes et de les comparer.

Actuellement, une partie de ce projet consiste à suivre l'évolution des forêts dans un contexte de changement climatique, en cherchant à mettre en place un observatoire permanent des forêts, en mobilisant les données du LiDAR HD. Le LiDAR, acronyme de «Light Detection and Ranging», est une méthode de télédétection, qui permet de créer une cartographie détaillée en trois dimensions du sol et du sursol. La méthode LiDAR fonctionne à l'aide d'un laser qui envoie des faisceaux lumineux depuis un avion vers le sol. La distance entre les objets touchés par les faisceaux lumineux se mesure par rapport au temps entre l'émission de l'impulsion laser depuis l'avion, au retour de cette impulsion réfléchie par l'objet touché, vers le capteur (Nuninger, 2010). L'émission de ces faisceaux lumineux à haute fréquence permet une représentation fine du sol et du sursol, par nuage de point (figure 12 et 13).

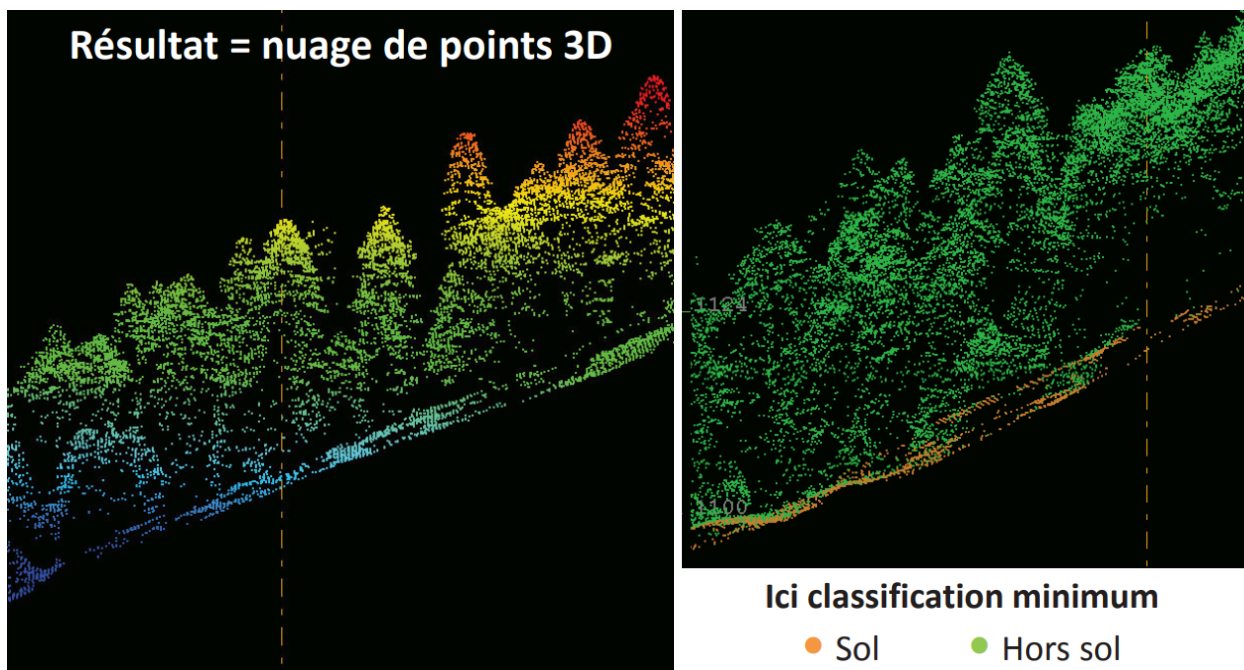
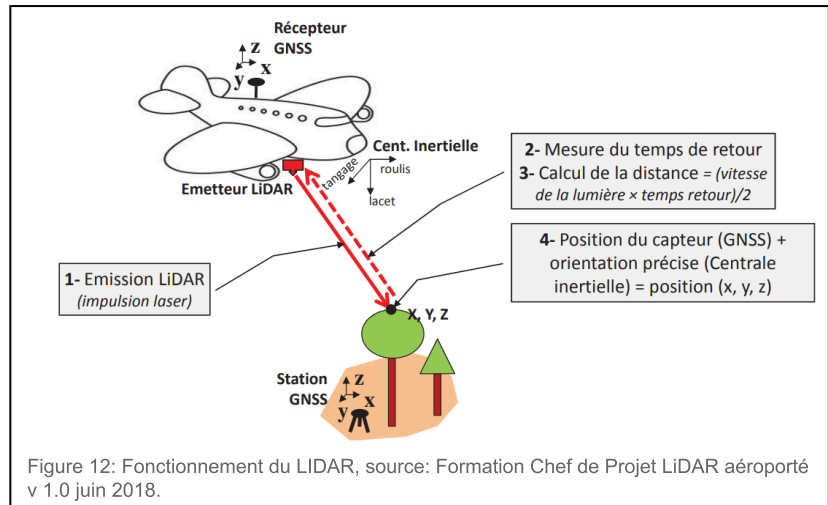


Figure 13: Nuages de points LIDAR, source: Formation Chef de Projet LiDAR aéroporté v 1.0 juin 2018.

Le système LIDAR est associé au système de géolocalisation par satellite GPS, ainsi, il peut renseigner les coordonnées des nuages de points (figure 12) qu'il mesure (Nuninger, 2010). Le système LIDAR compte une marge d'erreur très faible, c'est donc un système très fiable dans ses représentations, grâce, notamment, à la haute fréquence d'émission de rayons et à la précision des satellites GPS. (Nuninger, 2010).

A partir des données récoltées, des informations supplémentaires peuvent être modélisées, par exemple la hauteur des arbres, en utilisant le «Modèle Numérique de Hauteur» (MNH), (ONF, 2018; IGN 2023). Pour appliquer les données fournies par le LiDAR, la cartographie émise par cette méthode doit être calibrée. Cela consiste en un géoréférencement, réalisé à l'aide d'un travail de terrain qui consiste à réaliser des mesures sur une zone d'étude d'un rayon de quinze mètres. Ces zones d'études, appelées «placettes» sont au nombre de 750 sur le périmètre du Parc, et ont été sélectionnées selon un quadrillage systématique, afin que l'échantillon soit le plus représentatif pour l'analyse statistique des forêts. Pour éviter de grands changements dans la couverture végétale, les mesures sur le terrain doivent être terminées dans les deux ans suivant la cartographie LiDAR pour que les travaux de modélisations soient les plus exacts possibles. Les mesures à tous les points d'observation doivent donc être terminées en 2024 pour le territoire du Parc, car les vols LiDAR ont eu lieu en 2022. En coopération avec l'ONF (Office National des Forêts) et l'ANA-CEN Ariège (Association des Naturalistes d'Ariège - Conservatoire d'Espaces Naturels), le PNR a décidé d'utiliser la cartographie LiDAR dans le cadre du projet Life Artisan, et donc de mener à bien ce projet de calibration des données sur le terrain. Ce travail sur le terrain consiste en de la collecte de données, il est effectué par trois binômes, généralement constitués d'un gestionnaire forestier professionnel et d'un stagiaire, employés aux deux tiers par le PNR et à un tiers par l'ANA-CEN et l'ONF. Un soutien technique est fourni par l'ONF. La calibration des données LiDAR sur le terrain a mobilisé un total de six stagiaires rien qu'au sein du PNR PA. Mon stage s'inscrit dans cette continuité, dans l'objectif de mener à bien le travail de terrain pour permettre la calibration des données LiDAR.

L'objectif de l'implication du PNR, dans le cadre du projet Life Artisan, est de suivre les caractéristiques de la forêt sur le territoire dans un contexte de changement climatique. L'objectif est de mettre en place un observatoire permanent, mais aussi d'avoir une meilleure connaissance de ces milieux forestiers pour leur gestion et leur protection.

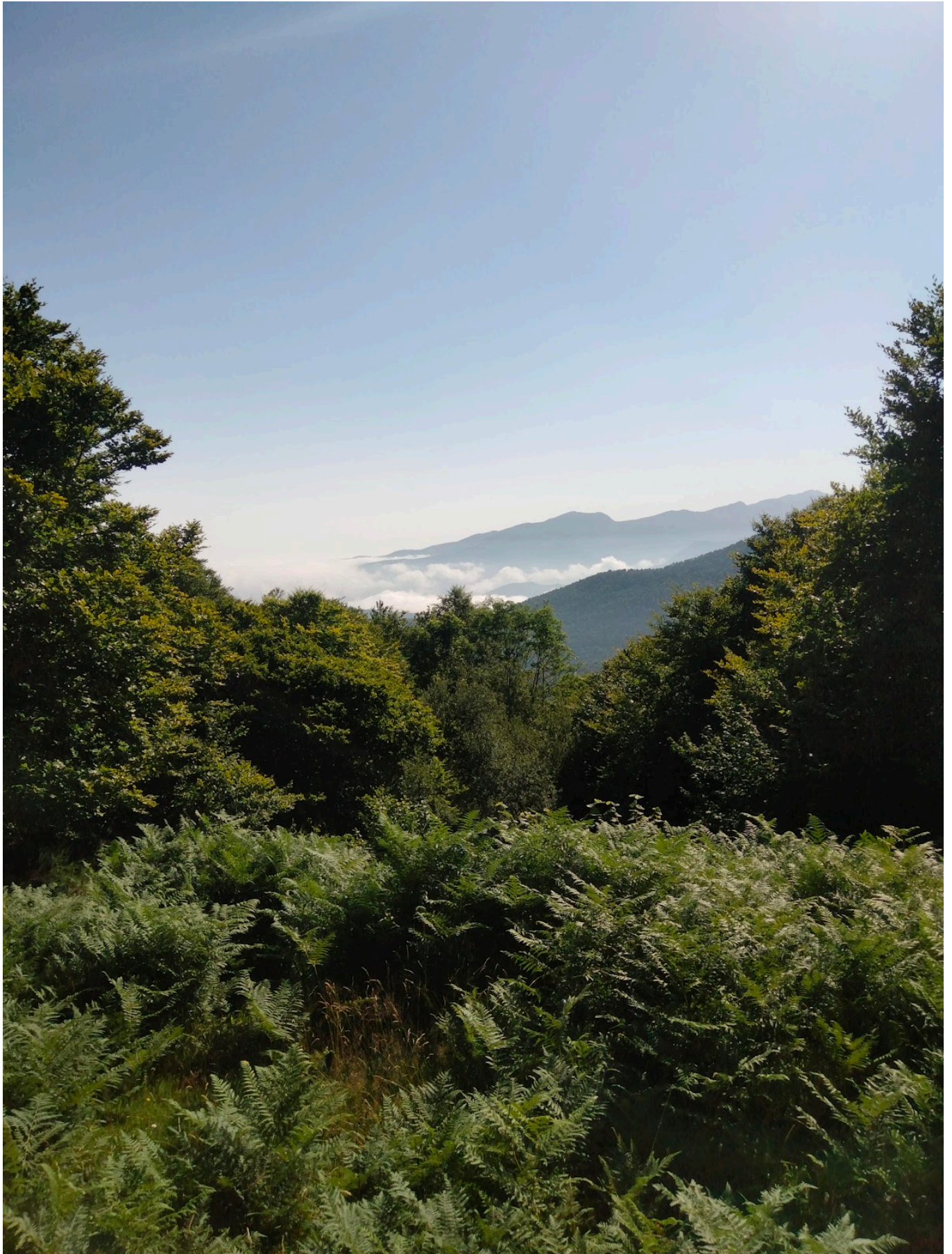
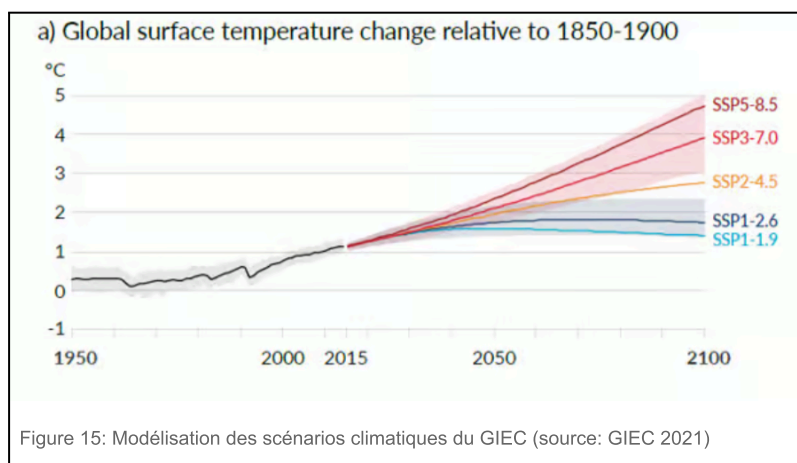


Figure 14: Photographie d'une fougeraie au milieu de milieux boisés dans le PNR PA

II. Cadrage théorique: Les forêts, des écosystèmes aux multiples enjeux

Les forêts jouent un rôle important dans la régulation du climat mondial, agissant comme des puits de carbone qui absorbent le dioxyde de carbone de l'atmosphère et atténuent ainsi le réchauffement climatique. Cependant, elles sont menacées par différents types de dégradations, exacerbées par les activités humaines et le changement climatique. La protection et la conservation des forêts deviennent donc des priorités mondiales pour préserver la biodiversité et les services écosystémiques essentiels qu'elles fournissent. L'amélioration de notre compréhension des forêts nous permettrait de faciliter sa préservation dans sa globalité. Pour parvenir à un niveau de connaissance plus fin des milieux forestiers, il existe différents outils dont la modélisation des forêts permise par la technologie LiDAR. Cette technique permet de cartographier et de suivre l'évolution des forêts avec une grande précision, fournissant des données pour des stratégies de gestion et de conservation plus efficaces.

A. Les forêts au temps du réchauffement climatique



Depuis 1990 le GIEC publie des rapports nous alertant sur les effets des émissions de gaz à effets de serre produites par les activités humaines, ayant pour conséquence un bouleversement climatique, et une hausse des températures globales. Le GIEC réalise des scénarios prenant en compte divers facteurs (actions politiques,

mesure de diminution des gaz à effet de serre,...) révélant des hausses de températures plus ou moins importantes en fonction de ces variables (figure 15).

Ces changements climatiques peuvent perturber l'équilibre des écosystèmes et altérer les aires de répartition de la biodiversité. Diverses études examinent l'impact du réchauffement climatique sur la distribution des espèces végétales. Par exemple, Christian Piedallu (et al.) ont mis en lumière dans leur étude de 2009 intitulée «Impact potentiel du changement climatique sur la distribution de l'épicéa, du sapin, du hêtre et du chêne sessile en France» que même dans les scénarios du GIEC les plus optimistes (SSP1 sur la Figure 15), ces essences forestières verraient leur présence diminuer significativement en zone de montagne. Ce phénomène entraînerait un bouleversement complet des écosystèmes forestiers.

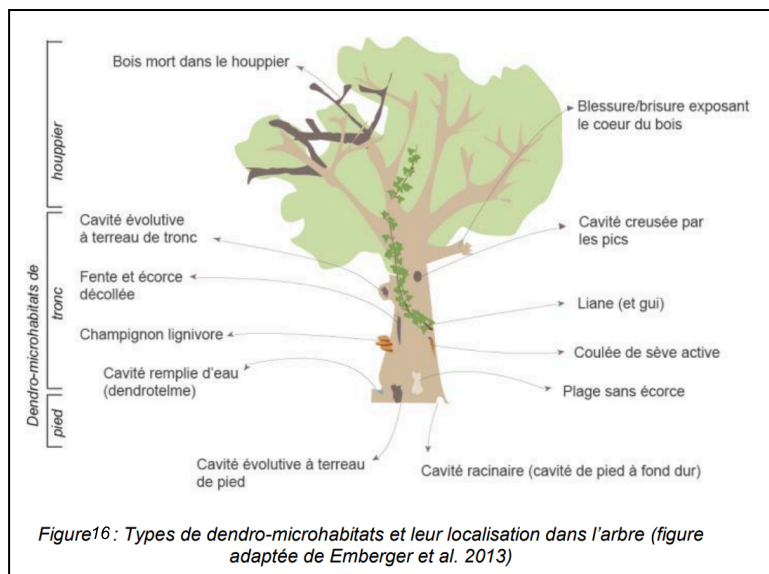
Aujourd'hui, la biodiversité subit une érosion significative due à des bouleversements d'origines anthropiques. Paul Crutzen a proposé dans les années 2000 la théorie de l'anthropocène, une nouvelle ère géologique marquée par l'influence profonde et durable de l'homme sur le système climatique. Cette ère se distingue par une augmentation de la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, résultant des émissions massives liées aux activités humaines. L'anthropocène ne se limite pas aux changements climatiques, mais englobe également une série de phénomènes, tels que la surexploitation des ressources naturelles et l'érosion de la biodiversité (Beau, 2018).

1. Quels impacts sur les milieux forestiers?

Le climat joue un rôle central sur la végétation et l'influence sur tout son cycle de croissance et de vie. En zone de montagne, les facteurs climatiques locaux sont à prendre en compte, par exemple la décroissance de température qui s'opère lorsque l'on monte en altitude induit l'étagement de la végétation (figure 10 page 17). Une variation des températures entraînerait alors, de manière lente, une montée en altitude des étages de la végétation. Ces phénomènes ont fait l'objet d'études et ont été démontrés dans divers travaux menés dans les Alpes ou en Scandinavie notamment (Courbaud et al., 2010).

Les changements qui s'opèrent sur le climat ont des conséquences multiples sur les milieux forestiers: augmentation des sécheresses, des risques d'incendies, de propagation des parasites et des maladies. Ces changements de conditions dans lesquels évolue la végétation entraînent une fragilité accrue des semis et une hausse des taux de mortalité des arbres.

Ces modifications des milieux boisés ont un impact direct sur la biodiversité forestière. La forêt abrite une grande part de la biodiversité terrestre. Comme on le sait maintenant, l'érosion de la biodiversité est largement causée par les activités humaines. La diversité en forêt revêt une importance capitale pour plusieurs aspects fondamentaux de son fonctionnement. D'abord, elle contribue à la régénération de la forêt : les insectes et les mammifères assurent la dispersion des graines et la fécondation des fleurs, permettant ainsi le renouvellement des peuplements forestiers. Ensuite, cette diversité favorise la croissance des arbres en permettant l'apport de nutriments par des organismes comme les champignons mycorhiziens, qui s'associent aux arbres. De plus, elle joue un rôle crucial dans la protection de la forêt : les prédateurs et parasites des insectes ravageurs régulent leur propagation, maintenant ainsi l'équilibre écologique. Globalement, la diversité biologique garantit la robustesse et la résilience des écosystèmes forestiers, les rendant plus aptes à faire face aux perturbations et aux changements environnementaux (notes de cours, 2023). Il est donc essentiel d'intégrer la préservation de cette biodiversité dans la gestion et protection des milieux forestiers afin de garantir le bon fonctionnement de l'écosystème dans sa globalité.



Les milieux forestiers comprennent une grande diversité d'écosystèmes, comme des milieux rocheux, des milieux ouverts florifères, le bois mort, les arbres porteurs de dendromicrohabitats⁴,... Les dendromicrohabitats illustrés en partie sur la figure 16, peuvent abriter une grande partie de la faune forestière, notamment des insectes, qui comptent pour 90% de la diversité faunistique en forêt. Ces dendromicrohabitats dépendent en grande partie

des conditions du milieu forestier dans sa globalité. On comprend donc que le changement climatique, en impactant les peuplements forestiers, aura un impact aussi significatif sur la biodiversité sous toutes ses formes (flore, insectes, mammifères, oiseaux, champignons,...).

2. Des forêts résilientes?

Les forêts de montagne présentent une grande diversité, due aux variétés géomorphologique, micro-climatique, et pédologique, ce qui présente un atout majeur pour leur résilience en contexte de changements climatiques. En forêt de montagne la régénération naturelle est prédominante, favorisant une diversité d'essences qui augmente les chances de tolérance aux conditions futures (Courbaud et al., 2010). La faible fragmentation des forêts de montagne assure la connectivité des habitats forestiers, favorisant les processus de migration. La biodiversité est la plus élevée dans des conditions où les peuplements sont diversifiés et comportant des stades âgés, comme en zone de montagne. La forte diversité génétique des arbres permet également une adaptation rapide. La déprise agricole, notamment l'abandon du pâturage, facilite la remontée altitudinale des forêts en réduisant la pression des herbivores sur les jeunes pousses. Historiquement, les forêts de montagne ont démontré une bonne résilience après des perturbations comme les tempêtes, grâce à la proximité des sources de graines et à l'abondance d'espèces pionnières (Courbaud et al., 2010). Ces éléments suggèrent que les forêts de montagne sont bien équipées pour résister aux perturbations induites par les changements climatiques. Toutefois, il faut considérer que les interactions entre perturbations naturelles et changements climatiques peuvent entraîner des effets synergiques complexes, tels que des incendies ou des périodes de sécheresse prolongées combinées à des tempêtes et des infestations de ravageurs, qui fragilisent et augmentent la mortalité (Courbaud et al., 2010).

En matière de stratégie d'adaptation, différentes visions existent, l'une d'entre elles est de laisser les essences et espèces s'adapter naturellement. La sélection naturelle, en

⁴ «Un dendro microhabitat est une singularité morphologique portée par un arbre et qui est utilisée par des espèces parfois hautement spécialisées, au moins durant une partie de leur cycle de vie. Ils constituent des refuges, des lieux de reproduction, d'hibernation et de nutrition cruciaux pour des milliers d'espèces.» (Bütler et al., 2020)

tant que force motrice de l'évolution, favorise les espèces les mieux adaptées aux changements climatiques (ONERC, 2018). Chez les arbres, la diversité génétique est particulièrement forte, ce qui nécessite de privilégier la régénération naturelle et de maintenir un grand nombre de tiges à tous les stades du peuplement pour conserver cette variabilité (ONERC, 2018). Ces pratiques permettent de laisser aux forêts l'opportunité de faire preuve de résilience face aux changements environnementaux. Si l'on suit cette stratégie d'adaptation, il est recommandé de favoriser la biodiversité en mélangeant les espèces et en prolongeant la durée de vie des arbres, d'encourager la régénération naturelle en évitant les coupes rases brutales suivies de plantations, de conserver les peuplements fermés pour maintenir le sol couvert, et de maintenir des corridors écologiques (ONERC, 2018).

Une autre vision de l'adaptation aux changements climatiques et le remplacement des essences naturellement présentes sur un territoire, par des essences qui seraient plus résistantes aux conditions futures (résistantes aux sécheresses, et à des températures plus élevées notamment). C'est la stratégie que l'Etat souhaite adopter, en menant des recherches sur les essences qui seraient les plus adaptées au climat futur. L'ONF est chargé de mettre en place cette stratégie pour les forêts publiques et le CNPF pour les forêts privées. Dans cette démarche, le travail de recherche est nécessaire pour identifier l'aire de répartition des essences en fonction des conditions climatiques, et de les coupler à de la modélisation des scénarios futurs. Par exemple, il peut être envisagé d'implanter des essences historiquement présentes dans le Sud de la France, plus au Nord, en envisageant le climat futur (La Forêt Française, des Défis Multiples À la Croisée des Enjeux Environnementaux, Économiques et Sociétaux, s. d.). Cette stratégie ne repose pas sur une logique de résilience et se développe dans une logique de productivité des forêts. On peut s'interroger sur les impacts de cette stratégie notamment sur la biodiversité, car elle modifierait toute l'écologie des écosystèmes en place, essentielle pour le bon fonctionnement des milieux forestiers. Cette stratégie peut toutefois être intéressante à réaliser à une échelle expérimentale.

3. Le rôle des forêts dans la crise climatique

Bien que les forêts soient gravement affectées par le changement climatique, elles apparaissent également comme un moyen efficace de l'atténuer, notamment par leurs capacités d'absorption du carbone.

Les écosystèmes contribuent au bien-être humain et aux sociétés, (figure 9 page 16) leur permettant de s'adapter et de faire face aux défis du changement climatique. Dans leur article de 2012 Pramova et al. parlent d'une approche d'adaptation basée sur les écosystèmes (ABE) que mettent en avant des organisations internationales et non gouvernementales. Selon leur article, les arbres et les forêts soutiennent de 5 manières l'adaptation à l'échelle locale, des sociétés: *«Les forêts et les arbres fournissent des biens aux communautés locales confrontées à des menaces climatiques; les arbres régulent l'eau, les sols et le microclimat dans les champs agricoles pour une production plus résiliente ; les bassins versants forestiers régulent l'eau et protègent les sols afin de réduire les effets du climat; les forêts protègent les régions côtières contre les menaces liées au climat ; et les forêts et les arbres urbains régulent la température et l'eau pour rendre les villes résilientes.»*

Au-delà de ces services rendus à l'échelle locale pour contenir les effets du changement climatique, les forêts jouent un rôle de captation du carbone et ainsi sont centrales dans les stratégies nationales d'objectif de neutralité carbone. Cette atténuation du changement climatique peut se faire de plusieurs manières: séquestration du carbone par les arbres et les sols, stockage du carbone dans les produits à base de bois issu de la foresterie et par l'utilisation de la ressource en bois au détriment d'énergies fossiles. Ces différents moyens de stocker le carbone peuvent entrer en concurrence puisque la surexploitation des forêts pour l'usage du bois comme ressource, nuit à l'effet de séquestration de carbone des sols et des arbres (Peyron, 2023).

Les arbres et les forêts apparaissent donc comme des leviers face au changement climatique, que ce soit à l'échelle locale en agissant sur les conséquences, ou bien en limitant le réchauffement par le stockage de carbone.

B. Des milieux à préserver

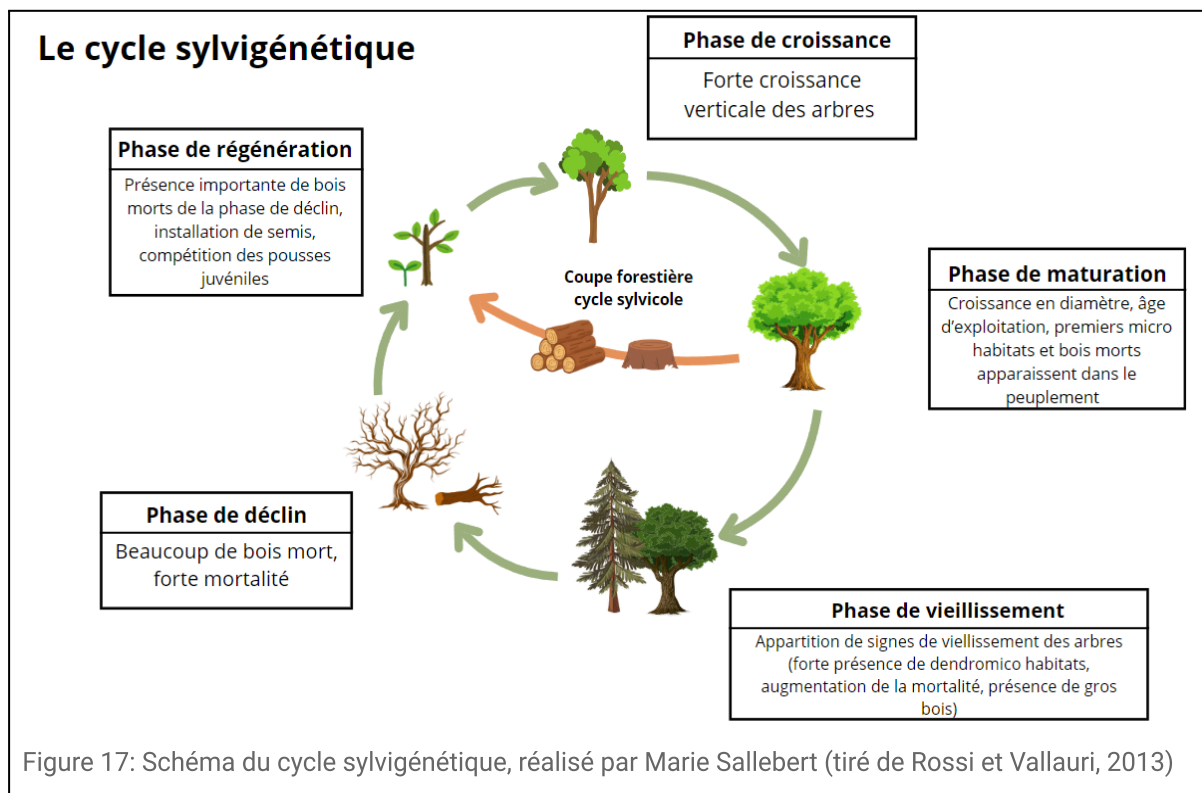
Dans ce contexte de changement climatique et de déclin de la biodiversité, des dispositifs existent pour mener une politique de conservation de ces écosystèmes fragilisés. Ces mesures ont été conçues pour permettre de diminuer les pressions anthropiques sur les milieux, afin d'aller vers un meilleur état de la biodiversité sur ces espaces avec un objectif d'atteindre un stade de maturité optimal (Lefèvre et al., 2011). Il existe des dispositifs de grande étendue comme les parcs ou réserves, mais aussi des dispositifs de petite surface comme les arrêtés de biotope ou les sites classés. Ces différents dispositifs n'ont pas les mêmes modalités, certains permettent les activités humaines, alors que d'autres les restreignent totalement. Les zones en protection stricte (pas d'intervention de l'Homme) permettent de réaliser des études, notamment sur les relations entre biodiversité et fonctionnement des écosystèmes (Lefèvre et al., 2011), et constituent des zones témoins de l'évolution spontanée de la végétation et de la biodiversité. Dans le cadre de la SNAP (voir I. A. 2. dernier paragraphe) ces zones de protection forte devraient se voir étendues à 10% du territoire. Ces modes de protection peuvent être les réserves biologiques, les réserves naturelles nationales, les réserves naturelles régionales, les arrêtés préfectoraux de protection de biotope, les parcs nationaux, ou encore les sites des conservatoires d'espaces naturels.

1. Vers une libre évolution? D'une fermeture des milieux subie à une libre évolution planifiée et pérenne

Comme déjà évoqué, au cours du temps les milieux forestiers se sont étendus en raison de changements socio-économiques. Pour beaucoup cette fermeture des milieux est subie et constitue un péril pour le patrimoine paysager de certains territoires. Ce phénomène peut être considéré comme une libre évolution des milieux naturels, qui se ferment progressivement pour laisser place à une forêt, parfois exempte de gestion. Aujourd'hui, un paradigme émergent et propose de réorienter la gestion forestière vers une «libre évolution» planifiée et pérenne. Cette approche vise à permettre aux écosystèmes de se régénérer et de s'adapter naturellement, tout en intégrant des stratégies de planification proactive pour garantir leur résilience et leur diversité. Transitionner de la fermeture imposée à une

évolution autonome et contrôlée représente un défi majeur pour l'adaptation des forêts, et pose de nombreuses questions quant à l'acceptabilité sociale de ce type de projet.

La protection des habitats appliquée aux forêts implique le respect de l'ensemble du cycle sylvigénétique. Pour cela, la mise en libre évolution apparaît comme une solution pertinente pour certaines forêts à forts enjeux écologiques, car permet de retrouver un cycle sylvigénétique naturel (figure 17) sans intervention de l'Homme.



Dans cette démarche, il existe la Trame de vieux bois, comprenant des îlots de sénescence⁵ et des arbres d'intérêts écologiques, elle est destinée à être laissée en libre évolution pour favoriser le développement et la conservation des espèces forestières liées au vieillissement du peuplement. Les vieux arbres et arbres morts, peu présents en forêt exploitée, constituent un enjeu pour la biodiversité forestière. Pour préserver au mieux ces habitats il peut être recommandé de mettre en place des réseaux de peuplements en libre évolution avec la création de grandes réserves reliées les unes aux autres par la présence d'îlots de sénescence et d'arbres favorables à la biodiversité (Savoie et al. 2021). En d'autres termes, de mettre en place une Trame forestière fonctionnelle qui prend en compte les enjeux écologiques et qui déploie des modes de protection adaptés.

Pour mettre en place ce type de libre évolution certaines méthodes consistent dans un premier temps à cartographier les forêts sensibles à placer en libre évolution en tenant compte de l'ancienneté de l'état boisé, des habitats de la faune et de la flore, du niveau de maturité du peuplement et de la date de la dernière coupe. La deuxième étape consiste à évaluer la faisabilité de la protection en prenant en compte les enjeux économiques et l'acceptabilité sociale auprès des acteurs de la filière forestière (Debaive et al. 2021).

⁵ «Un îlot de sénescence est une surface forestière sur laquelle les arbres peuvent accomplir leur cycle de vie naturel entier jusqu'à leur effondrement et décomposition complète.» (gflo.ch. <https://www.gflo.ch/fr/nature/environnement/ilot-de-senescence>)

Souvent, les zones privilégiées pour mettre en place de la libre évolution sont les secteurs où l'exploitation forestière est impossible, et où l'accès n'est de toute façon pas possible (Debaive et al. 2021). Il est pourtant primordial de prendre en compte des facteurs environnementaux afin de permettre un maillage de libre évolution pertinent, en fonction par exemple de la maturité du peuplement, de la présence de vieux arbres, d'une forte concentration d'arbres à gros ou très gros diamètre, de bois morts, des dendro-microhabitats,... Les forêts disposant de nombreux de ces indicateurs rendent de grands services dans les cycles biogéochimiques: séquestration de carbone, régulation des conditions climatiques locales, des fonctions écologiques: recyclage de la matière organique, maintien des services hydrologiques, contrôle des ravageurs, adaptabilité génétique face aux modifications du milieu dans un contexte de changement climatique (Savoie et al. 2021).

2. Les Trames forestières fonctionnelles

La Trame verte et bleue a pu apparaître comme un levier pour les politiques de protection de l'environnement et pour les politiques d'aménagement. En pratique on observe une utilisation de la TVB à l'échelle régionale; à travers l'élaboration des schémas régionaux de cohérence écologique (SRCE), et à l'échelle locale, à travers la prise en compte des continuités écologiques dans les outils de la planification spatiale, SCoT et PLU (Debray, 2015). L'intérêt principal de la TVB est qu'elle permet de visualiser par le biais de la cartographie les continuités ou discontinuités écologiques, et constitue un support opérationnel pour la mise en œuvre d'action de protection. Cette visualisation est essentielle pour les Trames écologiques forestières afin d'assurer la bonne santé des écosystèmes forestiers.

On peut citer plusieurs enjeux spécifiques aux Trames écologiques des milieux forestiers (Forêt | Trame Verte et Bleue, s. d.):

- Le maintien de Trame intra-forestière au travers par exemple d'îlots de vieux bois, de mares, landes, clairières, (etc.) au sein du massif forestier.
- Préserver les lisières, qui constituent l'interface entre milieux agricoles et forestiers, et sont un enjeu important pour différentes espèces.
- Améliorer l'état des connaissances concernant le déplacement des espèces, et mettre en perspective l'impact des fragmentations intra-forestière, et des interfaces avec d'autres milieux.
- Favoriser les initiatives locales en faveur de la préservation des milieux et de la biodiversité à l'échelle locale sur les territoires de projet (PNR, EPCI, SCoT,...).

A l'échelle locale, les moyens d'actions sont d'agir en faveur d'une Trame intra-forestière, prenant souvent la forme de « Trame de vieux bois », qui priorise les espèces forestières les plus exigeantes, et en faveur des forêts les plus matures et à haute naturalité (Cateau et al., 2013). Pour la mise en place de Trame de vieux bois, les structures s'appuient sur différents systèmes complémentaires:

<p>La conservation d'arbres dits «bio» ou «habitat» ainsi que d'arbres morts:</p>	<p>C'est une pratique qui vise à préserver les habitats des espèces cavicoles⁶ et saproxyliques⁷. Ces arbres jouent un rôle en servant d'habitats intermédiaires entre des zones de haute naturalité, facilitant ainsi la survie et le déplacement des espèces concernées (Cateau et al., 2013).</p>	
<p>La conservation de surfaces bien délimitées sous forme d'îlots de vieux bois:</p>	<p>Ces îlots permettent de renforcer la continuité écologique pour les espèces. Leur taille varie généralement entre 0,5 et 10 hectares et vise à soutenir les espèces dépendantes des stades de maturité et de sénescence des forêts (Cateau et al., 2013). En France, les forêts disposent de deux types d'îlots chacun ayant des objectifs et une efficacité distincts pour la conservation de la biodiversité :</p>	<p>Îlot de Vieillessement: Les arbres ne sont pas récoltés à leur âge d'exploitabilité habituel mais jusqu'à deux fois cet âge, conservant un objectif de production. Ces îlots permettent l'installation transitoire de certaines espèces caractéristiques des gros bois, mais peuvent être un piège pour la biodiversité saproxylique peu mobile (Cateau et al., 2013).</p> <p>Îlot de Sénescence: La forêt n'est plus exploitée, et les bois morts, au sol et sur pied, sont laissés en place, conservant l'intégralité du cycle sylvigénétique. Ces espaces sont destinés à accueillir les espèces inféodées aux microhabitats et à servir de réservoirs de biodiversité. Cependant, ils peuvent représenter un manque à gagner pour les propriétaires et poser des contraintes de sécurité pour l'accueil du public (Cateau et al., 2013).</p>

Figure 18: Tableau des composantes des Trames de vieux bois et leur fonctionnement (réalisé par Marie Sallebert, données de Cateau et al., 2013)

3. Une diversité d'outils de protection

Dans le cadre de la Stratégie nationale pour les aires protégées 2030, l'Etat français a annoncé un objectif ambitieux : augmenter le réseau d'aires protégées pour couvrir 30 % du territoire national, avec un tiers de cette surface bénéficiant d'une protection forte (Savoie, 2021). Cet engagement reflète une volonté de renforcer les efforts de conservation et de garantir la résilience des écosystèmes face aux défis environnementaux contemporains. Les aires protégées jouent un rôle de préservation de la biodiversité, en fournissant des refuges pour les espèces menacées et en maintenant les services écosystémiques essentiels au bien-être des sociétés humaines. Les aires protégées et leur fonctionnement sont très variés, le tableau suivant synthétise une partie des aires protégées qui existent et qui sont pertinentes dans le cadre de protection des milieux forestiers.

⁶ Les espèces cavicoles: vivant dans les cavités.

⁷ Les espèces saproxyliques dépendent du bois en décomposition pour réaliser leur cycle de vie.

Dispositifs de conservation	Type de dispositif	Fonctionnement et réglementation
Réserve biologique intégrale (RBI)	Arrêté ministériel	Dans les RBI sont exclues toutes interventions sylvicoles, on y laisse place à de la libre évolution, elles offrent des zones témoins de l'évolution naturelle de la forêt. Elles sont gérées par l'ONF.
Réserve biologique dirigée (RBD)	Arrêté ministériel	Les RBD constituent des aires où l'ONF met en place une gestion spécifique pour la préservation d'espèces ou de milieux naturels rares et fragiles.
Arrêté préfectoral de protection de biotope	Arrêtés préfectoraux ou ministériels	Ils ont pour objectifs la préservation d'habitats d'espèces protégées. C'est un outil de protection à portée réglementaire de niveau départemental, ils peuvent donc prendre un caractère restrictif quant à certains usages, tels que des travaux qui nuiraient aux milieux et donc aux espèces associées.
Sites acquis des conservatoires d'espace naturel	Protection par maîtrise foncière, (CEN)	Les conservatoires d'espaces naturels sont propriétaires et ont en gestion différents sites naturels, les objectifs pour ces milieux sont la connaissance, la protection, la gestion, la valorisation et l'accompagnement de l'environnement.
Obligation réelle environnementale (ORE)	Dispositif foncier	Les ORE sont des contrats destinés aux propriétaires fonciers souhaitant s'engager sur la protection de l'environnement. Il repose sur la volonté des acteurs à s'engager, que ce soit du propriétaire ou de la collectivité ou établissement public cosignataire du contrat. L'objectif est de garantir un maintien, une gestion ou une restauration du milieu et sa biodiversité, en prenant en compte les services écosystémiques. Ces contrats peuvent s'inscrire sur une durée allant jusqu'à 99 ans.
Espace naturel sensible (ENS)	Protection par maîtrise foncière (département)	Les ENS sont gérés par les départements dans l'objectif de préserver l'intérêt paysager ou biologique d'un site considéré comme menacé ou fragile. Il fait l'objet de mesures de protection et de gestion.
Zones cœurs de parcs nationaux	Protection réglementaire	Ce sont des espaces mis en réserve dans l'objectif de garantir la préservation de la biodiversité et du patrimoine naturel considéré comme exceptionnel.
Les réserves naturelles	Protection réglementaire	L'objectif des réserves naturelles est de préserver à long terme les milieux naturels ayant de forts enjeux en termes de fonctionnalité écologique, ou de valeur patrimoniale.
Sites classés	Décret	L'objectif de ces sites classés est de préserver durablement des sites considérés comme des monuments naturels pour des raisons patrimoniales.
Réserves nationales de chasse et de faune sauvage (RNCFS)	Protection réglementaire	Ces réserves sont co-gérées par l'OFB et l'ONF, elles ont pour intérêt de préserver une quiétude pour la faune en interdisant notamment toute pratique de la chasse. L'ONF veille à une gestion durable des forêts présente dans ces RNCFS.

Figure 19: Tableau de différents modes de protection pertinents pour la protection des milieux forestiers et leurs fonctionnement (réalisé par Marie Sallebert, données INPN)

C. Les apports de la télédétection pour la connaissance des forêts

La télédétection révolutionne notre compréhension et notre gestion des forêts en offrant des moyens avancés et efficaces de collecte de données. Parmi ces technologies, le LiDAR se distingue par sa capacité à fournir des informations détaillées et précises sur la structure et la composition des forêts. Grâce à cette technologie, il est possible de surmonter les limitations des relevés de terrain traditionnels, notamment dans les zones difficiles d'accès, et de mieux orienter les efforts de gestion et de conservation forestière.

1. Un nouveau regard sur les forêts

La technologie LiDAR (Light Detection and Ranging) repose sur l'émission et la réception d'impulsions laser, permettant de représenter les objets situés à la surface de la Terre sous forme de nuages de points en trois dimensions (voir page 20 pour plus de détail sur la technologie LiDAR). Cette méthode fournit des informations géométriques précises sur la hauteur du couvert végétal ainsi que sur la structure interne et la position du sol, produisant à la fois des Modèles Numériques de Terrain (MNT) et des Modèles Numériques de Surface (MNS). Les données LiDAR sont utilisées pour cartographier divers paramètres forestiers tels que le diamètre moyen des arbres, la surface terrière, et le pourcentage de feuilles (Monnet et al., 2020). Ces paramètres sont estimés à l'aide de modèles reliant les mesures de terrain aux données capturées par le LiDAR. Par exemple, dans le Parc Naturel Régional des Bauges, le travail de calibration effectué pour le LiDAR, et à constituer l'état initial d'un observatoire permanent des forêts. Les cartes obtenues, combinant les données LiDAR et les mesures de terrain, permettent une analyse détaillée de la structure forestière.

Les informations fournies par la télédétection LiDAR sont cruciales pour définir des politiques forestières et pour la gestion des forêts. Elles permettent notamment d'identifier les forêts qui stabilisent les sols et préviennent les avalanches, de détecter les forêts matures qui se caractérisent par des arbres à gros diamètre, des arbres morts ou sénescents (Monnet et al., 2020). La télédétection LiDAR permet également de modéliser les forêts ayant une forte capacité d'accueil de la biodiversité, afin de choisir de manière plus pertinente les zones de protection, comme pour les Trames forestières (Monnet et al., 2020). Le LiDAR permet d'obtenir une vision globale des forêts, impossible à obtenir autrement en raison des coûts élevés et du temps nécessaire pour les relevés de terrain, notamment dans les zones montagneuses difficiles d'accès. Il permet d'identifier les zones à fort enjeux, qui peuvent ensuite être explorées sur le terrain afin de confirmer et de planifier une gestion adaptée.

Cette modélisation peut également représenter un outil de sensibilisation pour les propriétaires forestiers en leur fournissant des données précises et accessibles sur l'état de leurs forêts.

Le LiDAR est considéré comme la meilleure technologie de télédétection pour cartographier les forêts grâce à sa précision et à la richesse des données qu'il fournit.

2. Les forêts matures

Une forêt mature peut se définir comme une forêt ayant au moins atteint la phase de vieillissement du cycle sylvigénétique (figure 17 page 28), les forêts les plus mûres prennent la forme de mosaïque de peuplement représentant les cinq étapes du cycle sylvigénétique (Savoie J.M et al., 2021). Les forêts matures se distinguent des forêts anciennes qui se définissent comme des forêts dont l'état boisé est continu depuis le

minimum forestier du XIXe siècle, observable sur les cartes d'Etat major. Ces forêts anciennes ne sont donc pas exploitées depuis longtemps et ont pu retrouver un fonctionnement similaire à celui des forêts primaires (Savoie J.M et al., 2021). L'identification de ces forêts anciennes se fait par analyse cartographique et travaux de terrain. En revanche, pour identifier les forêts matures, l'outil LiDAR apparaît comme une approche prometteuse qui fait l'objet d'expérimentation financée dans le cadre de mission d'intérêt général de l'ONF. La modélisation LiDAR pourrait permettre de réaliser un calcul de l'indice de maturité des forêts. La modélisation ferait donc apparaître les zones forestières présentant une maturité plus importante, donc les potentiels réservoirs de biodiversité, corridors écologiques ou îlots de sénescence entre les réservoirs de biodiversité.

L'indice de maturité est un indice relatif qui utilise les nuages de points LiDAR, qui permet un calcul d'indicateur métrique, ainsi que les mesures de calibration terrain qui permettent la prise en compte du positionnement des arbres et des inventaires. L'indice est relatif ce qui signifie qu'il ne quantifie pas de surface forestière mais qualifie une zone par rapport à une autre. Cela permet donc de comparer la maturité d'une forêt par rapport à d'autres forêts d'un même territoire (Marc Fuhr).

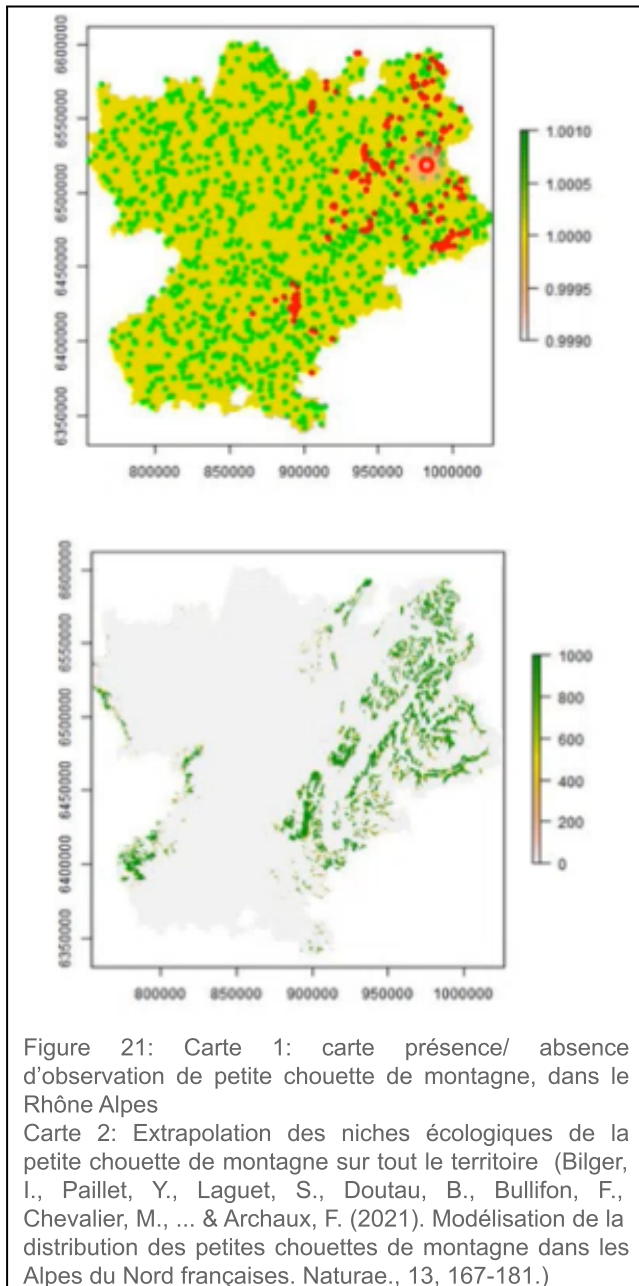
$$\text{IMAT} = \frac{1}{4} \left(\frac{G \text{ TTGB}}{G \text{ TTGB max}} + \frac{G \text{ BMD}}{G \text{ BMD max}} + \frac{V \text{ BMS}}{V \text{ BMS max}} + \frac{ND \text{ BMS}}{ND \text{ BMS max}} \right)$$

4 ordres de grandeurs de l'IMAT
 Indice de MATurité
 Surface de Bois Mort Debout / Surface de Bois Mort Debout maximum sur l'ensemble du territoire
 Surface Terrière de Très Gros Bois / Surface Terrière de Très Gros Bois maximum sur l'ensemble du territoire
 Nombre de stade de décomposition du Bois Mort au Sol / Nombre de stade de décomposition du Bois Mort au Sol maximum sur l'ensemble du territoire
 Volume de Bois Mort au Sol / Volume de Bois Mort au Sol maximum sur l'ensemble du territoire

Figure 20: Formule de l'indice de maturité (Marc Fuhr)

L'indice de maturité prenant en compte la surface de très gros bois, de bois mort debout, du volume de bois mort au sol et les différents stades de décomposition du bois mort au sol de manière relative avec l'ensemble du territoire, il donne un indice de maturité, compris entre 0 et 1 et permet de révéler des «zones non mature à assez mature» et des «zones mature à assez mature».

3. Des cartes prédictives d'habitats d'espèces



Un habitat naturel est un environnement dans lequel une espèce animale ou végétale vit et se développe de manière naturelle, sans l'intervention directe et significative de l'homme. C'est un espace physique qui offre les conditions nécessaires à la survie, à la reproduction et à l'épanouissement d'une espèce.

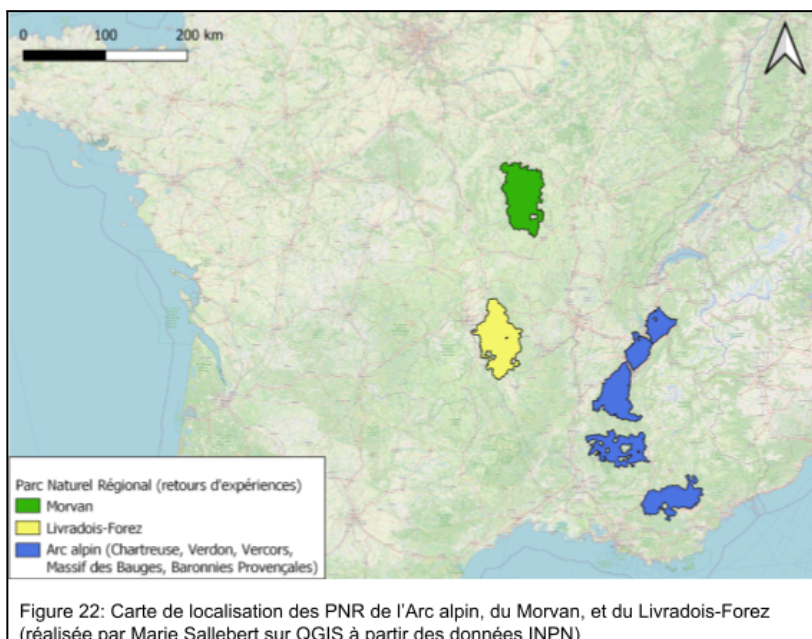
Des expérimentations de l'outil LiDAR semblent encourageantes pour cartographier les habitats potentiels de certaines espèces comme notamment les petites chouettes de montagne. Ces cartes prédictives de l'habitat des espèces reposent sur des cartes de présence/ absence d'espèces produites par des observations terrain (figure 21 carte 1). Les observations réalisées permettent de constituer des modèles qui expliquent la présence de l'espèce, comme des données topographiques et dendrométriques (Bilger, I., Paillet, Y., Laguet, S., Doutau, B., Bullifon, F., Chevalier, M., ... & Archaux, F. (2021). Modélisation de la distribution des petites chouettes de montagne dans les Alpes du Nord françaises. *Naturae.*, 13, 167-181.). Ces données étant produites par le LiDAR, on peut les extrapoler à l'ensemble du territoire et représenter des secteurs favorables à la présence de l'espèce (Figure 21, carte 2). Ces cartes prédictives d'habitats peuvent révéler des secteurs où l'on ne dispose pas de

données issues d'observations et peuvent alors donner des indications sur des secteurs à prospecter.

Cet indicateur environnemental que peut produire le LiDAR, permet d'identifier des zones à explorer pour l'observation d'espèces et ainsi d'identifier des secteurs à fort enjeu de conservation.

D. Retours d'expériences

Nous allons ici examiner diverses études de cas de PNR ayant mis en œuvre des travaux similaires aux objectifs du stage, à savoir la mise en place de Trames forestières fonctionnelles, telles que les Trames de vieux bois, ou l'utilisation du LiDAR pour identifier des zones à forts enjeux écologiques. À cette fin, nous présenterons les différentes études et les résultats obtenus par les PNR du Morvan, du Livradois-Forez, ainsi que les PNR de l'arc alpin (Chartreuse, Vercors, Massif des Bauges, Baronnies Provençales, Verdon) (figure 22). Cette partie vise à



faire un état des lieux des projets similaires qui ont été menés, nous analyserons dans la partie résultats ce que ces retour d'expérience ont apporté dans le cadre de mon travail.

1. L'étude des forêts matures au PNR du Morvan

Le terme de forêt mature désigne les stades avancés de la dynamique forestière, allant de la fin du stade de croissance à celui de sénescence. Souvent tronqués dans les forêts exploitées pour la production de bois, ces stades incluent à la fois des forêts peu ou plus exploitées. Les forêts matures présentent des caractéristiques structurales spécifiques, telles qu'une diversité dendrométrique, une abondance de bois mort et de nombreux dendro-microhabitats. Ces forêts fournissent divers services écosystémiques, dont la séquestration de carbone, la protection contre les chutes de pierres, et la conservation de la biodiversité. De nombreuses espèces dépendent des attributs des forêts matures, nécessitant des réseaux interconnectés de ces forêts pour leur conservation. Pour réaliser une mise en réseau des forêts matures, la priorité est à l'identification de ces forêts, la technologie LiDAR est de plus en plus utilisée dans cet objectif. Le PNR du Morvan a donc travaillé à la mobilisation de ces données LiDAR pour identifier les forêts matures, sur ce territoire où l'exploitation forestière est prégnante.

Les données LiDAR ont été collectées entre janvier et mars 2019. La campagne a couvert l'ensemble du territoire du PNR avec un référentiel de 257 placettes, dont 173 placettes relevées en 2020 par le PNR du Morvan et 84 placettes par l'ONF, issues du suivi des Réserves Biologiques. Les placettes de mesure LiDAR ont été placées majoritairement sur des forêts composées de peuplements autochtones et non de manière aléatoire et

homogène sur l'ensemble du territoire. Les protocoles incluent la géolocalisation précise et le relevé des très gros arbres vivants, des gros bois morts debout, et des grosses pièces de bois mortes au sol.

La modélisation a révélé que la majorité des placettes du référentiel sont peu ou pas matures (71%), avec seulement 5,1% de placettes représentant des forêts matures. Les livrables de l'étude incluent un rapport scientifique et une couche SIG modélisant la maturité des forêts en pixels de 30x30 m. Les modèles ont montré une bonne précision pour les indices de maturité et la surface terrière des très gros bois, bien que des erreurs soient plus importantes pour d'autres attributs comme les bois morts debout.

L'IMAT s'exprime en indice relatif compris entre 0 et 1. Les placettes dont l'IMAT est inférieur ou égale à 0,25 sont considérées comme pas ou peu matures, et celles supérieures à 0,25 sont considérées comme assez à très matures. L'échantillonnage est décomposé de la manière suivante: $IMAT = 0$ pas mature ; $0 < IMAT < 0.25$ peu mature ; $0.25 \leq IMAT < 0.5$ assez mature ; $IMAT \geq 0.5$ très mature.

Pour contrôler la qualité des cartes d'IMAT produites à partir des données LiDAR, le PNR du Morvan a sélectionné 41 placettes de validation à mesurer sur le terrain. Ces placettes ont été sélectionnées de manière aléatoire sur les placettes prédites par la modélisation avec un indice de maturité supérieur à 0,25. L'objectif de cette démarche est d'évaluer le taux de vrais positifs afin de jauger la fiabilité de l'IMAT. Ont été exclues les placettes à faible surface terrière qui sont souvent des parcelles exploitées mais qui présentent des similitudes avec les forêts matures dans la modélisation.

Un nouveau projet vise à utiliser le modèle de maturité pour étudier la connectivité des forêts matures et développer une Trame de vieux bois efficiente. En sélectionnant des pixels avec des indices de maturité élevés et en effectuant une photo-interprétation manuelle, environ 4 000 ha de forêts ont été identifiés comme les plus matures, classées en cinq niveaux d'enjeu. Les forêts à haute valeur écologique (FHVE) du Morvan bénéficient d'une stratégie de préservation 2023-2035, visant à accroître leur naturalité et leur connectivité, avec la collaboration de plusieurs structures de gestion forestière et de conservation.

L'utilisation du LiDAR dans l'étude des forêts matures du PNR du Morvan a permis de cartographier et modéliser précisément la maturité des forêts, fournissant des données pour leur préservation.

2. La Trame de vieux bois du PNR Livradois-Forez (PNR LF)

Le projet Trame de Vieux Bois, mené par le Parc Naturel Régional Livradois-Forez qui va être explicité ici repose sur un entretien mené avec la chargée de mission forêt du PNR. Le projet s'inscrit dans un contexte de préservation et de restauration de la biodiversité forestière. Le Livradois-Forez est une région riche en biodiversité, où la forêt joue un rôle tant sur le plan écologique qu'économique. La préservation de la biodiversité forestière permet de maintenir un écosystème plus sain et productif. C'est dans ce cadre que le PNR a lancé le projet Trame de Vieux Bois, visant à protéger et à favoriser le développement des forêts anciennes et matures. Les principaux objectifs sont la restauration des corridors écologiques forestiers et l'amélioration de la résistance et de la résilience des forêts. Le projet vise également à démontrer que la biodiversité est fondamentale pour la production durable de bois.

Le projet Trame de Vieux Bois repose sur la création d'îlots de sénescence, des zones où les arbres sont laissés en libre évolution pour permettre le développement d'un

écosystème forestier mature. Ces îlots sont reliés par des corridors écologiques, facilitant la dispersion des espèces et la continuité écologique entre différentes zones forestières. Ils ont aussi mis en place la préservation d'arbres habitats qui peuvent faire office de relais de biodiversité et fonctionner comme des corridors en pas japonais. La première étape du projet a été la cartographie des forêts anciennes et matures, les forêts anciennes avaient déjà fait l'objet d'un travail cartographique réalisé par des associations locales, pour les forêts matures ils se sont appuyés sur leur connaissances des milieux boisés du territoire et ont mené des études sur ces forêts. Cette cartographie a permis de classer les forêts par niveau de maturité et d'identifier les zones prioritaires pour l'implantation des îlots de sénescence. Une autre étape du projet a été la prise en compte de certaines espèces patrimoniales ou hautement forestières. Ils ont mené des études sur les lichens, les coléoptères et les syrphes, sur des «hot-spot» de biodiversité pour les évaluer, car ces groupes d'espèces sont des indicateurs de maturité forestière. Ces travaux ont été réalisés sur les secteurs connus des associations et des experts pour leur maturité relative aux autres forêts. Des études ont également été menées sur des petites chouettes de montagnes comme la Tengmalm ou la Chevêchette, ou encore sur le chat forestier. L'objectif était d'analyser les habitats de ces espèces afin d'accentuer la préservation des forêts correspondant aux conditions de leur habitat naturel et aussi de favoriser leur déplacement entre ces zones cœurs de biodiversité.

Pour encadrer la mise en protection de cette Trame de vieux bois, il existe des conventions avec les communes pour les forêts publiques, en intégrant les îlots dans les prochains aménagements forestiers. Pour conventionner avec les propriétaires forestiers il existe deux possibilités; pour ceux avec un Plan Simple de Gestion des avenants ont été ajoutés pour inclure les îlots dans le réseau FRENE⁸. Pour les propriétaires sans PSG, une convention de dix ans a été établie avec le PNR.

Le projet a attiré une vingtaine de volontaires, principalement par le biais de la communication et des échanges sur le terrain. La majorité des îlots effectifs ne se trouvent pas dans les zones les plus matures, mais le projet accepte tous les volontaires, même en dehors de ces zones prioritaires, car les actions dépendent avant tout de la volonté des propriétaires en raison de la faible part de forêt publique sur leur territoire. Le PNR a mis en place plusieurs outils pour aider les propriétaires et les gestionnaires forestiers :

- **Livret et plaquette** : Un livret de 28 pages et une plaquette de 4 pages expliquent les bénéfices de la Trame de Vieux Bois et fournissent des conseils pratiques.
- **Matériel Forestier** : Kits de marquage, compas de grande taille, Vertex, tablettes de terrain, etc. mis à disposition pour les gestionnaires forestiers ou propriétaires souhaitant réaliser des inventaires ou autres mesures s'inscrivant dans une démarche de préservation.
- **Séminaires et Réunions** : Des séminaires ont été organisés pour informer et former les participants sur différentes thématiques en lien avec les enjeux écologiques forestiers.

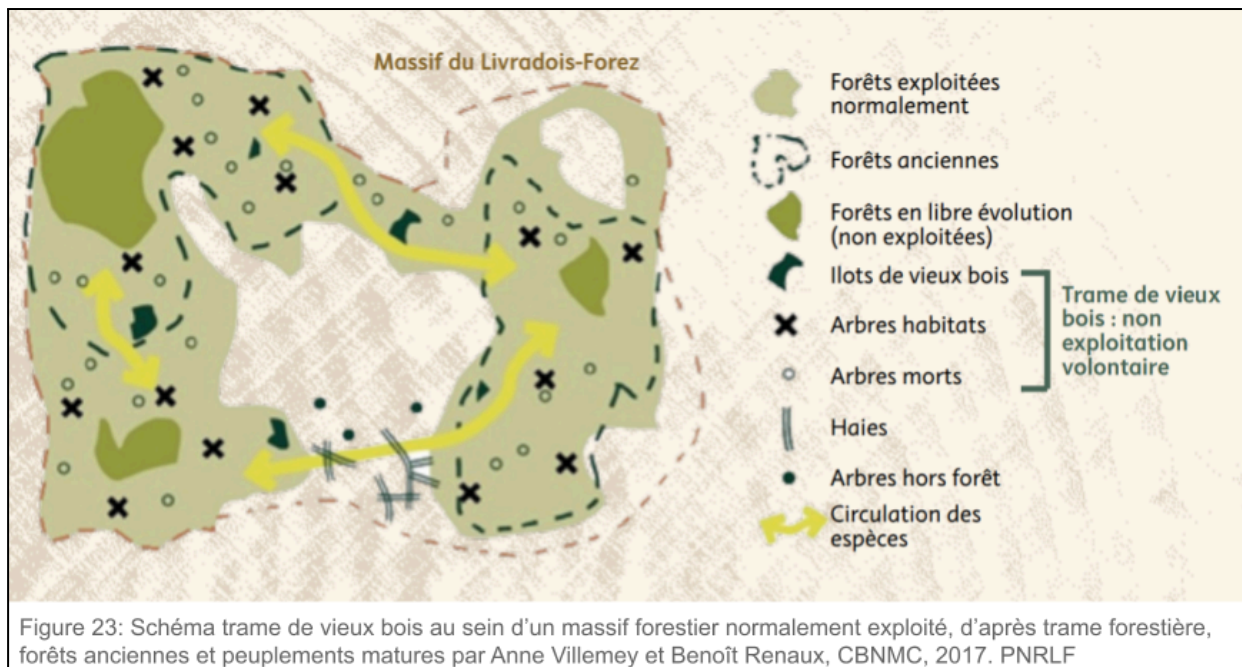
Le projet de Trame de vieux bois en PNR Livradois-Forez a rencontré plusieurs limites:

⁸ FoRêts en libre Évolution NaturElle (FRENE), est un réseau d'observatoire de la biodiversité en Auvergne Rhône Alpes.

- **Limite de la Volonté des Propriétaires** : La principale difficulté est la réticence des propriétaires à s'engager, souvent en raison de préoccupations économiques.
- **Limite dû aux financements**: Les financements de ce type de projet s'inscrivent souvent sur des tranches de trois années, hors des évolutions en lien avec l'écologie forestière ou le changement des mentalités concernant la gestion forestière nécessite une prise en compte sur le temps long. Ces financements sur des temps courts ne permettent pas non plus de réaliser un suivi durable du projet de Trame écologique.
- **Petite Taille des Îlots** : Des îlots de petite taille, leur minimum est fixé à 0,5 ha mais parfois ils descendent à 0,3 ha, ce qui limite les bénéfices sur la biodiversité. Des études suggèrent que des îlots de 2 à 3 hectares seraient plus efficaces.

Pour développer un projet similaire, plusieurs recommandations peuvent être tirées de l'expérience du PNR Livradois-Forez :

1. **Cartographie précise** : Une cartographie détaillée des forêts anciennes et matures permet d'identifier les zones prioritaires.
2. **Engagement des propriétaires** : Il est important d'impliquer les propriétaires dès le début du projet, en leur expliquant les bénéfices écologiques et économiques. Des réunions d'information régulières et des documents pédagogiques sont indispensables.
3. **Conventions flexibles** : Adapter les conventions en fonction des types de propriétaires (communes, privés avec ou sans PSG) et prévoir des compensations financières autant que possible pour encourager la participation.
4. **Outils et Ressources** : Fournir du matériel forestier, des guides pratiques, et organiser des formations pour soutenir les gestionnaires forestiers.
5. **Suivi et évaluation** : Mettre en place un système de suivi sur le long terme pour évaluer l'impact des îlots de sénescence et ajuster le projet en conséquence.
6. **Collaboration avec la recherche** : Impliquer des organismes de recherche pour des études scientifiques sur les îlots de sénescence, permettant de mieux comprendre et valoriser les bénéfices écologiques.



3. Les PNR de l'arc alpin

Le projet inter-régional du massif des Alpes POIA, se concentre sur l'observation et la préservation des milieux pastoraux et des forêts matures dans les Parcs naturels régionaux des Massif des Bauges, Chartreuse, Vercors, Baronnies provençales et Verdon. L'objectif est de créer une méthode commune d'observation pour maintenir et restaurer ces milieux. Les forêts matures, définies comme des forêts anciennes avec des signes de vieillesse, sont des réservoirs de biodiversité résilients au changement climatique et ainsi que des lieux d'usages diversifiés, incluant la sylviculture et les loisirs. L'observation de ces Trames est essentielle pour identifier les indicateurs de leur bon fonctionnement et pour établir des protocoles d'observation normés. En utilisant des technologies comme le LiDAR et la photogrammétrie, le projet analyse les connectivités intra et inter-massifs pour assurer les échanges génétiques et la résilience des espèces. Au terme des deux années du projet, un observatoire durable sera construit pour suivre l'évolution de ces Trames et élaborer un programme opérationnel visant à les maintenir ou les restaurer, avec l'ambition d'étendre ces pratiques à d'autres territoires concernés.

Dans le cadre de ce projet différentes méthodes sont proposées. Pour optimiser la gestion des forêts en faveur de la biodiversité, il est préconisé de commencer par une analyse des données pour identifier les zones favorables avant de se rendre sur le terrain. Cela permet de gagner du temps et d'éviter des efforts inutiles. L'implication des propriétaires, qu'ils soient publics ou privés, est recommandée dès le début de la planification des îlots, notamment pour les intégrer dans la gestion des forêts de production. Dans les forêts privées, qui sont souvent morcelées et de petite taille, il ne serait pas toujours judicieux de créer de grands îlots de sénescence. À la place, il est recommandé de conserver des arbres de gros diamètres ou avec des micro-habitats, et de maintenir du bois mort au sol. La constitution de Trames de vieux bois nécessite une connaissance fine de la forêt pour identifier les secteurs appropriés, particulièrement dans les zones de production où les stades matures sont rares. L'identification de ces zones repose sur des critères tels que la maturité des peuplements, la présence de micro-habitats, la connectivité des îlots, et

la diversité des habitats. Pour procéder à l'évaluation des données de maturité produites par le LiDAR, le groupement de PNR délègue à l'INRAE, qui produit alors une cartographie de la maturité des territoires. Les recherches n'ont aujourd'hui pas trouvé d'alternative au LiDAR pour cartographier la maturité. Dans le cadre de ce projet, ils ont également travaillé à identifier des espèces caractéristiques. Pour analyser la fonctionnalité de la Trame et des connectivités pour la biodiversité forestière, ils font appel à un bureau d'étude

Enfin, la valorisation à long terme peut inclure des contrats Natura 2000 pour les îlots de sénescence, ou l'intégration au réseau FRENE pour promouvoir la libre évolution des forêts.

La dernière phase du projet vise à élaborer une stratégie pour préserver et restaurer la Trame des forêts matures. Trois priorités ont été définies : augmenter les surfaces de vieux bois par la création de nouveaux îlots de sénescence et renforcer le maillage d'arbres habitats ; sensibiliser les acteurs forestiers à l'importance des forêts matures et promouvoir l'échange d'informations ; et inciter les propriétaires fonciers ainsi que les acteurs de la filière bois à participer, en les informant sur les aspects juridiques et en développant des mécanismes d'indemnisation et de reconnaissance réglementaire pour les surfaces de vieux bois.

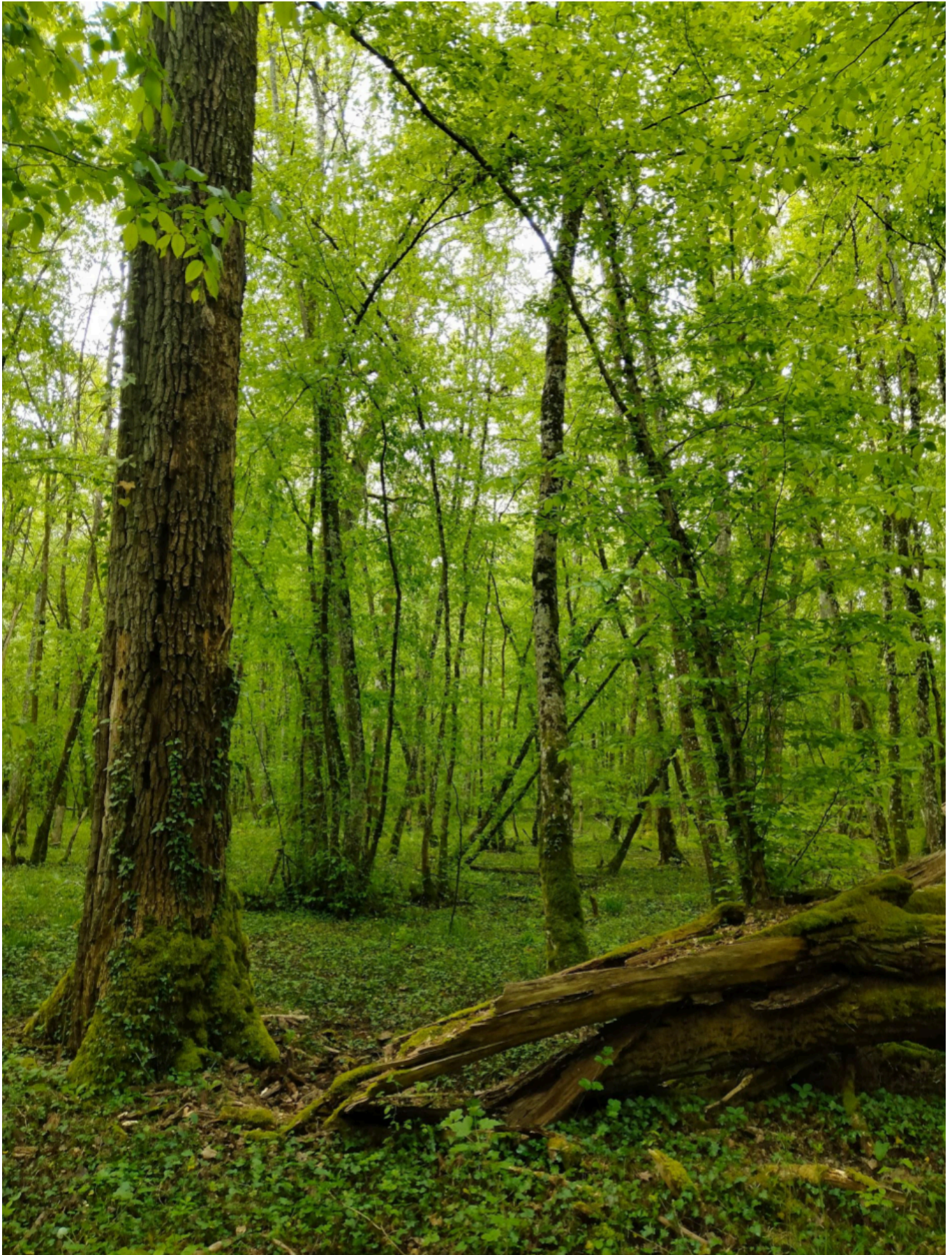


Figure 24: Photographie d'un îlot de sénescence dans le PNR de Lorraine (prise par Marie Sallebert, le 24/04/2024)

III. Cadrage méthodologique: du travail de terrain de calibration LiDAR à la stratégie de mise en place d'une Trame forestière dans le PNR PA

Dans cette partie nous allons aborder les différentes méthodologies déployées au cours du stage en passant par les différentes étapes du travail de terrain, pour la calibration du LiDAR dans les forêts des Pyrénées Ariégeoises jusqu'à l'élaboration et la mise en œuvre d'une stratégie pour une Trame forestière au sein du PNR PA. Cette section aborde les techniques de collecte et de traitement des données, les outils utilisés, ainsi que les actions menées aussi bien sur le terrain que pour l'avancée de la stratégie pour une Trame forestière. En fournissant une compréhension claire et structurée des méthodes employées, ce chapitre permet de saisir l'importance de chaque étape dans la construction du travail demandé et de ces objectifs.

A. Le travail de terrain

Les principales tâches consistent en l'organisation et la réalisation des travaux de terrain nécessaires pour collecter les données pour la calibration du LiDAR dans le cadre du projet Life Artisan. Cela inclut la vérification des outils nécessaires sur le terrain, la planification des points à relever et de leurs accès, l'organisation avec les gestionnaires forestiers indépendant pour effectuer les relevés, la coopération dans la réalisation des mesures sur le terrain, la communication avec les résidents ou propriétaires des zones forestières à étudier, la sauvegarde des données de terrain et leur téléchargement sur un dossier partagé, ainsi que la mise à jour de l'avancement du travail via Excel et QGIS.

1. La préparation des travaux de terrain

Les travaux de terrain en forêt servent à calibrer le LiDAR. Des points de relevés ont été tirés au hasard sur tout le territoire d'étude de manière homogène, espacé d'environ 1km et demi chacun. Certains points ont été écartés car ne se situant pas en zone forestière. Les 750 points restants doivent être mesurés, certains seront supprimés s'ils présentent une pente excessive ($>80^\circ$), zone non forestière, de l'eau ou une route à l'emplacement de la coordonnée,.... Une bonne organisation permet d'optimiser le travail de terrain, de déterminer le meilleur itinéraire et l'accessibilité des placettes. L'ONF a établi un protocole pour garantir une méthode uniforme dans la réalisation des relevés. Les points de relevés sont répartis entre forêts privées, réalisées par le PNR, et publiques, réalisées par l'ANA CEN Ariège et l'ONF, pour répartir la charge de travail. Il aurait été plus pertinent de répartir les placettes par secteur plutôt que par type de propriété afin d'éviter des déplacements dans les mêmes secteurs par différents groupes.

Les travaux de terrain menés depuis le début du projet ont permis de finaliser les mesures en forêts privées au cours du mois de juillet 2024, ce qui a permis aux équipes gestionnaires forestiers et stagiaires du PNR de venir en soutien sur les mesures en forêts publiques. Pour réaliser les mesures en forêts publiques il nous a fallu nous coordonner

avec l'ONF et l'ANA-CEN Ariège afin de récupérer le matériel nécessaire et se répartir les placettes de mesures.

Avant chaque départ sur le terrain nous devons veiller à ce que le matériel soit complet et bien chargé, que les déplacements soient bien anticipés et les rendez-vous pour chaque binôme bien planifié.

2. Des mesures pour la calibration du LiDAR

Les binômes de terrain pour le PNR se composent toujours d'un gestionnaire forestier professionnel indépendant et d'un stagiaire. À la fin des routes praticables, le binôme continue à pied. L'emplacement exact est recherché via GPS en utilisant l'application ONF Géo Relevé, et le centre du point de relevé est déterminé lorsqu'on se trouve à moins de cinq mètres de celui-ci. Un piquet métallique, fer à béton, est planté au centre de la placette pour permettre de la retrouver à l'avenir dans le cas de re-mesure. Par la suite, nous procédons à la collecte de données dans un rayon de 15 mètres.

Avec l'aide du GNSS Trimble, un GPS de haute précision, l'emplacement exact peut être déterminé et transmis. L'application SSpace permet de surveiller la précision en affichant le nombre et la localisation exacts des satellites disponibles au-dessus du point de relevé sur la carte Skyplot. Si les satellites sont trop éloignés ou en nombre insuffisant, cela peut

entraîner des imprécisions. À un emplacement dégagé, il y a souvent 20 à 30 satellites à proximité, dont au moins huit, de préférence quinze, sont utilisés pour déterminer la position exacte selon le protocole. Si suffisamment de satellites sont disponibles, un nouveau projet est créé dans ArpentGIS pour chaque jour sur le terrain.

Une fois la localisation enregistrée, la placette peut être mesurée. Pour cela, l'application Inventaire est utilisée, permettant d'enregistrer les données directement sur un smartphone pour chaque parcelle. Sur le périmètre de 15 mètres de diamètre, nous relevons les arbres avec un diamètres supérieurs à 17,5 cm et renseignons leur essence, l'azimut, le diamètre et la distance avec le centre de la placette. Selon le protocole, les mesures sont réalisées à 1,30 m pour le diamètre avec un compas



Figure 25: Utilisation d'un compas forestier, photographie prise par Marie Sallebert, 2024

forestier (figure 25). La distance de l'arbre au centre de la parcelle est mesurée à l'aide d'un hypsomètre Vertex, qui utilise des ultrasons pour déterminer les distances, les inclinaisons et les angles (figure 26). Le récepteur est placé au centre de la placette à 1,30 m de hauteur également.



Figure 26: Utilisation de Vertex pour mesurer la distance (photographie prise par Marie Sallebert, 2024)

Enfin, une boussole est utilisée pour déterminer l'orientation en degrés depuis le centre de la parcelle.

Une fois tous les arbres debout mesurés, il faut renseigner le bois mort au sol. Seuls les troncs d'un diamètre d'au moins 30 cm sur une longueur de 50 cm sont pris en compte. On renseigne également son stade de décomposition sur une échelle de 0 à 4.

Formes		Types		
Groupes		Loge de petite taille (ø < 4 cm)	Loge de taille moyenne (ø = 4-7 cm)	Loge de grande taille (ø > 10 cm)
Cavités l.s.	Loges de pic	CV11	CV12	CV13
	Cavités à terreau	Cavité à terreau de pied (contact avec le sol) (ø > 10 cm) CV21	Cavité à terreau de tronc (sans contact avec le sol) (ø > 10 cm) CV22	Cavité à terreau semi-ouverte (ø > 30 cm) CV23
	Orifices et galeries d'insectes	Orifices et galeries d'insectes (ø > 2cm ou □ > 300 cm²) CV31		
	Concavités	Dendrotelme (ø > 15 cm) CV41	Trou de nourrissage de pic (▽ > 10 cm, ø > 10 cm) CV42	Concavité à fond dur de tronc (▽ > 10 cm, ø > 10 cm) CV43

Figure 27: extrait de la fiche protocole d'identification des dendro microhabitats

Une fois ces mesures terminées, le binôme note les arbres considérés comme arbres habitats à l'aide de l'application Géo Relevé, en se basant sur l'illustration des dendromicrohabitats selon Larrieu, Paillet, Winter et al. 2018 (Figure 27). Un arbre-habitat est un arbre possédant au moins un dendromicrohabitat, une caractéristique morphologique qui peut abriter diverses espèces telles que des plantes, des champignons et des animaux. Pour une meilleure comparabilité et afin de ne pas dépasser le cadre de faisabilité, seuls les dendromicrohabitats des arbres avec un diamètre supérieur à 42,5 cm sont mesurés dans le cadre des mesures de terrain. Ces données ne sont pas utilisées pour la calibration du LiDAR, mais elles sont indicatrices d'enjeux écologiques pour la protection des forêts, un enjeu important pour le PNR et l'ANA-CEN Ariège.

3. Le déchargement des données récoltées

L'étape qui suit les journées de terrain est le déchargement des données dès notre retour au bureau. Cette étape comprend principalement la sauvegarde des données et la documentation du parcours et des placettes complétées, afin de conserver, organiser et partager les données, suivre et représenter l'avancement des mesures. Les étapes de sauvegarde des données incluent :

- Envoi des données de mesure des arbres au réseau de l'ONF directement depuis l'application Inventaire.
- Enregistrement des données GPS
- Sauvegarde des données de l'application GéoRelevé
- Téléchargement de toutes les données mentionnées ci-dessus dans un dossier partagé.
- Compléter les tableaux excel sur l'avancement des placettes et renseigner des informations comme l'accessibilité, le temps d'accès,...
- Compléter le projet QGIS illustrant l'avancé des mesures de placettes

B. Stratégie pour une Trame forestière fonctionnelle

L'élaboration d'une stratégie pour une Trame forestière fonctionnelle dans le PNR PA a nécessité une approche méthodologique rigoureuse. Cette section renseigne la méthode utilisée dans le cadre de l'élaboration des recommandations pratiques. Le déploiement de la stratégie a été enrichi par des séminaires, des rencontres thématiques et des entretiens avec des experts, ainsi qu'un travail de recherche bibliographique. En intégrant la contribution du LiDAR et de la Trame verte et bleue, j'ai proposé une stratégie adaptée aux spécificités du PNR PA. Pour organiser mon travail sur la période de stage, j'ai réalisé dès le départ un diagramme de Gantt reprenant les différentes étapes clés (Annexe 5). Cependant cette organisation planifiée au début de mon stage a subi de légères modifications, que ça soit aussi bien dans les tâches que les périodes prévues.

1. Mon approche pour la recherche bibliographique

Pour réaliser la mission de mise en place d'une stratégie pour une Trame de vieux bois, il est important de suivre une approche méthodique et exhaustive pour la recherche bibliographique.

Avant de commencer la recherche, il m'a fallu définir clairement les objectifs. Pour cette mission, mes objectifs ont été d'identifier les caractéristiques et les fonctions écologiques des Trames de vieux bois, d'analyser des études de cas d'autres territoires, d'étudier les bénéfices écologiques de la préservation des milieux forestiers et d'explorer les différents modes de protection potentielle à déployer.

Il est important de sélectionner des sources fiables et variées pour une recherche bibliographique complète. Mes recherches bibliographiques se sont majoritairement faites sur Google Scholar, au travers de thèses et de mémoires, de publications scientifiques variées, de retours d'expérience de diverses structures ou en explorant des sites officiels comprenant une documentation riche comme le site *Trame verte et bleue*. J'ai aussi bénéficié de la documentation disponible dans les bureaux du PNR, riche en ouvrages sur les milieux forestiers et leur préservation.

Pour mener à bien ce travail de recherche bibliographique j'ai utilisé une série de mots-clés spécifiques et pertinents pour optimiser les résultats de recherche comme par exemple: «forêts et réchauffement climatique», «Trame forestière», «Trame de vieux bois», «écosystèmes forestiers», «biodiversité forestière», «forêts anciennes», «forêts matures», «îlots de vieux bois», «modélisation LiDAR»...

Une fois les documents pertinents trouvés je les ai parcourus en effectuant une synthèse des points clés intéressants pour mon sujet, j'ai ensuite pu effectuer des comparaisons entre les différentes informations recueillies pour ne retenir que le plus pertinent. Les ouvrages utilisés pour ce rapport ont été classés dans une bibliographie répondant aux normes APA à retrouver à la fin de ce rapport.

Une fois la recherche bibliographique complétée, l'étape suivante a consisté à synthétiser les informations et à rédiger une partie état de l'art sur mon sujet structurée dans la partie II. Cadrage théorique. Dans cette partie j'ai introduit le sujet et les enjeux auxquels sont confrontés les milieux forestiers, les modes de protections utilisés pour ces écosystèmes, les outils tels que la télédétection pour la connaissance des forêts et discuté des différentes approches au travers de retours d'expérience.

2. Séminaire et rencontre sur la thématique des forêts

Pour approfondir ma compréhension des enjeux liés aux forêts et à la biodiversité, j'ai participé à un séminaire inter-Parcs de 3 jours dans le Parc Naturel Régional de Lorraine, suivis d'un atelier à Nancy sur le projet de recherche FISSA. Ces expériences ont été particulièrement enrichissantes pour ma compréhension et l'avancement de mon sujet, offrant des apports précieux pour la mise en place de protection forestière. La méthode utilisée pour obtenir des résultats au cours de ce séminaire a pris la forme d'entretiens informels.

Le séminaire inter-parcs rassemblait divers acteurs, dont des agents de PNR, des associations, des chercheurs, des représentants de l'OFB et du ministère de l'Environnement. Les discussions ont porté sur l'importance de préserver et de restaurer les écosystèmes forestiers pour assurer leur résilience face au changement climatique. Les participants ont présenté différentes approches et initiatives, telles que la gestion «proche de la nature», la création d'îlots de sénescence, et la mise en place d'observatoires permanents. Ces échanges m'ont permis de découvrir de nouvelles techniques et d'affiner ma compréhension des pratiques innovantes en matière de gestion et de protection forestière. Au cours de ce séminaire je me suis inscrite aux ateliers et sorties terrains les plus pertinents dans le cadre de mon sujet, pour en tirer le plus d'informations possible j'ai réalisé des notes synthétiques des éléments importants évoqué au cours des présentations, j'ai également réalisé des enregistrements audio afin de les réécouter par la suite pour extraire les informations utiles qui aurait pu m'échapper, notamment lors des sorties sur le terrain.

Des discussions informelles et enrichissantes ont eu lieu entre les agents des différents PNR, permettant de partager des expériences variées en matière de préservation de la biodiversité et des forêts. Ces échanges m'ont offert une occasion précieuse d'apprendre des succès et des défis rencontrés par d'autres PNR, ce qui m'a aidé à identifier des stratégies efficaces et à anticiper d'éventuels obstacles dans la mise en œuvre de notre propre Trame forestière.

L'atelier consacré au projet FISSA dans l'établissement d'AgroParisTech Nancy, a mis en lumière une démarche collective alliant science et société, à trois échelles : nationale, PNR sites pilotes, et à l'échelle des massifs forestiers. L'objectif du projet est de modéliser les contributions forestières telles que la production de bois, l'indice de biodiversité, le risque d'incendie, l'impact paysager, et le stockage de carbone, afin d'évaluer la résilience des forêts. La modélisation réalisée sur des patchs d'un hectare permet de tester différents scénarios de gestion et d'en observer les impacts sur la biodiversité et la rentabilité. Cette approche m'a fourni des outils méthodologiques, ainsi que des clés de compréhension pour comprendre les effets potentiels de diverses pratiques de gestion et pour optimiser la prise de décision.

Ces séminaires m'ont apporté des informations précieuses qui enrichissent la stratégie de mise en place d'une Trame forestière fonctionnelle dans le PNR PA. Ils ont permis d'intégrer la concertation interdisciplinaire et les échanges sur des retours d'expériences, renforçant ainsi l'efficacité de notre approche.

3. Les apports de la Trame Verte et Bleue

Le travail réalisé pour la modélisation de la Trame Verte et Bleue du PNR PA (voir I. B. 4. page 17) a été une ressource importante pour le développement de la stratégie de

Trame forestière fonctionnelle. Ce travail, conduit par un bureau d'étude et une ancienne agent du parc, m'a offert un apport solide pour identifier les cœurs de biodiversité et les fractures dans les continuités écologiques.

En étudiant les rapports rédigés par ces experts, j'ai pu extraire les parties pertinentes pour mon propre travail. Ces documents détaillent la mise en place de la modélisation de la TVB et le traitement SIG réalisé. Pour mon travail je me suis focalisée sur les critères utilisés pour identifier les cœurs de biodiversité. Ils expliquent également ce qui est considéré comme éléments fragmentant dans les continuités écologiques, comme les infrastructures routières et les zones urbanisées. Ces éléments sont centraux pour identifier les forêts propices et les fractures existantes pour la mise en place de Trame de vieux bois. Par ailleurs, j'ai exploré les projets SIG réalisés pour la TVB sur QGIS. L'analyse des tables attributaires de certaines couches m'a permis de comprendre les données et les critères utilisés pour ne retenir que les secteur pertinent comme cœur de biodiversité ou corridors écologiques. Cette analyse a été complétée par des sessions d'échange avec un agent du PNR en charge de la TVB. Ces discussions m'ont été bénéfiques pour saisir les aspects pratiques et techniques de la modélisation, et de mieux me saisir du travail qui avait été mené.

Ainsi, les connaissances acquises grâce à l'étude de la TVB m'ont permis d'enrichir mes propositions pour une stratégie de mise en place de Trame de vieux bois mais également de consolider ma compréhension des systèmes des continuités écologiques, et d'appliquer ces concepts à la conception de mon rapport.

4. Entretiens et retours d'expériences

Pour enrichir ma compréhension des stratégies de mise en place de Trame de vieux bois, j'ai mené une série d'entretiens structurés avec divers acteurs impliqués dans des projets similaires. Pour cela j'ai commencé par identifier des projets grâce aux échanges que j'avais pu avoir et en réalisant des recherches Internet notamment via les sites de PNR. Cela m'a permis d'établir une liste des structures concernées. J'ai pris contact avec ces structures pour expliquer mon projet et l'objet de mon stage, afin de solliciter leur participation. Une fois les contacts établis, j'ai organisé des rendez-vous pour les entretiens. Cette phase a nécessité une coordination minutieuse pour trouver des créneaux disponibles, ce qui a parfois été compliqué, voire impossible dans certains cas en raison des emplois du temps surchargés de certains agents, des périodes de congés importantes en période estivale et mes impératifs liés au travail de terrain.

Pour anticiper le bon déroulement des entretiens j'ai élaboré une grille d'entretien structuré, organisée par thématiques. Pour chaque thème, j'ai formulé des questions spécifiques et prévu des relances potentielles pour approfondir les réponses (grille d'entretien en annexe 1 page 90). Lors des entretiens, j'ai pris des notes détaillées et effectué des enregistrements audio pour garantir une retranscription fidèle des échanges. Ces entretiens m'ont permis de recueillir des informations directement auprès des agents impliqués dans la gestion des Trames de vieux bois. Après chaque entretien, j'ai retranscrit les enregistrements et analysé les échanges. J'ai synthétisé les points importants par thématique, couvrant les objectifs des projets, les méthodes employées, les indicateurs, le déploiement des Trames, leur fonctionnement, les résultats obtenus, les limites rencontrées, et les perspectives futures. Cette synthèse a également inclus des conseils pratiques partagés par les agents rencontrés. Enfin, j'ai rédigé les résultats obtenus lors des

entretiens, intégrant les informations et les retours d'expérience recueillis pour alimenter la stratégie de mise en place d'une Trame forestière fonctionnelle dans le PNR des Pyrénées Ariégeoises.

Cette méthodologie m'a permis de collecter des données qualitatives riches et variées, offrant une vision approfondie des pratiques et des défis liés à la création et à la gestion des Trames de vieux bois. Les retours d'expérience des différents acteurs ont été particulièrement précieux pour affiner notre stratégie et adapter les meilleures pratiques à notre contexte spécifique.

5. Mise en place de la stratégie

La mise en place de la stratégie de Trame forestière fonctionnelle dans le PNR PA repose sur une série d'étapes méthodologiques. Dans le cadre de mon stage il m'a fallu définir des critères précis pour identifier les zones prioritaires pour la Trame forestière, en s'inspirant des travaux précédents et des échanges avec les experts. Ces critères incluent la biodiversité, la connectivité ou encore l'ancienneté et la maturité des milieux boisés. Pour identifier les secteurs à enjeux, j'ai créé des cartes thématiques mettant en évidence les zones à fort potentiel écologique et les corridors prioritaires à restaurer ou à protéger. Pour cela j'ai utilisé les données existantes des forêts anciennes, des vieilles forêts des Pyrénées, de la sous Trame forestière de la TVB, et des aires de protection forte du PNR. J'ai réalisé un tableau synthétisant les différents modes de protection pertinents dans le cadre d'une Trame de vieux bois pour permettre une lecture rapide en fonction du dispositif souhaité (Figure 34 page 63).

Pour mettre en place ce guide stratégique j'ai réalisé de nombreux schémas tel qu'un arbre de décision afin de synthétiser et d'illustrer mes propos. Dans ces schéma j'ai regroupé les données que j'ai identifiées comme utiles ainsi que les procédés à suivre pour la mise en place d'une Trame de vieux bois afin que mon guide stratégique soit opérationnel.

Pour élaborer un arbre de décision efficace dans le cadre de la Trame de vieux bois, il convient de suivre plusieurs étapes clés. Tout d'abord, il faut déterminer les variables et critères de décision qui guideront l'arbre, c'est-à-dire les critères identifiés. Ensuite, il faut développer les branches de l'arbre en fonction des choix possibles pour chaque critère, chaque branche représentant un résultat potentiel ou une décision à prendre. Pour chaque scénario, il faut évaluer les avantages et les inconvénients en termes de conservation, de coût, et d'efficacité. Enfin, la validation et l'ajustement de l'arbre de décision nécessitent la consultation des parties prenantes pour recueillir leurs retours et ajuster les critères ou les branches en conséquence. Cette démarche doit être suivie d'une révision et amélioration continue de l'arbre en intégrant les commentaires reçus et les nouvelles informations disponibles.

Une des demandes de la structure lors de mon stage a aussi été de réaliser un schéma reprenant les composantes des Trames forestières et d'y intégrer les questionnements, puis les réponses correspondantes pour mettre en place la stratégie de Trame forestière. Pour cela j'ai commencé par représenter de manière manuscrite une Trame forestière schématisée et de la structurer avec les éléments centraux qui nous intéressent: les réservoirs de biodiversité et les corridors. Au cours des différents échanges avec les agents de la structure j'ai pu établir les questionnements que je devais mener au cours de mon stage pour répondre aux attentes. J'ai ensuite associé chaque question aux

éléments concernés, toujours de manière manuscrite pour pouvoir le structurer et modifier plus facilement. Une fois une version manuscrite satisfaisante et validée par ma tutrice je l'ai reprise au propre en version numérique, que l'on peut voir en Figure 6 page 13. C'est à la fin de mon stage, une fois les résultats obtenus que j'ai réalisé la version synthétique de la Trame avec les réponses aux questions posées (figure 36 page 74). L'objectif de ces schémas était de réaliser une production visuelle et synthétique de mon travail, dans un premier temps pour expliquer le travail à fournir et ma problématique et dans un second temps pour synthétiser les résultats obtenus.

Pour compléter mon guide stratégique de mise en place d'une Trame forestière fonctionnelle, j'ai produit une rédaction venant compléter les illustrations et schémas produits, et renforcer le niveau de détail des résultats que j'avais obtenu.



Figure 28: Photographie d'une placette de calibration LiDAR pendant la prise du point GPS (Marie Sallebert, le 30/04/2024 sur la commune de Rimont)

IV. Les résultats: des données de calibration LiDAR à la stratégie de mise en place d'une Trame forestière dans le PNR PA

A. Les données récoltées sur le terrain

Au cours de mon stage, j'ai effectué en moyenne deux jours de terrain par semaine, durant lesquels j'ai participé à la réalisation des mesures de calibration des données LiDAR (voir III. A.). Ce travail de terrain, essentiel pour la précision des données, a été réalisé en étroite collaboration avec d'autres stagiaires travaillant sur le même projet. Ensemble, nous avons contribué à la finalisation des mesures prévues sur les placettes en forêts privées, totalisant ainsi 420 placettes mesurées. Personnellement, j'ai effectué environ 100 placettes de mesures de terrain au cours de mes six mois de stage, apportant ainsi ma contribution au projet.

Une fois les mesures en forêts privées terminées, nous avons collaboré avec l'ONF et l'ANA CEN Ariège pour organiser un supplément de travail sur environ 60 placettes en forêts publiques. Cette démarche visait à renforcer nos efforts collectifs pour assurer l'achèvement de la campagne de terrain avant la fin de l'année 2024, la date limite fixée pour ce projet. Cette coordination entre les différentes entités avait pour objectif de permettre que toutes les données nécessaires soient collectées à temps.

Le résultat direct de ce travail de terrain est la finalisation complète des placettes en forêts privées et un soutien substantiel pour les forêts publiques. Ces efforts conjoints permettent au PNR, à l'ONF, à l'ANA CEN Ariège, et à d'autres partenaires de bénéficier d'une modélisation LiDAR de haute qualité sur les forêts du territoire. La calibration précise des données sur le terrain est indispensable pour que les techniciens de l'ONF puissent réaliser une modélisation fiable et utile. Cette modélisation est précieuse pour des structures telles que l'ONF, l'ANA ou le PNR, car elle permet non seulement d'accroître les connaissances sur les forêts du territoire, mais aussi de fournir des informations clés qui pourront être intégrées dans les actions et les projets à venir. En outre, la modélisation qui découle de ce travail de terrain renforce la pertinence et l'efficacité des stratégies mises en œuvre pour élaborer une Trame forestière fonctionnelle sur le territoire, un objectif central pour le PNR qui a fait l'objet de mon stage.

Au cours de ce travail de terrain nous avons collecté des données supplémentaires à celles nécessaires à la calibration du LiDAR sur demande de l'ANA CEN Ariège. Cette demande vient de leur volonté de collecter des données naturalistes brutes au travers des dendromicrohabitats présents sur les placettes de calibration. Ces données ont été renseignées sur l'application Géorelevé et sont regroupées sur un tableau excel («Tableur DMH») présentant l'ensemble des dendromicrohabitats présents sur les arbres ayant un diamètre supérieur à 42,5 cm. Dans le cadre de l'analyse des résultats du travail de terrain, hors modélisation LiDAR, ces données peuvent faire l'objet d'une étude. Un travail statistique pourrait être réalisé une fois la campagne de terrain achevée en triant les données par nombre de dendromicrohabitats par placette. Une médiane pourrait être calculée et ainsi on pourrait retenir seulement les secteurs à forte concentration de dendromicrohabitats. Cela permettrait de donner un indicateur quant au stade de maturité

de la forêt. Ces données pourraient aussi être utilisées, notamment par l'ANA CEN Ariège, pour réaliser des inventaires complémentaires sur la faune et la flore présente sur ces forêts où l'on a observé un plus grand nombre de dendromicrohabitats. Des études d'inventaires ont été menées sur d'autres territoires afin d'évaluer la maturité de forêt connue comme «hotspot» par les associations et sur dire d'expert, c'est le cas du PNR Livradois Forez qui ne disposait pas de modélisation LiDAR pour mener ce travail. Les données Géo Relevé pourraient servir de support pour mener des études similaires et cibler des secteurs à privilégier. On pourrait aussi réaliser une sélection de dendromicrohabitats en fonction de leur rareté et des espèces qui pourraient y être associées. Les études menées sur le PNR du Livradois Forez portaient sur les lichens, les syrphes et les coléoptères qui sont de bons



Figure 29: Photographie de dendromicrohabitat: flûte de pic (Marie Sallebert, le 26/06/2024)

indicateurs de maturité forestière. Ces études d'inventaires seraient pertinentes à mener sur le territoire du PNR PA en collaborant avec l'ANA CEN Ariège qui dispose des compétences nécessaires pour les réaliser. Il serait pertinent de mobiliser d'autres indicateurs pour identifier les secteurs prioritaires à étudier, notamment en s'appuyant sur les résultats de la modélisation LiDAR.

B. Les outils à mobiliser pour identifier les zones prioritaires

1. Les indicateurs forestiers à identifier

La première étape à mener pour la mise en place d'une Trame forestière pertinente et l'identification des zones à enjeux prioritaires pour mettre en place de la protection et développer des îlots de sénescences. Les enjeux prioritaires pour le PNR sont la prise en compte des forêts anciennes et matures. Le schéma en figure 31 (page 57) illustre et synthétise les propos qui vont suivre, explicitant la démarche pour mobiliser les données nécessaires à ce projet.

Cette étape passe par un travail cartographique qui doit intégrer diverses données shapefile déjà existante:

- **Les données shapefile des vieilles forêts des Pyrénées**, ces données sont issues d'un travail de J-M Savoie, reposant sur un travail cartographique ainsi que des relevés de terrain qui ont pu catégoriser ces forêts comme «vieilles forêts». Ces données sont précieuses car permettent une connaissance des vieilles forêts avérées, c'est-à-dire des forêts à la fois anciennes et matures. Ces données sont détenues par le PNR PA et peuvent être facilement mobilisées. (Annexe 3)
- **Les données shapefile des forêts anciennes**, ces données sont le produit d'un traitement QGIS entre les couches des forêts de Cassini, de l'Etat major, et des forêts actuelles. Elles représentent une indication sur la continuité de l'état boisé mais ne sont pas issues de relevé de terrain et ne garantissent pas l'ancienneté des forêts représentées. Ces données sont disponibles sur les serveurs du PNR et peuvent aussi être mobilisées mais doivent être utilisées comme valeurs indicatives et non comme des données de forêts anciennes dans l'absolue. (Annexe 4)
- **Les données «cœur de biodiversité»** ont été réalisées dans le cadre de la modélisation de la TVB (projet QGIS sur le réseau PNR: «tvb_pnr_simplifie_ana_cen»). Ces données sont issues du travail de modélisation de la TVB produit par le PNR. La donnée cœur de biodiversité présente différents champs intéressants dans le cadre du projet comme la surface, le pourcentage de pente donnant une indication sur la capacité d'exploitation de la parcelle dans les conditions actuelles⁹, ou le pourcentage de vieilles forêts sur la parcelle. Ces paramètres ont été utilisés pour hiérarchiser les zones cœur par enjeux dans la couche «hiérarchisation des boisements». Ils sont classés par gradation de 1 à 10 et permettent une représentation par priorisation d'enjeux selon le travail de modélisation de la TVB. Ces données sont disponibles sur les serveurs du PNR et doivent être intégrées dans le projet cartographique permettant d'identifier de manière pertinente les secteurs prioritaires. (Annexe 2).

L'étape suivante est de faire des propositions concernant l'utilisation des données produites par le LiDAR. Ces données n'ont pas encore été produites à l'heure où j'effectue ce travail c'est pour cela qu'il s'agit bien de propositions de l'utilisation de ces futures données.

Comme nous le savons, le LiDAR sera en mesure de produire une modélisation représentant l'indice de maturité des peuplements forestiers, gradué entre 0 et 1. Pour utiliser cette donnée de manière pertinente, plusieurs étapes seront à effectuer lors de la production des données. Dans un premier temps il s'agira d'obtenir une donnée statistique fiable quant à la proportion de placette de mesure à effectuer sur le terrain pour s'assurer d'un niveau de fiabilité satisfaisant de l'indice. À la suite de cette étape, une campagne de terrain devra être planifiée afin de mener cette étude de fiabilité de l'IMAT. On peut aussi envisager que les données des placettes mesurées pour la calibration du LiDAR soient re-mobilisées dans cette démarche. Ce travail de terrain consisterait à se rendre sur des placettes de mesures tirées de façon aléatoires pour y mener des relevés tels que le bois mort sur pied ou au sol, le diamètre des arbres, etc., et de le comparer aux résultats obtenus par la modélisation LiDAR. Ce travail permettra de pouvoir utiliser les données de l'IMAT avec une bonne connaissance de leur fiabilité et ainsi de garantir de meilleurs résultats pour le projet. Le PNR du Morvan a réalisé ces mesures de terrain sur 41 placettes, sur des

⁹ Des recherches sont en cours sur l'exploitation aérienne, ou la pente ne représenterait plus un problème dans l'exploitation des parcelles.

forêts qui apparaissent comme assez matures et très matures. Il est important d'effectuer un travail statistique efficace pour estimer le nombre de placettes à mesurer sur le territoire du PNR PA, ainsi que de questionner la pertinence de réaliser ces mesures seulement en forêts modélisées comme assez matures et très matures. Il est apparu que la modélisation LiDAR dans le PNR du Morvan a rencontré des marges d'erreurs faible notamment pour l'IMAT et la surface terrière des très gros bois (Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSEP) de 0,28 et 0,35) et un peu plus importante pour la surface terrière de gros bois mort sur pied et au sol (RMSEP de 0,63 et 0,62). L'exclusion des zones avec une faible surface terrière ($\leq 15 \text{ m}^2/\text{ha}$) améliore la précision de la carte de l'IMAT, augmentant le taux de vrais positifs, c'est-à-dire les cas où la maturité prédite correspond à la maturité observée, de 76 % à 81 %. Ce traitement des données réalisé par le PNR du Morvan pourrait être directement applicable au PNR PA afin de réduire également la marge d'erreur de l'IMAT.

Pour l'analyse des résultats il peut être envisagé de calculer la médiane de l'indice de maturité sur l'ensemble du territoire et ainsi de mettre en place une gradation. La moyenne, bien qu'utile pour résumer une grande quantité de données en un seul chiffre, peut être trompeuse lorsqu'il y a des valeurs extrêmes ou des distributions inégales. Dans de tels cas, la moyenne peut masquer la réalité en donnant une impression erronée d'égalité ou d'uniformité. La médiane, en revanche, divise les données en deux groupes égaux et est donc moins influencée par les valeurs extrêmes ou les anomalies. Elle fournit une représentation plus fidèle de la distribution réelle des données. Ainsi, pour des analyses de la maturité des forêts, l'utilisation de la médiane est préférable car elle offre une image plus précise et représentative de la réalité.

Cette gradation sera relative et propre au territoire d'étude. Elle permettra de mettre en perspective les forêts les plus matures et les moins matures. On peut imaginer associer à cette gradation un dégradé de couleur allant du plus clair pour les forêts les moins matures, au plus foncé pour les plus matures selon l'IMAT. Ainsi les forêts apparaissant comme plus matures relativement aux autres, pourront être identifiées comme des milieux à fort enjeu de préservation.

Une approche qui pourrait être intégrée à la stratégie de mise en place d'une Trame forestière est l'étude d'espèces faunistiques et de leur répartition au sein des forêts du territoire. Ces données naturalistes pourraient servir d'indicateurs et ainsi permettre d'identifier des zones à enjeux de protection. C'est l'objectif de l'étude menée en 2011 sur le Lynx qui analyse la connectivité forestière entre les massifs Vosgien et Jurassien en se basant sur la TVB des différentes régions. Cette approche permet d'identifier les corridors critiques à conserver ou recréer pour favoriser les déplacements de l'espèce, tout en profitant également à d'autres espèces forestières (Assmann, 2011).

Dans la *Notice d'utilisation de la cartographie abrégée de la Trame Verte et Bleue du Parc naturel Régional des Pyrénées Ariégeoises*, l'ANA CEN Ariège propose de prendre en compte des espèces parapluie¹⁰ tels que le Bouvreuil pivoine, le Chat forestier, le Grand rhinolophe et le Triton marbré, comme piste de développement de la Trame.

Il existe des données naturalistes localisées dont le PNR PA est détenteur, pouvant permettre d'inclure les observations de ces espèces dans le projet. La présence de ces espèces sur une parcelle forestière pourrait indiquer un enjeu supplémentaire de protection.

¹⁰ « On appelle espèce parapluie, une espèce dont le territoire est assez étendu pour que sa protection assure aussi celle des autres espèces qui l'entourent. » (WWF-Les espèces parapluies)

En protégeant une forêt habitat du chat forestier, par exemple, on permet des conditions favorables à son développement et à son maintien, ainsi on assure également la protection d'autres espèces peut-être plus vulnérables.

On peut aussi déterminer une liste d'espèces à prendre en compte en fonction des espèces patrimoniales au sein du PNR PA. Ce travail doit se mener en étroite collaboration avec l'ANA CEN Ariège ainsi que l'ONF. Lors de mes échanges avec des agents de ces organismes j'ai pu obtenir de premier retour quant à des espèces à prendre en compte comme le Grand Tétrás, la Chevêchette d'Europe, la chouette Tengmalm, et les insectes saproxyliques.

Le LiDAR permet une modélisation des habitats potentiels d'espèces en s'appuyant sur ces données d'observation et des données dendrométriques (voir II. C. 3) et permet d'identifier de nouveaux secteurs ou prospecter pour réaliser des observations naturalistes.

Une autre des propositions serait d'inclure des données de répartition des essences locales de montagnes afin de leur permettre de se maintenir et d'accroître leur diversité interspécifique pour leur permettre une meilleure capacité de résilience. Cette proposition est ressortie à l'issue d'échanges et d'entretiens avec des experts. Un travail de ce type est en cours dans le cadre d'un projet ANR sciences participatives. Mélanie Saulnier a notamment mené un travail de ce type sur l'if. Il pourrait être intéressant de mobiliser ces données au projet. Ce travail sur les essences locales pourrait se réaliser en étroite collaboration avec des chercheurs ou doctorants. La modélisation et les données récoltées au cours de la campagne de terrain permettrait de localiser la présence de ces essences sur le territoire.



Figure 30: Photographie d'un pin à crochet (Marie Sallebert, le 07/08/2024, cirque de Cagateille)

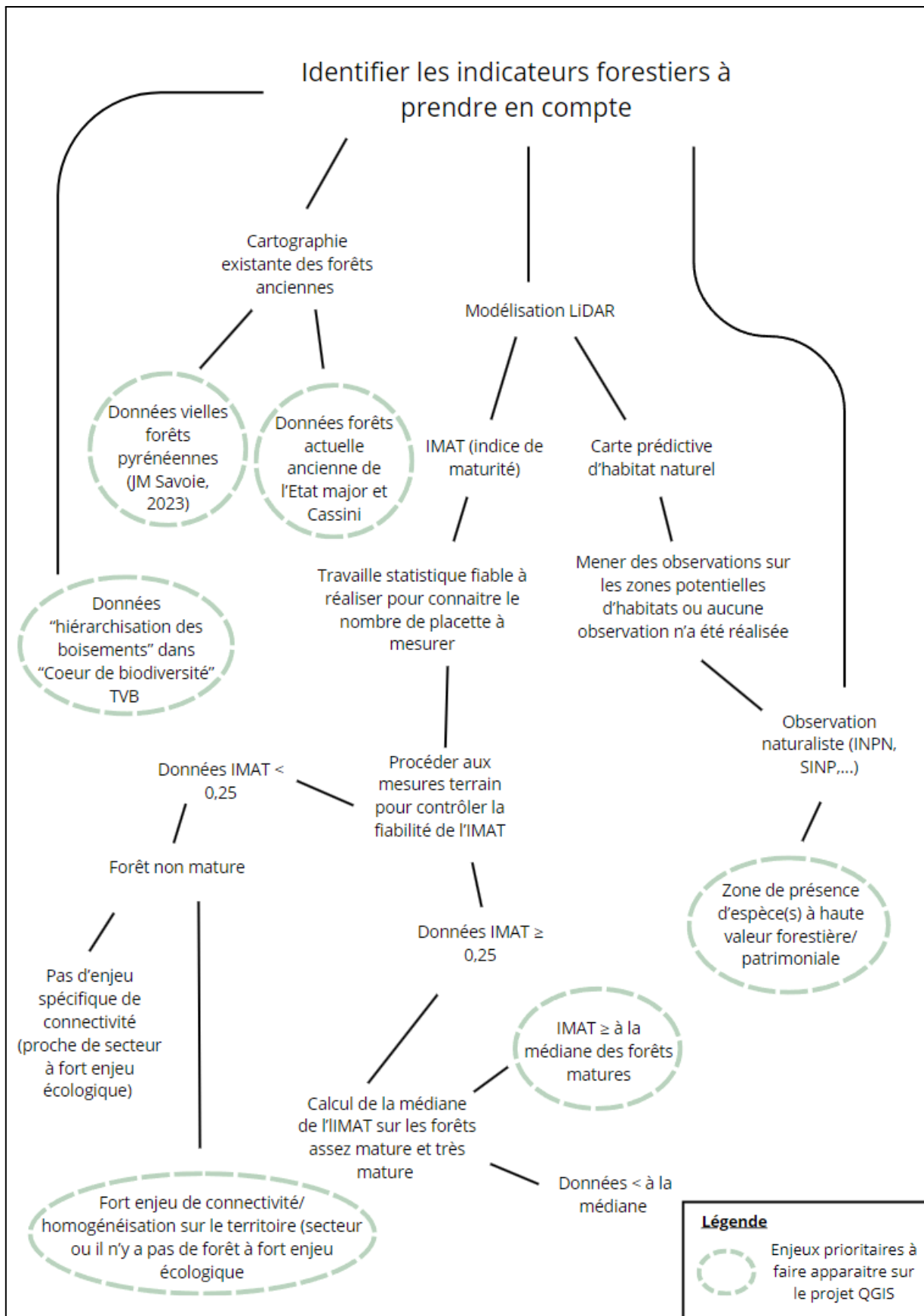


Figure 31: Schéma clé dichotomique pour identifier les indicateurs forestiers à prendre en compte (réalisé par Marie Sallebert)

2. Les fragmentations paysagères: l'apport de la TVB pour modéliser la connectivité

Pour pouvoir mettre en place une Trame forestière fonctionnelle il est important d'identifier les éléments fragmentants les milieux forestiers. Au cours de mon travail sur la fragmentation des milieux j'ai pu échanger avec des agents du PNR en charge du projet de TVB et bénéficier des ressources produites sur ce thème. La modélisation de la TVB ayant fait l'objet d'un travail de qualité, il a semblé plus bénéfique de remobiliser ce travail pour la Trame forestière. Dans le cadre de ce travail de modélisation, Valentine Judge, chargée de mission SIG appliquée à la TVB du PNR PA, a rédigé un rapport expliquant la méthode et les paramètres pris en compte, notamment pour la fragmentation paysagère, c'est-à-dire des milieux naturels. Pour modéliser la dispersion des espèces et prendre en compte les éléments fragmentants dans le paysage, une méthode s'appuyant sur plusieurs couches de données géospatiales a été développée. Voici un résumé simplifié de cette approche :

L'objectif est de modéliser la dispersion des espèces en prenant en compte les éléments fragmentant (comme les routes, zones urbaines, falaises, rivières, etc.), les zones de fragmentation indirecte, et les éléments reconnectants. Cette modélisation vise à définir et hiérarchiser les zones de conflit et d'enjeux écologiques en fonction de l'effet barrière que ces éléments imposent aux espèces. Les éléments fragmentants sont à prendre en compte dans la dispersion des espèces. Chaque occupation du sol est associée à un coefficient de friction qui définit la difficulté ou facilité pour une espèce de se déplacer à travers cette zone (porosité). Le coefficient le plus élevé entre l'occupation du sol et l'élément fragmentant est retenu pour représenter l'effet barrière direct. La fragmentation directe correspond aux zones où les éléments fragmentant imposent des barrières directes à la dispersion des espèces. Le modèle utilise ce coefficient pour définir l'intensité de la barrière. La fragmentation indirecte est modélisée en appliquant un coefficient multiplicateur au coefficient de friction des zones proches des éléments fragmentant. Cela reflète l'influence qu'une barrière fragmentante peut avoir sur les zones environnantes, même si elles ne sont pas directement traversées. Les éléments reconnectant, comme les corridors écologiques, réduisent la friction et facilitent la dispersion des espèces. Ce sont eux qui, en dernier lieu, modifient la friction dans le modèle pour favoriser le déplacement des espèces.

Un modèle SIG a été conçu pour automatiser la combinaison des données raster et générer plusieurs couches représentant les différents types d'éléments fragmentants. Ce modèle produit trois rasters distincts : éléments fragmentant directs, pondération de la fragmentation indirecte et éléments reconnectants.

Le processus utilise plusieurs couches de données :

- Le périmètre de la zone d'étude
- Un raster à valeur unique servant de base pour gérer les zones sans données (NoData)
- Les tronçons routiers (BD Topo 2020)
- Les tronçons hydrologiques (BD Topage)
- Les falaises
- L'occupation du sol

Les couches raster générées par le modèle incluent :

- Raster friction hydro (pour les cours d'eau)
- Raster friction falaise (pour les falaises)
- Raster friction urbain (pour les zones urbaines)
- Raster friction route (pour les routes)
- Raster fragmentation indirecte
- Raster friction des éléments reconnectant

Ces couches sont ensuite intégrées dans le logiciel Biodispersal, permettant d'affiner la modélisation de la dispersion en prenant en compte les différents facteurs de fragmentation du paysage. Ensuite, pour les hiérarchiser en fonction de leur influence sur la connectivité des écosystèmes, ils utilisent la métrique de l'Indice Intégral de Connectivité (IIC).

La première étape consiste à sélectionner les corridors écologiques dont la distance n'excède pas la capacité de dispersion maximale des espèces concernées. Les corridors respectant cette contrainte sont donc retenus pour l'analyse. Une fois les corridors sélectionnés, ils sont classés selon leur Indice Intégral de Connectivité (IIC) à l'aide de la méthode de Jenks. Cette méthode statistique permet de regrouper les corridors en différentes classes en minimisant les variations internes au sein de chaque classe, et en maximisant les différences entre les classes. Les corridors sont ensuite attribués à trois niveaux d'enjeu écologique en fonction de leur classement IIC :

- Enjeu Fort : Les corridors appartenant aux classes 9 et 10 (les plus élevés en termes d'IIC) sont considérés comme ayant un enjeu écologique fort.
- Enjeu Moyen : Les corridors des classes 5 à 8 sont classés avec un enjeu moyen.
- Enjeu Faible : Ceux ayant un IIC inférieur à 5 sont considérés comme ayant un enjeu faible.

L'Indice Intégral de Connectivité (IIC) est une métrique utilisée pour évaluer et hiérarchiser l'influence des corridors écologiques et des cœurs de biodiversité au sein d'un graph (réseau écologique). Cet indice permet de quantifier l'importance d'un corridor ou d'un cœur de biodiversité en termes de contribution à la connectivité globale du paysage. L'IIC prend en compte à la fois la taille des parcelles et les connexions entre elles, en mesurant leur capacité à améliorer la connectivité écologique globale. Les éléments ayant un IIC élevé sont ceux qui assurent une connectivité plus forte, et donc qui jouent un rôle plus central dans le maintien de la biodiversité. L'analyse permet ainsi de prioriser les corridors ou cœurs de biodiversité les plus adaptés pour une meilleure continuité écologique.

La méthode permet de combiner plusieurs types d'éléments fragmentant pour simuler leur impact sur la dispersion des espèces. Le modèle SIG génère des couches raster qui sont ensuite traitées pour rendre compte des effets de fragmentation directe, indirecte et de reconnexion, permettant ainsi d'identifier les zones de conflits et d'enjeu écologiques. À partir de ce travail de modélisation de la TVB, en ne retenant que la Trame forestière on peut donc identifier des zones favorables ou défavorables en fonction de la fragmentation et ainsi commencer à réfléchir au tracé potentielle de la Trame fonctionnelle. Si l'on regarde les figures 32 et 33 ci-dessous, on observe les corridors considérés comme «à fort enjeux écologiques», mais aussi les zones de conflit fort, ou d'urbanisation qui indiquent des fragmentations.

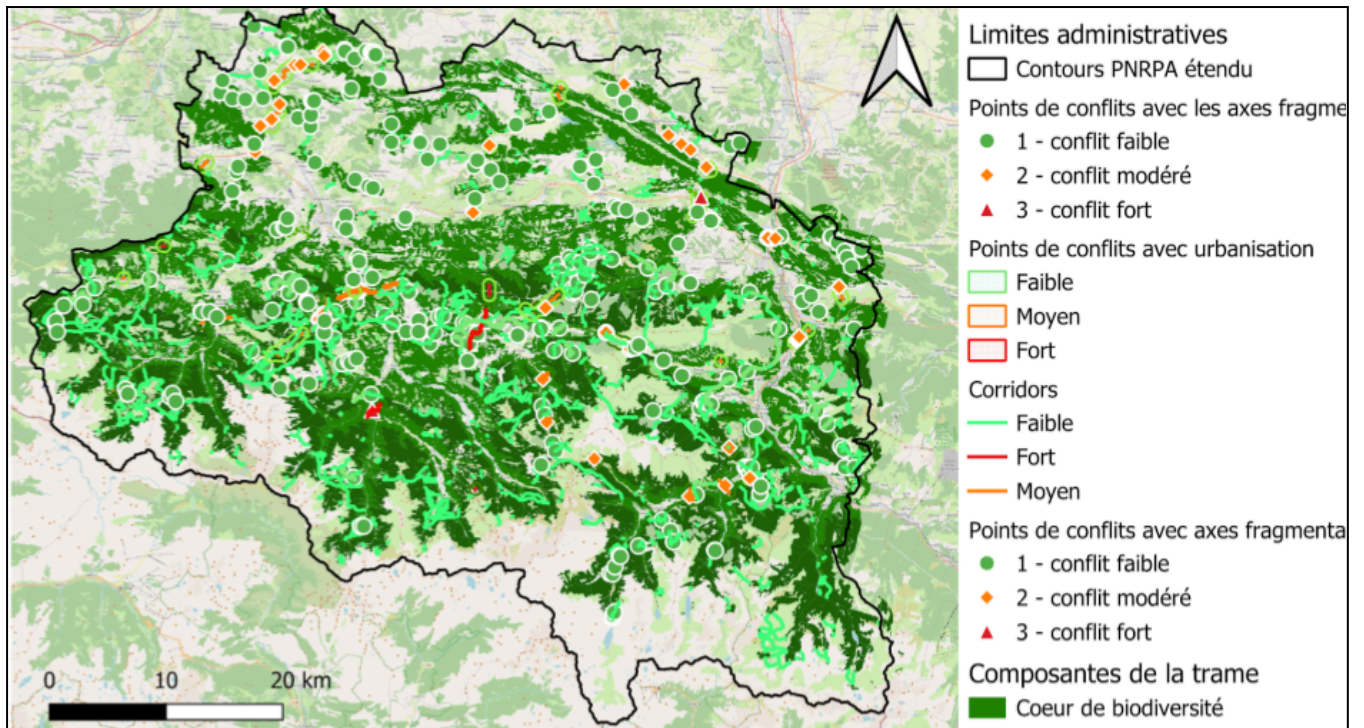


Figure 32: Carte de la modélisation de la Trame forestière (carte réalisée par l'ANA CEN Ariège)

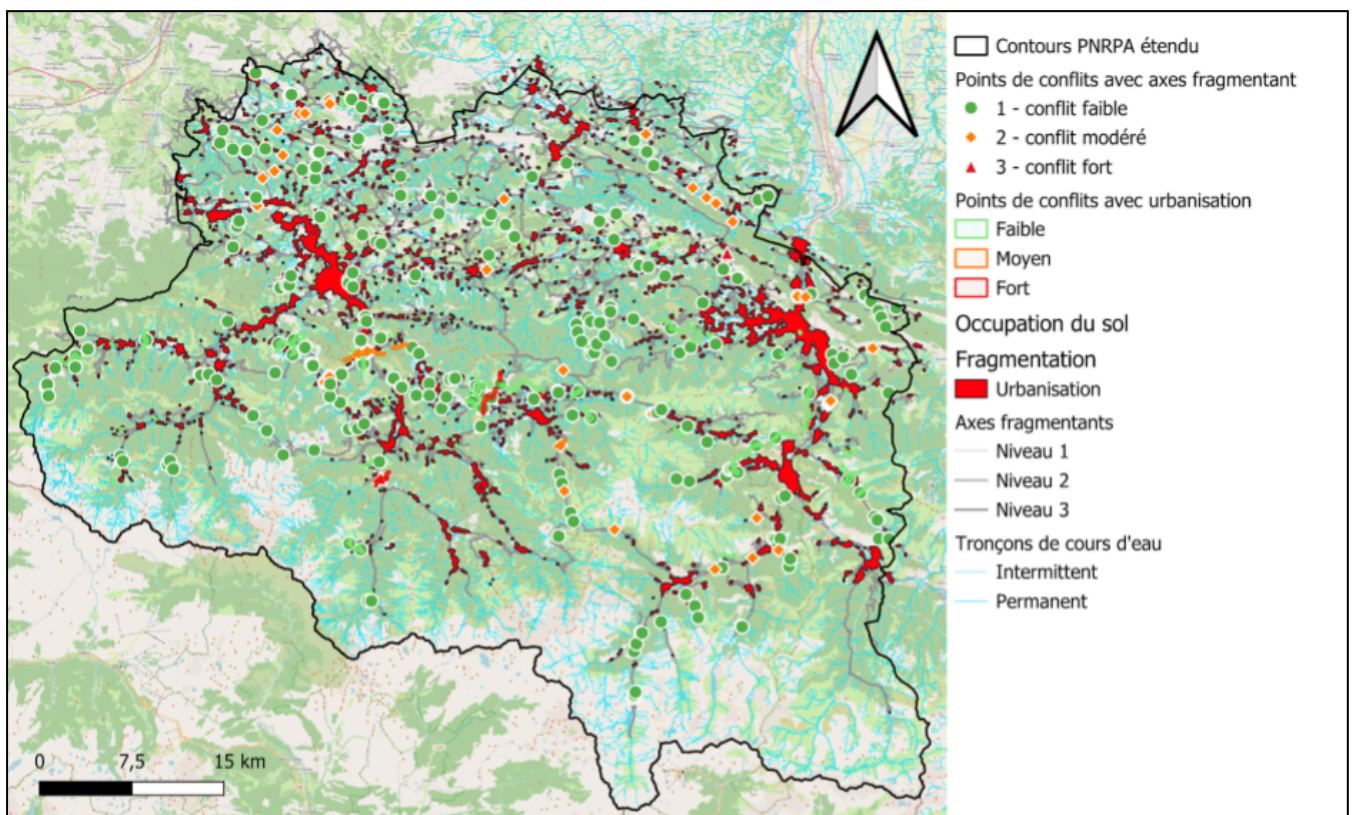


Figure 33: Carte de la modélisation de la TVB, les éléments de fragmentations (réalisée par l'ANA CEN Ariège)

3. Le tracé de la Trame forestière

La Trame forestière fonctionnelle, voulue par le PNR PA se veut homogène sur l'ensemble du territoire et correspondre, voire dépasser, les objectifs de la SNAP, stratégie nationale qui veut que chaque territoire classe en protection forte 10% de sa surface et de ses milieux. Pour réaliser cet objectif sur les milieux forestiers le PNR PA veut identifier plus de 10% des forêts du territoire à placer en protection forte, sous forme de Trame avec des réservoirs de biodiversité et des corridors qui les relient. Nous avons vu précédemment comment identifier les zones à fort enjeux écologiques, au travers notamment d'un travail cartographique. Il faut donc retenir les forêts anciennes, matures, aux habitats rares, avec des espèces parapluies ou patrimoniales, ou avec des enjeux de connectivité et d'homogénéisation sur le territoire.

Afin de prioriser des critères écologiques on peut imaginer de mettre en place une méthode de pondération, comme cela a été le cas pour échelonner certains aspects de la TVB. Il pourrait être proposé de réaliser un échelonnage pour définir des secteurs prioritaires en utilisant des indices d'importance et de la pondération. Supposons que vous ayez à choisir entre trois forêts et que vous évaluez chacune d'elles selon vos critères avec les pondérations retenues. Pour cela il vous faut attribuer un score pour chaque forêt et par critère afin de mesurer l'ordre de priorisation en relation avec ces critères spécifiques. Les scores peuvent être basés sur une échelle définie, souvent de 0 à 10, où 0 représente l'absence de conformité ou de valeur et 10 représente une conformité ou une valeur optimale. Il est important que l'échelle soit définie avant l'évaluation pour garantir la cohérence. On peut imaginer que cette échelle soit définie au préalable par des agents du parc ou dans le cadre d'un stage spécifique porté sur l'évaluation de la priorisation des critères. Cela peut aussi faire l'objet d'un travail de recherche scientifique par des chercheurs ou doctorants. Cette échelle devrait par la suite être discutée et validée par les partenaires du projet au cours de comité de pilotage. La construction de cette échelle devrait passer par un travail de recherche bibliographique et de réalisation d'entretien et d'échange avec les partenaires pour définir les priorités propres au territoire du PNR PA. Cette méthode ne pourra être réalisée que lorsque la modélisation LiDAR sera aboutie. Les limites de cette méthode peuvent être la subjectivité des indices d'importances attribués à chaque critère. L'avantage est qu'elle permettrait de choisir avec plus de précision les forêts à prioriser en fonction de leurs enjeux écologiques ou de leurs fragmentations pour mener une politique de protection efficace.

Ont résulté de mes entretiens des méthodes utilisées dans d'autres territoires pour tracer les Trames forestières fonctionnelles, comme les Trames de vieux bois.

Pour réaliser ce tracé plusieurs méthodes ont été utilisées par les équipes, souvent en collaboration avec divers partenaires comme l'ONF ou des associations locales. Voici les étapes et approches employées :

Certains territoires ne disposaient pas des données LiDAR au moment de l'élaboration de la Trame de vieux bois, alors ils ont dû se reposer essentiellement sur les cartographies existantes. L'ONF a fourni une première carte qui a servi de base. Cette carte mettait en avant les forêts anciennes, ainsi qu'une cartographie partielle de la maturité des forêts (réalisée à partir d'inventaires) et des types d'habitats forestiers. Les zones abritant des habitats rares ont été prises en compte. Ces forêts anciennes et matures, en particulier

celles situées en altitude ou dans des zones abritant des habitats rares, ont été identifiées comme des réservoirs prioritaires de biodiversité. Ces zones étaient considérées comme essentielles à préserver.

Un autre apport méthodologique a été de superposer cette carte initiale avec les îlots forestiers déjà en libre évolution grâce à différents programmes comme Sylvae du CEN, le réseau FRÈNE, les ORE, les Réserves Biologiques Intégrales,... Cela a permis de consolider les zones prioritaires.

Les corridors reliant les réservoirs de biodiversité ont été identifiés en se basant sur des passages d'espèces connus notamment grâce à des pièges photographiques. Ce travail a par exemple été mené sur le chat forestier. Les zones d'impact, comme les lieux où ces animaux sont fréquemment écrasés, ont aussi été prises en compte pour identifier les besoins en passages sécurisés. Le travail s'est appuyé sur des collaborations avec des associations locales spécialisées.

Aussi, des photos aériennes ont été utilisées pour repérer les «patches» de forêts afin de tracer des couloirs prioritaires reliant les réservoirs de biodiversité. Cette méthode était empirique, cherchant à suivre la dynamique naturelle des espèces entre ces zones. L'apport majeur du Lidar pour le tracé de la Trame de vieux bois est l'IMAT qui constitue un indicateur précieux pour évaluer la maturité des forêts sur l'ensemble du territoire. Ajouter la modélisation de l'IMAT sur l'ensemble du territoire en superposition des autres éléments méthodologiques évoqués précédemment permet d'identifier avec plus de justesse les zones à enjeux ainsi que les corridors les plus pertinents.

Il a pu ressortir au cours d'entretiens que le tracé des corridors pouvait parfois être réalisé par interprétation des secteurs à enjeux et des fragmentations, de manière approximative lorsque la modélisation LiDAR n'est pas disponible: *«Et à partir de là, j'ai regardé comment tout ça s'étalait, et sur les corridors prioritaires, quand il y avait des patches, c'est un peu au doigt mouillé, il faut dire ce qu'il est, des patches de forêt ancienne j'ai tracé des couloirs en me disant, qu'a priori, les espèces, elles ont cette dynamique-là.»*

La modélisation LiDAR permet tout de même, de réaliser un tracé plus précis reposant sur des données factuelles, notamment à partir de l'IMAT.

Les différentes méthodes obtenues sont à réfléchir et à discuter avec les partenaires afin de retenir les plus adaptés en fonction des objectifs spécifiques pour le territoire. Nous avons ainsi exploré différentes méthodes qui peuvent être appliquées au Parc Naturel Régional des Pyrénées Ariégeoises en fonction des objectifs spécifiques et de la volonté de préservation des écosystèmes. La pondération des critères, l'utilisation de la cartographie existante des habitats forestiers rares, l'identification des réservoirs de biodiversité à travers l'analyse des forêts anciennes et matures (IMAT), la superposition des zones protégées en libre évolution, la détermination des corridors écologiques basés sur les passages d'espèces emblématiques, et l'analyse des forêts à partir de photos aériennes sont autant d'outils stratégiques à mobiliser. Ces méthodes offrent une flexibilité pour ajuster les interventions en fonction des priorités de conservation et des réalités du terrain dans le PNR.

Bien que ce travail ait été réalisé avec soin sur différents territoires, il n'a pas forcément été exploité comme prévu, principalement en raison du manque de volontaires du côté des propriétaires privés. Il n'a donc pas toujours été possible de se concentrer exclusivement sur les axes prioritaires identifiés, et plutôt de travailler sur les parcelles ou des modes de protection étaient possibles, en partenariat avec l'ONF ou des propriétaires

privés volontaires. Ce travail est toutefois à réaliser par le PNR PA pour mener au mieux ce projet en offrant une base solide pour la planification écologique.

Lorsque des modes de protection ne sont pas envisageables il est important de proposer des alternatives afin de permettre une gestion intégrée du milieu à enjeux. Il faut donc penser des modes de protection et de gestion divers en fonction des cas de figures rencontrés pour assurer la préservation des zones les plus vulnérables.

C. Mise en place d'une Trame fonctionnelle

1. Quels modes de protections adaptés?

Dispositifs pertinents	Mise en place	Atouts	Inconvénients
Réserve biologique intégrale (RBI)	Les RBI sont mises en place par l'ONF, le PNR devrait alors échanger avec l'ONF pour proposer des secteurs mais ne serait pas décisionnaire.	Protection forte, libre évolution. Peuvent être mises en place par les services de l'ONF sur des forêts publiques .	Le PNR n'est pas décisionnaire de leur mise en place. Difficultés si pas d'entente avec les services de l'ONF pour leur mise en place (localisation, surface,...)
Réserve biologique dirigée (RBD)	Les RBD sont également mises en place et gérées par l'ONF.	Protection plus souple (intervention de l'Homme) qui peut permettre une alternative si la RBI n'est pas souhaitée.	Le PNR n'est pas décisionnaire ou gestionnaire. Mode de protection plus souple donc pas de mise en libre évolution.
Sites acquis des conservatoires d'espace naturel	Ces sites sont protégés par la maîtrise foncière, pour cela le CEN acquiert les terrains et mène une gestion en fonction des objectifs spécifiques. Pour mettre en place ce dispositif pour la Trame de vieux bois, le PNR devrait proposer des aires à enjeux écologiques au CEN, et réfléchir à une collaboration.	Protection pérenne dû au caractère permanent de l'achat de foncier. Collaboration possible avec le CEN pour la mise en place de ce dispositif. Permet de mettre en protection des forêts privées.	La disponibilité à l'achat des zones prioritaires n'est pas garantie. L'achat de foncier pour leur gestion représente un coût élevé. Le PNR n'est pas décisionnaire ou gestionnaire, une collaboration avec le CEN doit être mise en place. Pour que le CEN se mobilise, il doit y avoir un intérêt de préservation de la biodiversité certain, comme pour de la forêt ancienne.
Obligation réelle environnementale (ORE)	Les ORE engagent les propriétaires privés, ou gestionnaire publique, et la structure porteuse sur la période du contrat qui peut être défini à l'amiable, pouvant aller jusqu'à 99 ans. Le propriétaire et la structure doivent respecter leurs obligations sur la période définie. L'ORE doit être encadrée par un acte administratif qui doit	Le PNR peut se placer comme structure porteuse d'ORE (déjà 3 ORE à l'heure actuelle sur le territoire du PNR PA). Contract relativement avantageux pour les propriétaires souhaitant s'investir pour l'environnement: assistance technique, subvention/ financement compensatoire, plan de gestion, conseil,...	Les propriétaires doivent être volontaires sur les zones prioritaires. Le PNR doit disposer de ressources pour garantir ces obligations (conseils, gestion, support technique,...) et apporter un travail conséquent quant à la sensibilisation et au démarchage de propriétaire, notamment pour les forêts à forts enjeux écologiques.

	passer par un notaire. La mise en place d'ORE pour le PNR doit passer le démarchage de propriétaires sur les zones à enjeux, par la réalisation de diagnostic, et la mobilisation de la modélisation LiDAR pour prioriser des secteurs.	C'est un outil simple de gestion de la biodiversité pour le PNR qui peut ainsi préserver des zones à enjeux écologiques, en fonction de la volonté des propriétaires privés.	
Espace naturel sensible (ENS)	Les ENS sont mises en place et administrées par le département qui décide de protéger des espaces pour leurs intérêts paysagers ou biologiques, et qui sont considérés comme menacés ou fragiles.	Permet une protection pérenne de sites à enjeux. Le PNR peut mener une démarche collaborative avec le département afin de suggérer des sites pertinents pour y développer des ENS.	Le PNR n'est pas décisionnaire de la mise en place de ces ENS, qui dépendent de la volonté du département. Les ENS ne sont pas considérées comme des modes de protections fortes, mais peuvent permettre une protection pérenne des sites à enjeux.
Sylviculture mélangée à couvert continu (SMCC)	La SMCC est une pratique sylvicole qui consiste à concilier les besoins en bois de la filière, les enjeux écologiques et sociaux. Cette pratique peut être promue afin de mener une gestion basée sur la nature tout en maintenant une exploitation.	La SMCC permet au propriétaire de maintenir une activité forestière et ainsi de maintenir une activité économique. Elle permet le maintien d'arbres à enjeux écologiques au sein de forêts exploitées, c'est-à-dire d'arbres habitats qui permettent un corridor en pas japonais pour relier des zones à enjeux. Elle permet une alternative aux sylvicultures plus dommageables pour l'environnement, lorsque des modes de protections strictes ne sont pas envisageables pour le propriétaire.	La SMCC ne constitue pas un mode de protection en soi, puisque un mode d'exploitation est maintenu sur la parcelle. Ce n'est donc pas une parcelle vouée à la libre évolution. L'adoption de cette pratique dépend de la volonté des propriétaires, alors le PNR doit mener un travail de sensibilisation et d'accompagnement pour promouvoir cette pratique. Si les objectifs pour la parcelle sont une protection forte de mise en libre évolution alors ce dispositif n'est pas à mobiliser. La SMCC permet une gestion forestière adaptée aux enjeux écologiques, et peut permettre la mise en place d'arbres habitats pour permettre un corridor en pas japonais.
Contrat Natura 2000 forestier	Le contrat Natura 2000 forestier est signé entre le propriétaire ou le gestionnaire et l'Etat pour une durée de 5 ans. Les structures qui peuvent animer le contrat sont variées: CNPF, PNR,... Ce dispositif financé par l'Europe peut donner lieu à des compensations financières pour les propriétaires. Ces contrats permettent de réaliser des travaux d'entretiens ou de gestion écologique dans	Les îlots de sénescence peuvent être inscrits en contrats Natura 2000 pour une durée de 30 ans renouvelables. Le dispositif permet une compensation financière pour les propriétaires privés. Le PNR PA est déjà gestionnaire de sites Natura 2000 et possède donc les compétences nécessaires.	Les contrats Natura 2000 ne permettent pas une libre évolution et ne sont pas considérés comme des modes de protection forte. L'animation de nouveaux sites Natura 2000 par le PNR nécessitera une hausse des moyens à mobiliser.

	l'objectif de protéger des habitats ou des espèces d'intérêt communautaire.		
Îlot de sénescence	<p>Les îlots de sénescences sont mis en place de manière générale sur des superficies comprises entre 0,5 et 10 ha. Le propriétaire privé ou gestionnaire public décide de ne plus couper les arbres et de les laisser vieillir, et ainsi effectuer leur cycle complet. Cela est encadré par un contrat entre le propriétaire et le gestionnaire. Pour garantir la pérennité des îlots, ils doivent être encadrés par un cadre juridique et peuvent être inscrits dans des documents de gestion comme les documents d'aménagement forestier, les chartes de PNR, les documents Natura 2000,...</p>	<p>L'ONF et les communes peuvent se porter volontaires pour mettre en place des îlots de sénescences sur leur forêts. Le PNR peut alors venir en support pour les accompagner en proposant des sites à privilégier. Dans le PNR de Lorraine le PNR et l'OF collaborent sur la mise en place et la gestion des îlots de sénescence en forêts domaniales. Les îlots de sénescences permettent une préservation de la biodiversité de part la libre évolution et le vieillissement des arbres.</p>	<p>La pérennité de ces îlots n'est garantie que pour 10 à 20 ans (renouvelable) s'ils sont inscrits dans des documents de gestion, ce qui semble relativement faible pour un milieu forestier. La mise en place d'îlots de sénescence sur des terrains privés dépend de l'engagement volontaire des propriétaires, qui peut être mis à mal en raison du manque à gagner du dispositif. Un travail important de promotion et de sensibilisation doit alors être mis en place par le PNR. Une plaquette explicative à destination des propriétaires privées pourrait être réalisée, comme l'on fait le PNR du Livradois-Forez, afin d'illustrer les intérêts d'une Trame de vieux bois et les avantages que cela présente pour les propriétaires (Les textes produits pour cette plaquette peuvent être mobilisés par le PNR PA, mais non les illustrations).</p>
Arbre habitat	<p>La protection d'arbre habitat se met en place dans le cadre de plan de gestion. Ces arbres sont marqués afin de les conserver, c'est-à-dire qu'ils ne seront pas abattus. Ces arbres sont porteurs d'habitats comme des loges, cavités, bois morts, ... Ils permettent de mettre en place des corridors en pas japonais entre différents îlots ou zones en libre évolution. On peut choisir de conserver des arbres habitats vivants ou morts.</p>	<p>Permet la mise en place de corridors en pas japonais entre différents îlots, là où une préservation totale de la parcelle ne serait pas possible. Très bon dispositif pour relier les réservoirs de biodiversité entre eux par pas japonais.</p>	<p>Protection partielle, pas de libre évolution d'une aire à enjeux écologique. Ce dispositif permet seulement la mise en place de corridors écologiques.</p>

Figure 34: Tableau des dispositifs pertinents pour favoriser une Trame forestière fonctionnelle sur le territoire du PNR PA (réalisée par Marie Sallebert)

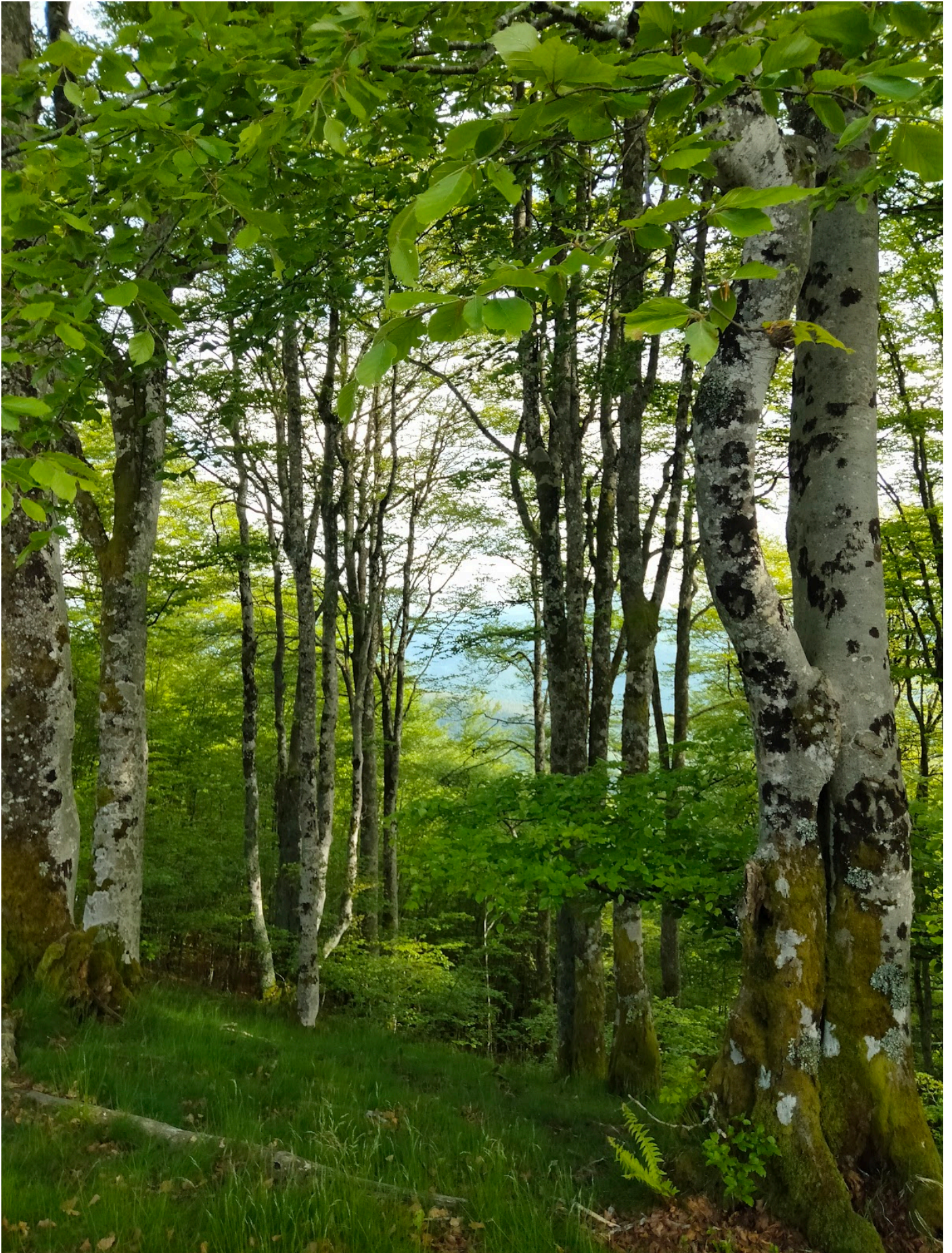


Figure 35: Photographie d'une hêtraie (Marie Sallebert, le 29/05/2024, col de la Crouzette)

2. Pour une répartition homogène sur le territoire entre montagne et plaine

Pour assurer la pertinence et l'efficacité de la Trame forestière fonctionnelle dans le PNR PA, il est essentiel de répartir équitablement les efforts de protection entre les zones de montagne et de plaine. En montagne, la pression humaine est généralement moindre et les indicateurs écologiques sont souvent plus favorables. En revanche, les plaines sont confrontées à des enjeux spécifiques qui justifient une attention particulière. Les plaines des Pyrénées Ariégeoises sont caractérisées par une exploitation forestière plus intensive, en raison de la topographie qui favorise l'accès et l'exploitation, contrairement aux zones de montagne. Les plaines sont aussi plus largement occupées, et présentent une artificialisation des sols, et des fragmentations plus importantes pour les milieux forestiers (Figure 33 page 60). De ces éléments résultent une quantité d'indicateurs écologiques favorables plus faible en plaine qu'en zone de montagne (Figure 32 page 60). En effet les indicateurs tels que l'ancienneté des forêts, ou la hiérarchisation des boisement (Annexe 2, 3 et 4) sont plus importants en zone de montagne. On peut supposer qu'il en sera de même pour l'indice de maturité à l'issue de la modélisation LiDAR.

Dans ce contexte, il faut donc réfléchir à comment protéger les zones de plaines avec la même attention que les zones de montagnes, malgré des indicateurs écologiques plus restreints. La protection des zones de plaine représente un enjeu majeur pour la continuité écologique, aussi bien à l'échelle locale que intra régionale. Ces enjeux soulignent la nécessité de renforcer en priorité les zones de plaines pour homogénéiser le réseau de protection et améliorer les indicateurs écologiques.

Afin de lutter contre la fragmentation, des initiatives de restauration écologique doivent être mises en place pour reconnecter les habitats naturels. Cela peut inclure la création de haies, la protection d'arbres habitats et d'arbres morts, la création d'îlots de sénescence même sur de plus petites surfaces.

Pour ce qui concerne les indicateurs évoqués dans IV. B. 1., il peut être envisagé de mettre en place un référentiel propre aux territoires de plaine. Par exemple, pour l'indice de maturité, on pourrait calculer la médiane du territoire en excluant les zones de montagnes, afin d'avoir un référentiel relatif à la plaine. Ainsi on pourrait distinguer les zones les plus matures, et donc potentiellement prioritaire en plaine. L'idée ici est d'amoindrir les attentes fixée pour tous les indicateurs écologiques évoqués, pour identifier les zones prioritaires de plaine.

Il est important de travailler en collaboration avec les propriétaires, les exploitants forestiers et les organismes spécialisés comme l'ONF et le CRPF pour élaborer des stratégies pertinentes et efficaces. La mise en place de protection stricte et de libre évolution en plaine pourrait être mal acceptée par les acteurs locaux. Pour améliorer l'acceptabilité de ce type de projet, on peut envisager plusieurs actions, notamment de sensibilisation. Pour cela on peut reprendre les actions menées par différents PNR. La sensibilisation peut prendre différentes formes, certains comme le PNR de la baie de Somme, propose des journées éducatives à destination du grand public, en partenariat avec des associations locales, afin de changer les idées reçues sur le bois mort et de promouvoir son importance pour la biodiversité. Pour s'adresser aux propriétaires privés le PNR Livradois-Forez à produit un livret explicatif du projet de Trame de vieux bois, afin d'informer sur les moyens de s'impliquer, les action possible, les potentielles intérêts économiques,... D'autres actions

menées par les PNR à destination des propriétaires sont l'organisation de réunions d'information en partenariat avec des associations de propriétaires forestiers, l'organisation de séminaire thématique, la diffusion des avancées du projet sur leur page internet,...

Lorsque la mise en place d'un mode de protection n'est pas possible, il peut être bon d'encourager l'adoption de pratiques sylvicoles plus douces, telles que la SMCC. Cela peut contribuer à préserver la biodiversité tout en maintenant des activités économiques viables.

Pour favoriser l'adhésion des propriétaires fonciers à ces initiatives, il est recommandé de proposer des contrats souples et peu engageants, pouvant être ajustés en fonction des volontés et des réticences des propriétaires. Cependant la souplesse et la courte durée des contrats peuvent ne pas être efficaces pour garantir les objectifs du PNR PA. Le PNR du Livradois-Forez propose des contrats souples de 10 ans, hors sur une période si courte on ne peut pas parler de libre évolution. Les milieux forestiers sont des milieux qui évoluent lentement, la période de 10 ans peut être comparable à la durée qui s'écoule entre deux coupes forestières. Ces contrats à durée relativement courte ne garantissent pas la pérennité du milieu et de la Trame forestière dans son ensemble.

Comme nous l'avons déjà vu, les enjeux de connectivités écologiques et d'homogénéisation sur le territoire du PNR PA sont importants. La répartition spatiale de la Trame doit alors se faire en prenant en compte cet enjeu comme un indicateur. Sur la figure 31 page 57, ressort l'indicateur «fort enjeu de connectivité/ homogénéisation sur le territoire». Pour identifier les secteurs présentant cet enjeu, il faut d'abord faire apparaître les indicateurs évoqués dans la partie IV. B. 1.. Ces indicateurs apparaissent donc comme prioritaires et constituent les zones où doivent être mis en place les îlots ainsi que les corridors pour les relier. Comme évoqué, ces secteurs sont surtout représentés en milieux montagnards. Les secteurs où une absence d'indicateurs écologiques est observée peuvent être considérés comme à enjeux de connectivité. La distance nécessaire entre chaque îlot doit être établie afin de garantir un maillage pertinent. Les pas entre ces îlots peuvent être défini de plusieurs manière:

- Interpréter la carte représentant tous les indicateurs évoqués, et interpréter les zones de «vide» qui apparaissent. Couplé à une interprétation des photos aériennes pour définir les zones à enjeux de connectivité et d'homogénéisation.
- Étudier les aires de dispersion d'espèces forestières identifiées comme pertinentes pour garantir un maillage adapté à leur cycle de vie. Ces espèces devront être représentatives d'un nombre plus large d'espèces pour garantir l'efficacité de la Trame.

3. Recommendations

Pour développer un projet de Trame de vieux bois, plusieurs recommandations peuvent être à prendre en compte, ces recommandations sont issues des entretiens et de mes échanges avec d'autres PNR ayant entrepris ce travail.

La première étape est la réalisation d'une cartographie détaillée des forêts à enjeux écologiques incluant en priorité les forêts anciennes et matures (voir IV. B. 1.). Cette cartographie permet d'identifier les zones prioritaires à protéger et à gérer. Une cartographie précise permet de localiser les futurs îlots de sénescence, et de planifier les différentes actions à mener adaptées aux spécificités des parcelles forestières.

L'engagement des propriétaires forestiers constitue un autre élément fondamental. Il est important d'impliquer ces propriétaires dès le début du projet, en leur expliquant les bénéfices écologiques et économiques potentiels. Cet engagement peut être facilité par l'organisation de réunions d'information régulières et la distribution de documents pédagogiques clairs et convaincants. Les propriétaires bien informés sont plus susceptibles de participer activement et de soutenir les initiatives de conservation. Le projet de Trame de vieux bois dans le PNR du Livradois-Forez s'est heurté au manque de volontaires du côté des propriétaires privés. Le PNR compte une grosse majorité de forêt privée, 93% contre 7% de forêt publique, ils sont alors très dépendants de la volonté des propriétaires privés. Pour eux le levier principal est l'action sur les forêts publiques, avec la mise en place d'îlots de sénescence et de RBI en étroite collaboration de l'ONF. Pour les forêts privées, ils comptent une vingtaine de propriétaires volontaires, ce qui représente une part trop faible pour produire un maillage de Trame forestière efficace. Le PNR LF a donc été contraint de mettre en place la Trame de vieux bois sur les parcelles où les propriétaires étaient volontaires, plutôt que sur les secteurs à forts enjeux écologiques, ce qui amoindrit les bénéfices écologiques d'un tel projet. Pour éviter cela on peut imaginer qu'un travail de communication et de sensibilisation soit mené, en se focalisant davantage sur les propriétaires des parcelles à forts enjeux écologiques. On pourrait aussi prévoir une co-construction du projet en intégrant les propriétaires privés et publics afin de permettre une entente et une acceptabilité maximale du projet. De plus, le PNR PA compte davantage de forêts publiques, 33% contre 67% de forêts privées. Cela lui laisse une plus grande opportunité de développer des îlots en partenariat avec l'ONF. Pour cela une collaboration doit être initiée afin de proposer des secteurs prioritaires pour les îlots de sénescences et d'accompagner leur mise en place.

Adapter les conventions en fonction des volontés des propriétaires est également une recommandation clé. Que les propriétaires soient des communes, des particuliers avec ou sans plans simples de gestion (PSG), il est important de prévoir des accords adaptables à leur attentes et aux objectifs voulus par le PNR. Les conventions sont plus efficaces si elles intègrent des compensations financières lorsque cela est possible, afin de motiver les propriétaires à participer. Cette flexibilité et ces incitations financières contribuent à une participation plus large et à un engagement durable.

Fournir des outils et des ressources adaptés est une autre piste pour permettre aux propriétaires et gestionnaires d'intégrer la protection de la biodiversité à leur gestion. Du matériel forestier approprié pour réaliser des collectes de données écologiques, des guides pratiques, et de formations organisées régulièrement peuvent permettre une meilleure connaissance des enjeux écologiques forestiers, et ainsi inciter à mettre en place des actions adaptées.

« On protège ce qu'on aime, et on aime ce qu'on connaît »
-JACQUES COUSTEAU-

La mise en place d'un système de suivi et d'évaluation sur le long terme de la Trame de vieux bois est également à envisager. Ce système permet de mesurer l'impact des îlots de sénescence et d'ajuster le projet en conséquence. Un suivi rigoureux aide à identifier les succès et les échecs, offrant ainsi des opportunités pour améliorer continuellement les stratégies de conservation. L'idéal est de réaliser des études naturalistes au stade de l'état initial, puis de renouveler l'opération avec un pas de temps pertinent pour mesurer l'impact de la mise en place d'une Trame de vieux bois.

Enfin, la collaboration avec des organismes de recherche est fortement recommandée. Impliquer des chercheurs permet de réaliser des études scientifiques sur les îlots de sénescence, fournissant des données précieuses pour mieux comprendre et valoriser les bénéfices écologiques de ces zones. Les résultats de ces recherches peuvent ensuite être utilisés pour informer et améliorer les pratiques de gestion et de conservation.

D. Perspectives

1. Valorisation du projet

Pour assurer le succès et la pérennité du projet, il est important de veiller à une bonne valorisation et communication sur le travail effectué. La sensibilisation des parties prenantes, notamment les propriétaires forestiers, est essentielle pour encourager leur adhésion et leur implication active. Plusieurs actions concrètes peuvent être envisagées pour atteindre cet objectif.

Une première action consiste à élaborer un livret d'information destiné aux propriétaires forestiers. Cette plaquette pourrait s'inspirer de celle du Parc Naturel Régional du Livradois-Forez, en mettant en avant les bénéfices écologiques et économiques d'une gestion forestière respectueuse des continuités écologiques. Ce livret pourrait présenter des exemples de bonnes pratiques, des témoignages de propriétaires déjà engagés dans le projet, ainsi que des informations sur les aides et les accompagnements disponibles pour la mise en place d'îlots de sénescence. L'objectif est de fournir un outil clair et convaincant, qui permette aux propriétaires de mieux comprendre les enjeux du projet et les encourage à y participer. Par ailleurs, lors de l'entretien mené avec le PNR LF, l'agent m'a confirmé que les textes de leur livret étaient réutilisables par les autres PNR, seulement les photographies ne sont pas libres de droit.

Pour élargir la portée de la communication, une page dédiée au projet pourrait être ajoutée au site internet du PNR PA. Cette page servirait de vitrine numérique du projet, regroupant les actualités, les événements à venir, ainsi que les ressources documentaires. Elle pourrait également proposer des outils interactifs, comme une carte des zones prioritaires pour la Trame forestière, des vidéos explicatives, et des formulaires de contact pour faciliter l'engagement des propriétaires. La mise à jour régulière de cette page garantirait une communication dynamique et actuelle, en gardant les parties prenantes informées et impliquées. C'est ce qu'ont mis en place différents PNR impliqués dans des projets similaires.

Pour favoriser l'échange direct et personnalisé, il serait pertinent d'organiser des rencontres entre les propriétaires forestiers et les experts du projet, en collaboration avec des associations locales. Ces temps d'échanges pourraient prendre la forme de réunions d'information, d'ateliers thématiques, ou de visites de terrain. L'idée est de créer des espaces de dialogue où les propriétaires peuvent exprimer leurs préoccupations, obtenir des conseils personnalisés, et découvrir les outils de protection possible comme les ORE. Ce contact direct est souvent déterminant pour lever les réticences et renforcer la confiance des propriétaires dans le projet.

Enfin, pour encourager une prise de conscience concrète des enjeux écologiques, il pourrait être proposé aux propriétaires un accompagnement dans la réalisation de relevés écologiques sur leurs parcelles. La mise à disposition de matériel spécifique (kits de relevé, guides d'identification des espèces, etc.) et l'offre d'un suivi personnalisé par des

spécialistes permettraient aux propriétaires de mieux comprendre la biodiversité présente sur leurs terrains et les bénéfices d'une gestion favorable aux continuités écologiques. En effet il est ressorti de mes différentes recherches, échanges et entretiens qu'il était important de combiner outils pédagogiques, échanges directs, et accompagnement personnalisé, pour favoriser l'adhésion des propriétaires forestiers au projet de Trame forestière. Pour les propriétaires qui ne seraient pas sensibles aux arguments avancés par le PNR, le recours reste la mise en place de financement au travers de paiement compensatoire pour compenser le manque à gagner d'un arrêt de l'exploitation forestière.

2. Perspectives de collaboration

Le développement d'une Trame forestière fonctionnelle repose non seulement sur l'engagement des propriétaires forestiers, mais aussi sur la création de collaborations stratégiques avec divers acteurs du territoire. Ces partenariats peuvent jouer un rôle clé dans l'acquisition de données, l'accompagnement technique, et la sensibilisation des parties prenantes. Voici quelques pistes de collaboration à explorer.

Au cours d'entretiens il a pu ressortir qu'il serait judicieux d'impliquer le secteur de la recherche. Cela pourrait constituer une opportunité pour obtenir des données scientifiques sur les îlots, et les impacts d'une mise en libre évolution. Proposer ces îlots comme terrains de recherche à des universités, des laboratoires, ou encore des classes d'études spécialisées permettrait non seulement de faciliter la production de données, mais aussi de renforcer la visibilité du projet. Les chercheurs pourraient, par exemple, mener des études sur la biodiversité, l'impact des îlots sur la connectivité écologique, ou encore les dynamiques forestières en lien avec le changement climatique. Ces collaborations académiques apporteraient une rigueur scientifique au projet, tout en offrant aux étudiants et chercheurs un terrain d'étude concret et pertinent.

Une autre perspective de collaboration réside dans l'identification et l'implication d'associations et d'organismes qui partagent des intérêts communs avec le projet. Cela inclut non seulement des associations environnementales locales, mais aussi des organismes régionaux ou nationaux œuvrant pour la protection de la biodiversité, la gestion durable des forêts, ou encore la conservation des paysages. Ces partenaires potentiels pourraient apporter leur expertise, leurs réseaux, et leurs ressources pour soutenir le projet. Au cours de mon stage j'ai élaboré une première liste des partenaires qu'ils seraient bon d'intégrer au projet:

- l'ONF
- le CRPF (Centre national de la propriété forestière)
- la DDT (Direction départementale des territoires)
- l'ANA CEN Ariège et le CEN Occitanie
- Sylvestre (association ariégeoise de propriétaire forestier pratiquant une sylviculture respectueuse des écosystèmes forestiers)
- Forêts préservées (association qui travaille à l'échelle des Pyrénées à reconnaître et protéger les forêts anciennes et les vieilles forêts. À l'aide de fonds et de donations elle acquiert des forêts afin de les préserver)
- NEO (Nature en Occitanie est une association de protection du patrimoine naturel, qui apporte principalement un soutien financier aux acteurs institutionnels pour leur missions, mais mène aussi des actions: expertises, animations,...)

Cette liste pourrait être enrichie en fonction des orientations du projet et de la volonté politique du PNR PA.

Enfin, la collaboration avec des gestionnaires forestiers pourrait permettre d'accompagner les propriétaires privés dans la mise en place de contrats de protection de leurs parcelles. Ces professionnels jouent un rôle clé dans la gestion quotidienne des forêts et sont des intermédiaires naturels entre les propriétaires et les organismes de protection de l'environnement. Ils peuvent fournir un appui technique pour l'élaboration et la mise en œuvre de plans de gestion qui intègrent les objectifs de la Trame forestière. Ce type de collaboration garantit que les objectifs écologiques du projet sont compatibles avec les réalités économiques des propriétaires forestiers. Pour mener un tel partenariat le PNR PA devrait conventionner avec un gestionnaire forestier indépendant, ce qui peut engendrer un coût important au projet.

En unissant les forces de ces différents acteurs, le projet pourra bénéficier de données robustes, d'un réseau de soutien étendu, et d'un accompagnement technique efficace, maximisant ainsi ses chances de réussite et son impact à long terme.

3. La mise en place d'un suivi de la Trame forestière

Au cours d'entretiens et d'échanges avec des structures ayant initié des projets de Trame de Vieux bois, il est apparu qu'un suivi du projet serait bénéfique à réaliser. Les raisons évoquées sont variées: étudier l'efficacité, valoriser le projet, susciter l'intérêt de nouveaux partenaires ou volontaires,... Ces études permettraient de mesurer l'impact réel des actions mises en œuvre sur la connectivité écologique, la biodiversité, et la résilience des écosystèmes forestiers. Une approche structurée et méthodique peut être pensée pour évaluer l'efficacité de la Trame sur le long terme.

Le suivi de la Trame forestière pourrait commencer par la réalisation d'un « état zéro » ou état de référence, qui consiste en une évaluation initiale des conditions écologiques et forestières avant l'implantation des actions de la Trame. Cet état de référence servirait de base comparative pour toutes les futures évaluations. Il pourrait par exemple comprendre des relevés détaillés de la biodiversité, des inventaires forestiers, des analyses de la qualité des habitats, et des études sur les dynamiques des espèces clés. Cette phase permet de déterminer les points de départ et de fixer des objectifs clairs pour le projet.

Ensuite, des études de suivi régulières seraient réalisées à des intervalles définis, les milieux forestiers évoluant lentement les pas de re-mesure seraient à définir de manière pertinente, avec un espacement assez conséquent. Ces mesures permettraient de mesurer les évolutions par rapport à l'état zéro. Les données recueillies lors de ces études permettraient de vérifier si les objectifs de la Trame forestière sont atteints, d'identifier les succès et les défis, et d'ajuster les actions en conséquence.

Pour assurer un suivi efficace, il serait important de définir des méthodes standardisées et des indicateurs clés adaptés aux spécificités de la Trame forestière. Il serait pertinent de remobiliser la modélisation LiDAR et de mobiliser le travail produit sur la mise en place d'un observatoire forestier du PNR PA (travail réalisé par Vincent Doublé sur la même période que mon stage).

Enfin, le suivi de la Trame forestière pourrait être pensé en collaboration avec les chercheurs et les associations environnementales. Leur implication garantit une meilleure collecte des données sur le terrain, mais aussi une réflexion collective sur les résultats et les ajustements à apporter. Des ateliers de restitution des résultats de suivi pourraient être

organisés pour partager les avancées, discuter des ajustements nécessaires, et renforcer la collaboration entre les acteurs impliqués. L'ensemble des travaux produits et résultats obtenus dans le cadre du projet pourrait également être utilisé par des PNR, ou autre institution ayant les mêmes objectifs de mise en place de Trame forestière fonctionnelle.

V. Discussions

A. Synthèse et interprétation global des résultats

Mise en place d'une trame forestière fonctionnelle

- *Quels acteurs à intégrer au projet?*
L'ONF, Le CNPF, la DDT, l'ANA CEN Ariège, Sylvestre, Forêt préservée, NEO
- *Quels données existantes à mobiliser?*
Données vieilles forêts des Pyrénées, données forêts anciennes, données "cœur de biodiversité" TVB, données de présence d'espèces forestières emblématiques
- *Quels données à produire?*
IMAT > à la médiane des forêts matures, secteurs à fort enjeux de connectivité



Corridors écologiques

- *Comment choisir le tracé?*
Prendre en compte la fragmentation modéliser dans la TVB
Superposition des données cartographiques des secteurs à enjeux et interprétation des corridors potentielle à l'aide de photos aériennes
Etudes sur les déplacements d'espèces représentatives
- *Qu'est ce qui est déjà existant sur les tracés potentiels?*
Mobiliser les éléments déjà existant tel que les ORE, propriétés du CEN ou d'association comme forêts préservée, RBI, RBD,...

Réservoirs de biodiversité

- *Quels indicateurs à prendre en compte?*
Données vieilles forêts des Pyrénées, données forêts anciennes, données "cœur de biodiversité" TVB, données de présence d'espèces forestières emblématiques, l'IMAT (>à la médiane des forêts matures), les secteurs à forts enjeux de connectivité/ homogénéisation
- *Quels outils de préservation pertinents à mobiliser ?*
RBI, RBD, Sites acquis des CEN ou association de protection de l'environnement comme Forêt Préservée, ORE, ENS, SMCC, Contrat Natura 2000 forestier, îlot de senescence, arbre habitat

Figure 36 : Schéma synthétique des résultats apportés à la commande du stage (réalisé par Marie Sallebert)

Les résultats de l'étude mettent en lumière plusieurs éléments clés qui sont essentiels à considérer pour la mise en place d'une Trame forestière fonctionnelle dans les Pyrénées Ariégeoises.

Il existe très peu de vieilles forêts en Ariège (Annexe 3), ce qui constitue une limite majeure quant à la prise en compte de celle-ci comme indicateur pour la mise en place de la Trame fonctionnelle. Leur rareté souligne la nécessité d'identifier et de préserver activement les fragments restants de vieilles forêts tout en planifiant la restauration et la mise en place de nouveaux îlots de sénescence.

À l'heure actuelle, il y a très peu d'initiatives de libre évolution planifiée sur le territoire, ce qui représente un défi important. Bien que certaines zones forestières semblent déjà en libre évolution en raison de l'absence de gestion active, cette libre évolution existe de fait mais n'est pas choisie. Cette situation pose des questions sur l'acceptabilité sociale de la libre évolution. D'après des études la mise en place de réserve intégrale semble rencontrer davantage d'opposition qu'une mise en libre évolution ou l'on interdit l'exploitation mais autorise d'autres usages comme la fréquentation, la cueillette et la chasse (Debaive et al., 2022). Ce qui apparaît dans ces études, est qu'une concertation avec les habitants et les acteurs locaux est primordiale afin de garantir que le projet soit accepté et trouve un équilibre entre respect des usages et protection. Cependant il est important de s'interroger sur les objectifs du projet et se demander si l'autorisation de ces pratiques ne nuirait pas à la démarche de préservation de la biodiversité.

Le terme «libre évolution» peut susciter des réticences parmi les usagers, car il est perçu comme un abandon du contrôle et fait écho à la notion de retour du sauvage. Cette libre évolution peut rencontrer plus d'opposition dans des contextes ruraux ayant subi une déprise agricole ou d'autres activités sylvo-pastorales, comme c'est le cas ici. Ces conflits d'usages liés à une libre évolution sont aussi exacerbés dans des contextes où l'on recense des grands prédateurs comme le loup ou l'ours (Barthod et al. 2022). L'ours a été réintroduit dans les Pyrénées en 2006, ce qui a généré des tensions sur le territoire et peut rendre le sujet d'une libre évolution, sensible.

Le travail de terrain et l'analyse des données révèlent qu'une grande partie des forêts étudiées sont peu gérées ou exploitées. Cela pourrait signifier qu'il y a déjà une tendance naturelle vers une libre évolution, mais non encadrée ou volontaire. Cette situation soulève des questions sur la manière dont une approche plus structurée de la libre évolution pourrait être acceptée et mise en œuvre, nécessitant une sensibilisation et un dialogue avec les acteurs locaux pour promouvoir une compréhension commune des objectifs et des bénéfices potentiels de la conservation en libre évolution.

B. Retour critique sur le travail produit

Le travail de terrain réalisé dans le cadre du stage a été particulièrement exigeant sur le plan physique. La nature du terrain et les conditions parfois extrêmes ont rendu ce travail de calibration du LiDAR difficile. Cependant cette mission a été l'occasion d'un apprentissage précieux auprès des forestiers indépendants, enrichissant ainsi mes compétences pratiques et ma compréhension des écosystèmes forestiers. Ce travail de terrain, nécessaire pour produire la modélisation, ne m'a pas permis d'enrichir directement mes résultats quant à mon sujet de mise en place d'une Trame forestière fonctionnelle.

Cependant, il permettra au PNR de bénéficier de précieuses données pour la suite du projet, comme l'indice de maturité.

Ce travail de terrain s'est avéré très chronophage, ce qui a eu un impact direct sur la progression de la rédaction du mémoire. La gestion de l'organisation des sorties terrain, du déchargement des données et des heures supplémentaires engendrées par ces activités s'est révélée compliquée, limitant le temps disponible pour d'autres aspects importants du projet, comme la réalisation d'entretiens. Pour pallier cette difficulté, une organisation conjointe avec Vincent, qui devait également mener des entretiens, s'est mise en place pour partager les résultats et optimiser notre efficacité.

Il convient de noter un léger biais dans le travail de terrain, notamment en raison des différences d'approches entre les deux forestiers impliqués dans le projet. Certaines placettes ont été réalisées en dépit de critères contraires au protocole établi ce qui pourrait affecter la comparabilité des données.

Du côté des entretiens, bien que leur nombre ait été insuffisant pour une analyse exhaustive, le séminaire inter Parcs auquel j'ai participé a représenté un atout considérable. Ce séminaire a offert un espace de partage d'expériences et d'échanges riches, compensant partiellement le manque d'entretiens individuels.

Un autre point critique réside dans le biais potentiel lié à la commande du PNR, qui a pu influencer certaines orientations de ce travail. Le PNR m'a demandé de me concentrer sur la modélisation LiDAR pour l'identification des zones prioritaires de la Trame forestière fonctionnelle. Si cette approche présente indéniablement des avantages, comme une précision accrue et une couverture spatiale étendue, elle n'est pas exempte de limites qu'il convient de considérer. La focalisation sur la modélisation LiDAR a orienté le projet vers une méthodologie essentiellement technologique, risquant d'occulter d'autres approches complémentaires, telles que des observations de terrain plus qualitatives ou des études sociales auprès des acteurs locaux. Le LiDAR est efficace pour cartographier la structure des forêts et identifier des indicateurs physiques de maturité des forêts ou de connectivité des habitats. Cependant, il ne capture pas toutes les dimensions de la biodiversité forestière, notamment les interactions complexes entre espèces, ou les micro-habitats. Ces aspects nécessitent des méthodologies complémentaires basées sur des études de terrain approfondies, des enquêtes socio-économiques et des collaborations interdisciplinaires. Bien que la modélisation LiDAR permette une identification rapide et précise des zones de vieux bois et des corridors écologiques potentiels, elle peut aussi refléter une vision partielle de la réalité écologique et sociale. Cette approche pourrait ainsi négliger des aspects importants pour l'acceptabilité sociale et la mise en œuvre des stratégies de gestion, en particulier dans les zones où l'interaction humaine avec les forêts est prégnante.

Il est donc important de rester conscient de ces biais pour mieux les anticiper et les gérer dans des projets futurs. Cela implique de renforcer la complémentarité des méthodes en intégrant des approches participatives et qualitatives aux technologies de télédétection. Une approche intégrée pourrait inclure des ateliers avec les parties prenantes locales, des études de perception et une validation des modèles LiDAR par des observations de terrain plus fines.

Ce projet m'a permis de développer de nouvelles connaissances sur les milieux forestiers et en utilisation de matériel technique pour des mesures de terrain.

Au cours du master Gestion et évaluation des environnements montagnards nous avons suivi des enseignements tournés vers la biodiversité forestière et les gestions adaptées pour la préserver. Ces enseignements ont été complétés par une sortie terrain mettant en pratique des mesures de l'indice de biodiversité potentielle (IBP). Les connaissances et compétences développées au cours de ces modules ont été très utiles dans la réalisation du stage.

N'ayant pas suivi une formation spécialisée sur les milieux forestiers et leur gestion, il m'a toutefois fallu approfondir certains aspects de cette thématique, notamment quant à la mise en place de libre évolution et sur les notions de continuités écologiques.

Les journées de terrain aux côtés des forestiers indépendants ont été particulièrement formatrices et m'ont permis de renforcer mon apprentissage.

C. De potentielles limites au projet

Le projet de mise en place d'une Trame forestière fonctionnelle, pourrait rencontrer plusieurs limites similaires à celles rencontrées sur d'autres territoires. Ces limites méritent d'être examinées pour anticiper les obstacles et ajuster les stratégies de gestion en conséquence.

L'un des défis majeurs auxquels le projet pourrait faire face est la réticence des propriétaires forestiers à s'engager activement dans le processus. Cette réticence est souvent motivée par des préoccupations économiques.

Les financements disponibles pour ce type de projet s'inscrivent souvent dans des cycles courts, généralement de trois ans. Cependant, les dynamiques écologiques forestières, ainsi que les changements de mentalité concernant la gestion durable des forêts, nécessitent une approche sur le long terme pour être réellement efficaces. Des financements à court terme ne permettent pas de réaliser un suivi continu et d'évaluer les impacts écologiques à long terme de la Trame forestière. Pour pallier cette limite, il serait nécessaire de plaider pour des programmes de financement prolongés, garantissant la stabilité des projets de conservation et la possibilité d'un suivi écologique rigoureux et durable.

Une autre limite potentielle concerne la taille des îlots de sénescence, qui, dans certains cas, est trop réduite pour produire des bénéfices significatifs pour la biodiversité. Le projet au PNR Livradois-Forez a montré que des îlots d'une taille minimale de 0,5 hectare, et parfois même de 0,3 hectare, bien que acceptables, ne sont pas toujours suffisants pour favoriser de manière optimale la biodiversité forestière. Des études écologiques suggèrent que des îlots de plus grande taille, entre 2 et 3 hectares minimum, offriraient des conditions plus favorables à la biodiversité en créant des habitats plus diversifiés et résilients. Dans ce contexte, il serait pertinent d'explorer des stratégies permettant de constituer des îlots de plus grande taille ou de connecter plusieurs petits îlots pour créer des complexes écologiques plus vastes.

La mise en place d'une Trame forestière fonctionnelle vise à créer une couverture écologique homogène, répartie de manière équitable entre les zones de montagne et de plaine. Cependant, cette répartition homogène peut être difficile à atteindre en raison des différences intrinsèques entre ces zones, notamment en termes de topographie, de propriété

foncière, de densité de population et d'utilisation des terres. Les plaines, souvent plus fragmentées et soumises à des pressions anthropiques et de développement urbain, présentent des défis particuliers pour la connectivité des habitats. De plus, les forêts d'altitude sont davantage du domaine public, et donc gérées par l'ONF ou les communes, alors que les forêts de plaine sont plutôt en propriété privée. Il faut prendre en compte ces réalités territoriales afin de renforcer l'efficacité écologique de la Trame.

D. Étapes restantes et piste de travail

Mon stage constituait une première étape dans le cadre de la mise en place d'une Trame forestière fonctionnelle dans les Pyrénées Ariégeoises. L'objectif principal était de présenter les possibilités et de produire un guide méthodologique, notamment en utilisant la modélisation LiDAR, qui sera prochainement produite. À l'issue de ce travail préliminaire, plusieurs étapes importantes ont été identifiées pour avancer le projet, avec des recommandations sur la manière de les réaliser et les profils nécessaires pour les mener à bien.

Pour assurer la pertinence et la précision de l'indicateur de maturité des forêts, il est essentiel de produire des statistiques fiables qui en mesurent la fiabilité. Cette étape nécessitera l'implication de professionnels ayant des compétences solides en production de statistiques et en analyse de données écologiques. Les statistiques devront être basées sur un échantillon représentatif des forêts des Pyrénées Ariégeoises, en tenant compte des variations entre les zones de montagne et de plaine.

Une fois le travail statistique produit, il s'agira de mener des travaux de terrain pour mesurer la maturité des forêts et ainsi chiffrer la fiabilité de l'indice. Cela permettra d'affiner la précision des indicateurs utilisés. Cette tâche nécessite des agents de terrain ou des prestataires compétents, éventuellement appuyés par des stagiaires formés aux techniques de mesure forestière. Les mesures de terrain consisteront à relever les données sur la présence de bois mort sur pied et au sol et d'en déterminer le stade de décomposition, ainsi que la présence de très gros bois pour déterminer leur surface terrière. Les compétences requises incluent une bonne connaissance de l'écologie forestière, l'utilisation d'instruments de mesure spécifiques et une compréhension des protocoles de suivi écologique.

Une fois les données produites et contrôlées, leur traitement sera nécessaire pour calculer la médiane de l'IMAT, en particulier pour les forêts de plaine. Cela implique l'utilisation de logiciels de traitement de données écologiques et statistiques. Ce travail pourrait être confié à des chercheurs ou doctorants, capables de réaliser des analyses spatiales et de modélisation prédictive. Les résultats permettront d'affiner les recommandations de gestion et de définir des zones prioritaires pour la conservation et la restauration forestière.

Pour identifier les corridors écologiques les plus pertinents, une étude des espèces forestières et de leurs déplacements pourrait être menée. Cette étape nécessiterait des naturalistes spécialisés, capables d'interpréter des données d'observation existantes et d'en générer de nouvelles à partir des données LiDAR d'habitat potentiel. Des méthodes telles que l'utilisation de pièges photographiques et le suivi GPS pourraient être mises en œuvre

pour étudier les déplacements des espèces sélectionnées. Les espèces à étudier devraient être choisies en fonction de leur rôle clé dans l'écosystème et de leur sensibilité à la fragmentation.

L'identification des secteurs à fort enjeu de connectivité nécessitera également des profils naturalistes, spécialisés dans la biodiversité forestière. Ces experts devront étudier la dispersion des espèces et élaborer un maillage écologique optimisé, permettant de connecter efficacement les habitats fragmentés. Une analyse des données existantes, couplée à de nouvelles études de terrain, aidera à identifier les zones critiques et à proposer des solutions adaptées pour renforcer la connectivité écologique. Ces travaux peuvent être co-gérés avec des partenaires du projet tel que l'ANA CEN Ariège, qui ont une portée plus naturaliste que le PNR, ou en collaborant avec des chercheurs ou doctorants spécialisés sur le sujet.

La mise en œuvre réussie du projet dépendra largement de la capacité à collaborer et à communiquer efficacement avec les parties prenantes. Il sera nécessaire de produire des documents de communication, tels que des livrets à l'usage des propriétaires privés, pour les informer et les sensibiliser à l'importance de la Trame forestière. Le développement d'un réseau de partenaires, incluant les propriétaires privés, l'ONF, et d'autres acteurs locaux, sera également crucial. Par ailleurs, la création d'un onglet dédié sur le site internet du PNR, pour la mise à jour des informations relatives au projet, pourrait faciliter la diffusion des connaissances et l'implication des parties prenantes. Ces actions de communication nécessiteront des professionnels compétents en communication environnementale et numérique.

En mobilisant les bonnes compétences et en favorisant la collaboration entre les acteurs, le projet pourra contribuer efficacement à la conservation de la biodiversité et à la résilience des écosystèmes forestiers des Pyrénées Ariégeoises.

Conclusion

Ce mémoire présente les résultats d'un travail qui constitue la première étape d'un projet de mise en place d'une Trame forestière fonctionnelle. Cette étape du projet consistait en la mise en place d'une méthodologie pour les étapes à suivre dans ce projet. Pour cela, ce rapport a dû apporter des réponses aux questions posées suivantes:

Comment identifier les zones forestières à enjeux écologiques et ainsi structurer une Trame forestière fonctionnelle en mobilisant des outils de protection efficaces ? Et comment la modélisation LiDAR peut-elle permettre d'atteindre cet objectif ?

Pour permettre à la modélisation LiDAR d'être réalisée à l'avenir, il a fallu réaliser un important travail de calibration sur le terrain. Pour mettre en place un projet de protection des forêts du territoire, la première étape est de disposer des connaissances adéquates, c'est-à-dire de la surface, de la localisation et des spécificités des forêts à fort enjeux écologiques du PNR PA. Pour identifier ces espaces forestiers à enjeux écologiques il faut mobiliser les données des forêts anciennes, des vieilles forêts des Pyrénées, des données de présence d'espèces forestières emblématiques ainsi que la hiérarchisation de cœur de biodiversité dans la modélisation TVB. Ces données permettent une lecture du territoire au travers de l'ancienneté de l'état boisé, de la biodiversité avérée, et de la qualité de la forêt en fonction de critères déterminés par le PNR pour la TVB. La modélisation LiDAR permet une lecture plus globale et plus fine du territoire. Elle permet de mesurer la maturité des forêts et ainsi de comparer celle-ci de manière relative sur l'ensemble du territoire. Les forêts les plus matures pourront alors être identifiées et éventuellement bénéficier d'une attention particulière pour développer des outils de protection. Pour cela des mesures de terrain devront garantir la fiabilité de l'indice de maturité.

Pour que la Trame forestière soit fonctionnelle, il doit être intégré la prise en compte des fragmentations sur le territoire pour que les continuités écologiques soient garanties. Pour cela on peut mobiliser le travail déjà réalisé dans le cadre de la modélisation de la TVB sur la hiérarchisation des fragmentations. Dans cet objectif, on peut aussi envisager de réaliser des études sur les déplacements d'espèces emblématiques pour identifier les secteurs à fort enjeux de connectivité.

Pour la matérialisation de cette Trame on peut penser à différents outils de protection envisageables et pertinents: les RBI, RBD, les sites acquis du CEN ou d'association de protection de l'environnement comme Forêts Préservées, les ORE, les ENS, la SMCC, les contrats Natura 2000 forestiers, les îlots de sénescence et la protection d'arbres habitats.

Pour le territoire du PNR des Pyrénées Ariégeoises, mettre en place une Trame forestière fonctionnelle représente un enjeu majeur. Cela nécessite une meilleure connaissance des milieux forestiers. Le LiDAR va permettre au PNR PA de disposer de données précises et localisées sur les forêts, ce qui va faciliter la lecture du territoire et permettre de proposer des secteurs pertinents pour la protection. Le territoire du PNR PA est confronté à une fermeture des milieux qui induit une forme de libre évolution non choisie, l'enjeu est de pérenniser des modes de protection pour préserver ces écosystèmes et favoriser leur résilience. L'un des défis du PNR PA sera de favoriser l'acceptabilité et l'engagement des propriétaires forestiers à participer activement au projet.

Le PNR PA devra par la suite mettre en place cette stratégie et procéder aux étapes restantes: traitement des données de la modélisation LiDAR, choix des priorisations, collaboration avec les propriétaires. Ce projet renforcerait la préservation de nos écosystèmes forestiers actuels, mais aussi assurerait la santé et la résilience des forêts pour les générations futures.



Figure 37: Photographie du cirque de cagateille (Marie Sallebert, le 07/08/2024)

Bibliographie

Amsallem, J., Deshayes, M., & Bonneville, M. (2010). Analyse comparative de méthodes d'élaboration de Trames vertes et bleues nationales et régionales. *Sciences Eaux & Territoires*, 3, 40-45.

Assmann, C. (2011). Étude de la connectivité des massifs des Vosges et du Jura au niveau de la Trame forestière (Doctoral dissertation, UHP-Université Henri Poincaré; INPL-Institut National Polytechnique de Lorraine).

Barthod, C., Dupouey, J.-L., Larrère, R., & Sarrazin, F. (2022). La libre évolution, un concept aux multiples facettes. *Revue forestière française*, 73(2-3), 105–114.

Beau, R., & Larrère, C. (2018). Introduction. In R. Beau (Ed.), *Penser l'Anthropocène*. Presses de Sciences Po, Paris.

Bergès, L., Roche, P., & Avon, C. (2010). Corridors écologiques et conservation de la biodiversité, intérêts et limites pour la mise en place de la Trame verte et bleue. *Sciences Eaux & Territoires*, (3), 34-39.

Bernard Davasse, Didier Galop. Impact des activités pastorales et métallurgiques sur les forêts d'altitude dans les Pyrénées Ariégeoises (France). *Ecologie et biogéographie alpines*, Sep 1990, La Thuile, Italie. pp. 151-160.

Biache, C., & Rouveyrol, P. (2011). Mise en place d'un îlot de sénescence: enquête sur des préconisations possibles et estimation du coût. *Revue forestière française*, 63(1), 45-56.

Bilger, I., Paillet, Y., Laguet, S., Doutau, B., Bullifon, F., Chevalier, M., ... & Archaux, F. (2021). Modélisation de la distribution des petites chouettes de montagne dans les Alpes du Nord françaises. *Naturae.*, 13, 167-181.

Bioret, F., Estève, R., & Sturbois, A. (2009). *Dictionnaire de la protection de la nature*. Presses Universitaires de Rennes, Rennes.

Boeuf, G. (2012). Qu'est-ce Que La Biodiversité ? Quels Sont Les Mécanismes De Son Érosion ? *Responsabilité & Environnement*, 68, 9.

Bütler, R., Lachat, T., Krumm, F., Kraus, D., & Larrieu, L. (2020). *Guide de poche des dendromicrohabitats. Description et seuils de grandeur pour leur inventaire*. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL.

Carnol, M., & Verheyen, K. (2010). Les services écosystémiques dans les forêts mélangées et pures: perception des utilisateurs et connaissances scientifiques. *Forêt Wallonne*, 106(mai/juin 2010).

Cateau, E., Parrot, M., Reyna, K., Roux, A., Rossi, M., Bruciamacchie, M., & Vallauri, D. (2013). Réseau d'îlots de vieux bois. Eléments de méthode et test dans les forêts publiques du Mont-Ventoux. Rapport WWF.

Chevassus-Au-Louis, B., & Pirard, R. (2011). Les services écosystémiques des forêts et leur rémunération éventuelle. *Revue forestière française*, 63(5), 579-599.

Cormier, L., Lajarte, A. B. D., & Carcaud, N. (2010). La planification des Trames vertes, du global au local: réalités et limites. *Cybergeog: European Journal of Geography*.

Courbaud, B., Kunstler, G., Morin, X., & Cordonnier, T. (2010). Quel futur pour les services écosystémiques de la forêt alpine dans un contexte de changement climatique?. *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine*, (98-4).

Debaive, N., Drapier, N., Gautier, G., Larrieu, L., & Büttler, R. (2021). Espaces protégés forestiers et libre évolution. *Revue forestière française*, 73(2-3 « Des forêts en libre évolution »), 339-365.

Debaive, N., Drapier, N., Gautier, G., Larrieu, L., & Büttler, R. (2022). Espaces protégés forestiers et libre évolution. *Revue forestière française*, 73, 339-365.

Debray, A. (2015). La Trame verte et bleue, vecteur de changement des politiques de protection de la nature ou des politiques d'aménagement? (Doctoral dissertation, Tours).

Dupont, L. (2017). Compensation écologique et Trame verte et bleue: une combinaison à explorer pour la biodiversité. *Revue juridique de l'environnement*, 42(4).

Dufrêne, M., & Maebe, L. (2017). Les services écosystémiques en forêt.

Kremer A., Plomion C., Leroy T. (2023). Changement climatique : la diversité génétique à l'origine de l'adaptation des arbres ? *The Conversation*, 31.05.23

Lefèvre, F., Le Bouler, H., & Roman-Amat, B. (2011). Changement climatique attendu et biodiversité en forêt. *Revue forestière française*, 63(5).

Loreau, M., Naeem, S., & Inchausti, P. (Eds.). (2002). *Biodiversity and ecosystem functioning: synthesis and perspectives*. Oxford University Press, USA.

Monnet, J., Paccard, P., & Riond, C. (2020). La télédétection aéroportée pour la gestion des territoires forestiers de montagne. *Sciences Eaux & Territoires*, (33), 64-69.

Nuninger, L., Fruchart, C., & Opitz, R. (2010). LiDAR: quel apport pour l'analyse des paysages?. *Bulletin AGER*, (20), 34-43.

ONERC. (2018). L'arbre et la forêt à l'épreuve d'un climat qui change. Rapport au Premier ministre, La documentation française.

Opdam, P., Steingröver, E., & Van Rooij, S. (2006). Ecological networks: A spatial concept for multi-actor planning of sustainable landscapes. *Landscape and urban planning*, 75(3-4).

Parc naturel régional des Pyrénées Ariégeoises. (2012). Charte forestière de territoire de l'est du Parc naturel régional des Pyrénées Ariégeoises: Diagnostic de territoire - Octobre 2012.

Peyron, J. L. (2023). Vers une stratégie nationale d'adaptation des forêts au changement climatique?

Piedallu, C., Perez, V., Gégout, J.-C., Lebourgeois, F., & Bertrand, R. (2009). Impact potentiel du changement climatique sur la distribution de l'Épicéa, du Sapin, du Hêtre et du Chêne sessile en France. *Revue forestière française*.

Pramova, E., Locatelli, B., Djoudi, H., & Somorin, O. (2012). Le rôle des forêts et des arbres dans l'adaptation sociale à la variabilité et au changement climatiques.

Robain, M. (2023). Pratiques et stratégies de gestion sylvicole dans les Pyrénées à l'aune du changement climatique [Mémoire, AgroParisTech, HEC Paris].

Rossi, M., & Vallauri, D. (2013). Évaluer la naturalité: Guide pratique, version 1.2. WWF.

Savoie, J. M., Thomas, M., Cateau, E., Gouix, N., & Paccard, N. (2021). Connaître les forêts anciennes et matures: comment? Pourquoi? *Revue forestière française*, 73(2-3 « Des forêts en libre évolution »), 179-209.

Sitographie:

Académie des Sciences, Institut de France. (2023). Les forêts françaises face au changement climatique. https://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/060623_foret.pdf

Centre de Ressources Pour L'adaptation Au Changement Climatique. Montagne : en première ligne face au réchauffement climatique. <https://www.adaptation-changement-climatique.gouv.fr/dossiers-thematiques/milieus/montagne-elu>

École normale supérieure de Lyon. (s. d.-b). Forêt — géoconfluences. 2002 Géoconfluences ENS de Lyon. <https://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/foret>

Forêts préservées. <https://foretspreservees.com/presentation/le-projet/>

gflo.ch. <https://www.gflo.ch/fr/nature/environnement/ilot-de-senescence>

IGN (Institut national de l'information géographique et forestière). Quand le LIDAR dévoile les dessous de la forêt. <https://www.ign.fr/reperes/quand-le-lidar-devoile-les-dessous-de-la-foret>

Institut-viavoice. (2021). PARLONS FORÊT Perceptions des Français sur les forêts françaises.

<https://www.institut-viavoice.com/wp-content/uploads/Etude-Viavoice.-Parlons-Foret-ONF-Mars-2021.pdf>

Inventaire National du Patrimoine Naturel. (s. d.). INPN - Espaces protégés. MNHN.

<https://inpn.mnhn.fr/programme/espaces-protoges/protections-reglementaires>

Inventaire National du Patrimoine Naturel. (s. d.-b.). INPN - Listes des sites Natura 2000.

MNHN. <https://inpn.mnhn.fr/site/natura2000/listeSites>

Légifrance. Chapitre III : Parcs naturels régionaux (Articles L333-1 à L333-4).

https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000006074220/LEGISCTA000006159241/

Ministère de L'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire. La forêt française, des défis multiples à la croisée des enjeux environnementaux, économiques et sociétaux.

<https://agriculture.gouv.fr/la-foret-francaise-des-defis-multipl-es-la-croisee-des-enjeux-environnementaux-economiques-et>

Ministère de la Transition écologique et solidaire. Adaptation de la France au changement climatique.

<https://www.ecologie.gouv.fr/adaptation-france-au-changement-climatique>

Office National des Forêts. (2023, 22 septembre). Rapport du Giec 2019 : la gestion durable des forêts, un levier essentiel pour lutter contre le changement climatique.

<https://www.onf.fr/vivre-la-foret/raconte-moi-la-foret/comprendre-la-foret/foret-et-biodiversite/les-zones-humides/+480::2019-rapport-du-giec-quel-role-de-la-foret-face-au-rechauffement-climatique.html>

Office National des Forêts. (2024, 16 mai). Biodiversité : tout savoir sur les réserves biologiques.

<https://www.onf.fr/onf/+a3a::les-reserves-biologiques-des-espaces-protoges-dexception.html>

Office National des Forêts. Les forêts françaises sous monitoring. Vivre la Forêt.

<https://www.onf.fr/vivre-la-foret/+1bab::les-forets-francaises-sous-monitoring.html>

Observatoire des forêts françaises. (s. d.). <https://foret.ign.fr/themes/sante-des-forets>

Parc naturel régional des Pyrénées Ariégeoises. (2023, février). Etude de vulnérabilité des forêts du Parc Naturel Régional des Pyrénées Ariégeoises aux changements climatiques.

<https://www.parc-pyrenees-Ariégeoises.fr/wp-content/uploads/2023/02/Rapport-CCRN-VF-1.pdf>

Parc naturel régional des Pyrénées Ariégeoises. (2023, février). Contribution de la télédétection au diagnostic de la vulnérabilité des forêts du Parc naturel régional des Pyrénées Ariégeoises.

<https://www.parc-pyrenees-Ariégeoises.fr/wp-content/uploads/2023/02/rapport-etude-teledetectionPurpan.pdf>

PNR. (2023, 4 décembre). Le syndicat mixte : organisation, élus, équipe - PNR. <https://www.parc-pyrenees-Ariégeoises.fr/le-parc-quest-ce-que-cest/une-equipe-a-votre-service/le-syndicat-mixte-organisation-elus-equipe/>

Portail des parcs nationaux de France. (s. d.). Forêt. <https://www.parcsnationaux.fr/fr/des-connaissances/patrimoine-naturel/milieus-naturels/foret>

Trame verte et bleue. (s. d.). Définitions de la Trame verte et bleue. <https://www.Trameverteetbleue.fr/presentation-tvb/qu-est-ce-que-Trame-verte-bleue/definitions-Trame-verte-bleue?language%3Den=fr>

Trame verte et bleue. (s. d.). Forêt. <https://www.Trameverteetbleue.fr/entree-thematique/foret>

UICN. Solutions fondées sur la nature. <https://uicn.fr/solutions-fondees-sur-la-nature/>

Union européenne. Qu'est ce que Natura 2000 ?. <https://www.natura2000.fr/natura-2000/qu-est-ce-que-natura-2000>

Université Toulouse II. (2023, octobre 20). Paysans et paysages en Biros – MIROIR. <https://blogs.univ-tlse2.fr/miroir/1997/07/01/docu-paysans-et-paysages-en-biros/>

Table des matières

Remerciements	1
Sommaire	3
Liste des sigles et abréviations:	4
Introduction	5
I. Structure et territoire	7
A. Le PNR des Pyrénées Ariégeoises.....	7
1. La structure du PNR PA.....	8
2. Un territoire aux multiples enjeux environnementaux.....	9
3. Missions et problématique.....	11
B. Les forêts du PNR des pyrénées Ariégeoises.....	13
1. Des forêts marquées par un contexte socio-économique.....	14
2. Des forêts aux multiples usages.....	15
3. Des environnements forestiers spécifiques avec une biodiversité riche.....	16
4. La Trame forestière au sein de la Trame Verte et Bleue du PNR PA.....	17
5. Le projet Life intégré ARTISAN et l'apport du LiDAR.....	19
II. Cadrage théorique: Les forêts, des écosystèmes aux multiples enjeux	23
A. Les forêts au temps du réchauffement climatique.....	23
1. Quels impacts sur les milieux forestiers?.....	24
2. Des forêts résilientes?.....	25
3. Le rôle des forêts dans la crise climatique.....	26
B. Des milieux à préserver.....	27
1. Vers une libre évolution? D'une fermeture des milieux subie à une libre évolution planifiée et pérenne.....	27
2. Les Trames forestières fonctionnelles.....	29
3. Une diversité d'outils de protection.....	30
C. Les apports de la télédétection pour la connaissance des forêts.....	31
1. Un nouveau regard sur les forêts.....	32
2. Les forêts matures.....	32
3. Des cartes prédictives d'habitats d'espèces.....	34
D. Retours d'expériences.....	35
1. L'étude des forêts matures au PNR du Morvan.....	35
2. La Trame de vieux bois du PNR Livradois-Forez (PNR LF).....	36
3. Les PNR de l'arc alpin.....	39
III. Cadrage méthodologique: du travail de terrain de calibration LiDAR à la stratégie de mise en place d'une Trame forestière dans le PNR PA	42
A. Le travail de terrain.....	42
1. La préparation des travaux de terrain.....	42
2. Des mesures pour la calibration du LiDAR.....	43
3. Le déchargement des données récoltées.....	44
B. Stratégie pour une Trame forestière fonctionnelle.....	45
1. Mon approche pour la recherche bibliographique.....	45
2. Séminaire et rencontre sur la thématique des forêts.....	46

3. Les apports de la Trame Verte et Bleue.....	46
4. Entretiens et retours d'expériences.....	47
5. Mise en place de la stratégie.....	48
IV. Les résultats: des données de calibration LIDAR à la stratégie de mise en place d'une Trame forestière dans le PNR PA.....	51
A. Les données récoltées sur le terrain.....	51
B. Les outils à mobiliser pour identifier les zones prioritaires.....	52
1. Les indicateurs forestiers à identifier.....	52
2. Les fragmentations paysagères: l'apport de la TVB pour modéliser la connectivité..	58
3. Le tracé de la Trame forestière.....	61
C. Mise en place d'une Trame fonctionnelle.....	63
1. Quels modes de protections adaptés?.....	63
2. Pour une répartition homogène sur le territoire entre montagne et plaine.....	67
3. Recommendations.....	68
D. Perspectives.....	70
1. Valorisation du projet.....	70
2. Perspectives de collaboration.....	71
3. La mise en place d'un suivi de la Trame forestière.....	72
V. Discussions.....	73
A. Synthèse et interprétation global des résultats.....	73
B. Retour critique sur le travail produit.....	75
C. De potentielles limites au projet.....	77
D. Étapes restantes et piste de travail.....	78
Conclusion.....	80
Bibliographie.....	82
Table des matières.....	87
Liste des figures.....	89
Annexes.....	91
Résumé.....	95

Liste des figures

- **Figure 1:** Localisation géographique de Parc Naturel Régional des Pyrénées Ariégeoises, QGIS, Marie Sallebert (source BD TOPO IGN, Données du PNR PA) **p.5**
- **Figure 2:** L'organigramme de l'équipe (site internet du PNR PA- Une équipe à votre service) **p.8**
- **Figure 3:** Sites pilotes LiFE ARTISAN, réalisation: Olivier Debuf, OFB 2021, **p.9**
- **Figure 4:** Carte des aires protégées du PNR PA, réalisée par Marie Sallebert (BD TOPO 2023) **p. 10**
- **Figure 5:** Carte des aires en protection forte du PNR PA, réalisée par Marie Sallebert, 2024 (source: PICTO Occitanie, PNR PA, ANA CEN Ariège) **p.11**
- **Figure 6:** Schéma synthétique des réflexions à mener pour répondre à la commande du stage (réalisé par Marie Sallebert) **p.13**
- **Figure 7:** Carte des grands types de formations végétales du PNR PA, réalisée par Marie Sallebert (BD TOPO 2023) **p.14**
- **Figure 8:** Re-photographie de 1920 et de 1995 sur la commune d'Antras en Ariège (Source: Paysans et paysages en Biros – MIROIR. (2023, 20 octobre). <https://blogs.univ-tlse2.fr/miroir/1997/07/01/docu-paysans-et-paysages-en-biros/>) **p.15**
- **Figure 9:** Services écosystémiques rendus par les milieux forestiers, réalisé par Marie Sallebert (Dufrêne 2017 et Carnol 2010) **p.16**
- **Figure 10:** Schéma de l'étagement de la végétation en montagne, réalisé par Marie Sallebert (Source: notes de cours, 2023) **p.17**
- **Figure 11:** Carte de la modélisation de la Trame forestière du PNR PA, (Source: données PNR PA) **p.19**
- **Figure 12:** Fonctionnement du LIDAR, source: Formation Chef de Projet LiDAR aéroporté v 1.0 juin 2018. **p.20**
- **Figure 13:** Nuages de points LIDAR, source: Formation Chef de Projet LiDAR aéroporté v 1.0 juin 2018. **p.20**
- **Figure 14:** Photographie d'une fougèraie au milieu de milieux boisés dans le PNR PA, **p.22**
- **Figure 15:** Modélisation des scénarios climatiques du GIEC (source: GIEC 2021) **p.23**
- **Figure 16:** Types de dendro-microhabitats et leur localisation dans l'arbre (figure adaptée de Emberger et al.2013) **p.25**
- **Figure 17:** Schéma du cycle sylvigénétique, réalisé par Marie Sallebert (tiré de Rossi et Vallauri, 2013) **p.28**
- **Figure 18:** Tableau des composantes des Trames de vieux bois et leur fonctionnement (réalisé par Marie Sallebert, données de Cateau et al., 2013) **p.30**
- **Figure 19:** Tableau de différents modes de protection pertinents pour la protection des milieux forestiers et leurs fonctionnement (réalisé par Marie Sallebert, données INPN) **p.31**
- **Figure 20:** Formule de l'indice de maturité (Marc Fuhr) **p.33**
- **Figure 21:** Carte 1: carte présence/ absence d'observation de petite chouette de montagne, dans le Rhône Alpes. Carte 2: Extrapolation des niches écologiques de la petite chouette de montagne sur tout le territoire (Bilger, I., Paillet, Y., Laguet, S., Doutau, B., Bullifon, F., Chevalier, M., ... & Archaux, F. (2021). Modélisation de la

distribution des petites chouettes de montagne dans les Alpes du Nord françaises. *Naturae.*, 13, 167-181.) **p.34**

- **Figure 22:** Carte de localisation des PNR de l'Arc alpin, du Morvan, et du Livradois-Forez (réalisée par Marie Sallebert sur QGIS à partir des données INPN) **p.35**
- **Figure 23:** Schéma Trame de vieux bois au sein d'un massif forestier normalement exploité, d'après Trame forestière, forêts anciennes et peuplements matures par Anne Villemey et Benoît Renaux, CBNMC, 2017. PNRLF, **p. 38**
- **Figure 24:** Photographie d'un îlot de sénescence dans le PNR de Lorraine (prise par Marie Sallebert, le 24/04/2024) **p.40**
- **Figure 25:** Utilisation d'un compas forestier, photographie prise par Marie Sallebert, 2024, **p.42**
- **Figure 26:** Utilisation de Vertex pour mesurer la distance (photographie prise par Marie Sallebert, 2024) **p. 42**
- **Figure 27:** extrait de la fiche protocole d'identification des dendro microhabitats, **p.43**
- **Figure 28:** Photographie d'une placette de calibration LiDAR pendant la prise du point GPS (Marie Sallebert, le 30/04/2024 sur la commune de Rimont) **p.49**
- **Figure 29:** Photographie de dendromicrohabitat: flûte de pic (Marie Sallebert, le 26/06/2024) **p.51**
- **Figure 30:** Photographie d'un pin à crochet (Marie Sallebert, le 07/08/2024, cirque de Cagateille) **p.55**
- **Figure 31:** Schéma clé dichotomique pour identifier les indicateurs forestiers à prendre en compte (réalisé par Marie Sallebert) **p.56**
- **Figure 32:** Carte de la modélisation de la Trame forestière (carte réalisée par l'ANA CEN Ariège) **p.59**
- **Figure 33:** Carte de la modélisation de la TVB, les éléments de fragmentations (réalisée par l'ANA CEN Ariège) **p.59**
- **Figure 34:** Tableau des dispositifs pertinents pour favoriser une Trame forestière fonctionnelle sur le territoire du PNR PA (réalisée par Marie Sallebert) **p.64**
- **Figure 35:** Photographie d'une hêtraie (Marie Sallebert, le 29/05/2024, col de la Crouzette) **p.65**
- **Figure 36:** Schéma synthétique des résultats apportés à la commande du stage (réalisé par Marie Sallebert) **p.73**
- **Figure 37:** Photographie du cirque de cagateille (Marie Sallebert, le 07/08/2024) **p.80**

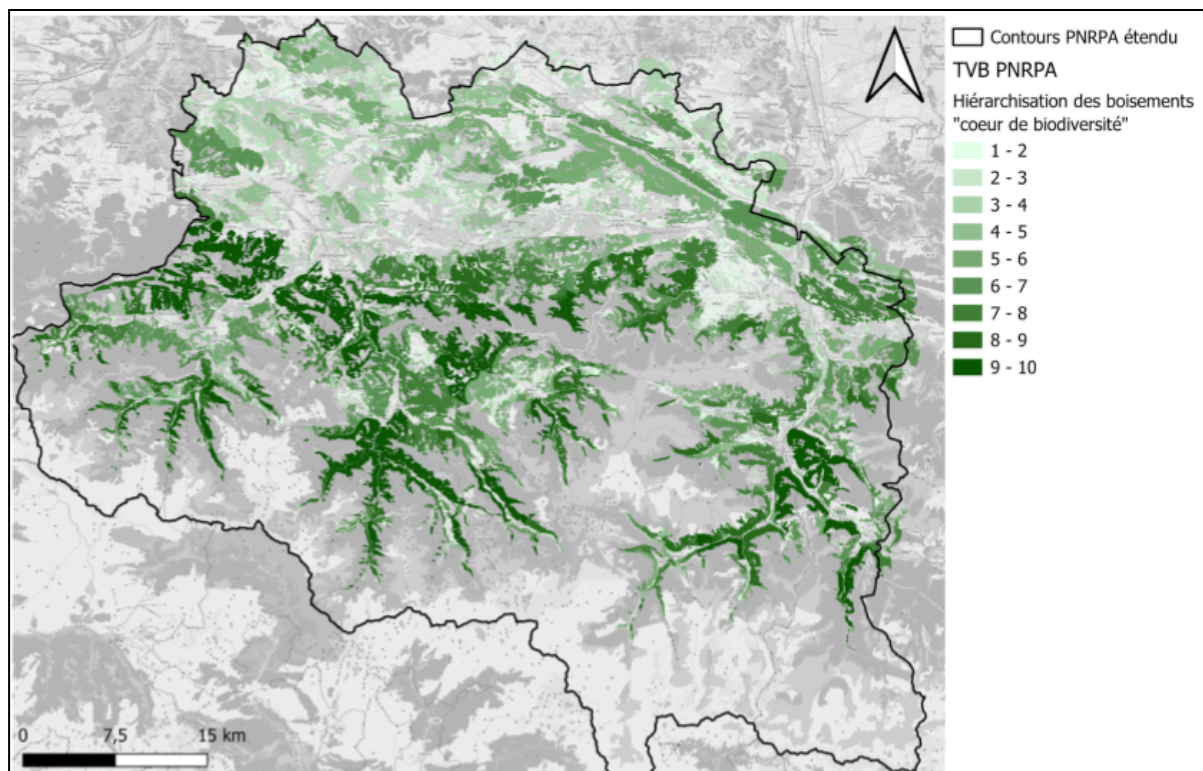
Annexes

Je réalise cet échange dans le cadre de mon stage au PNR PA, mon sujet étant de réfléchir à une stratégie de mise en place d'une Trame forestière fonctionnelle sur le territoire, en mettant à contribution les données produites par le LiDAR. L'objectif est de bénéficier de votre retour d'expérience sur le sujet afin d'en tirer des enseignements pertinents pour ce travail.

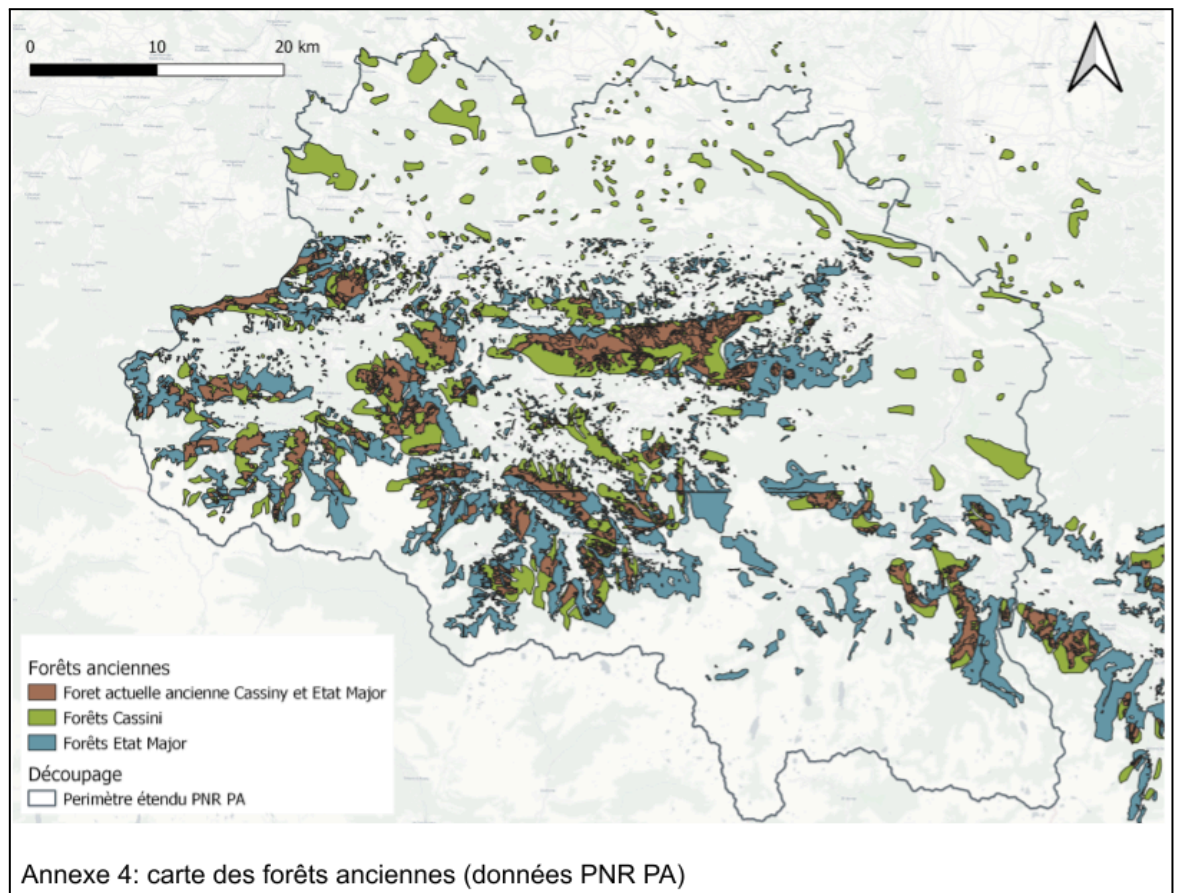
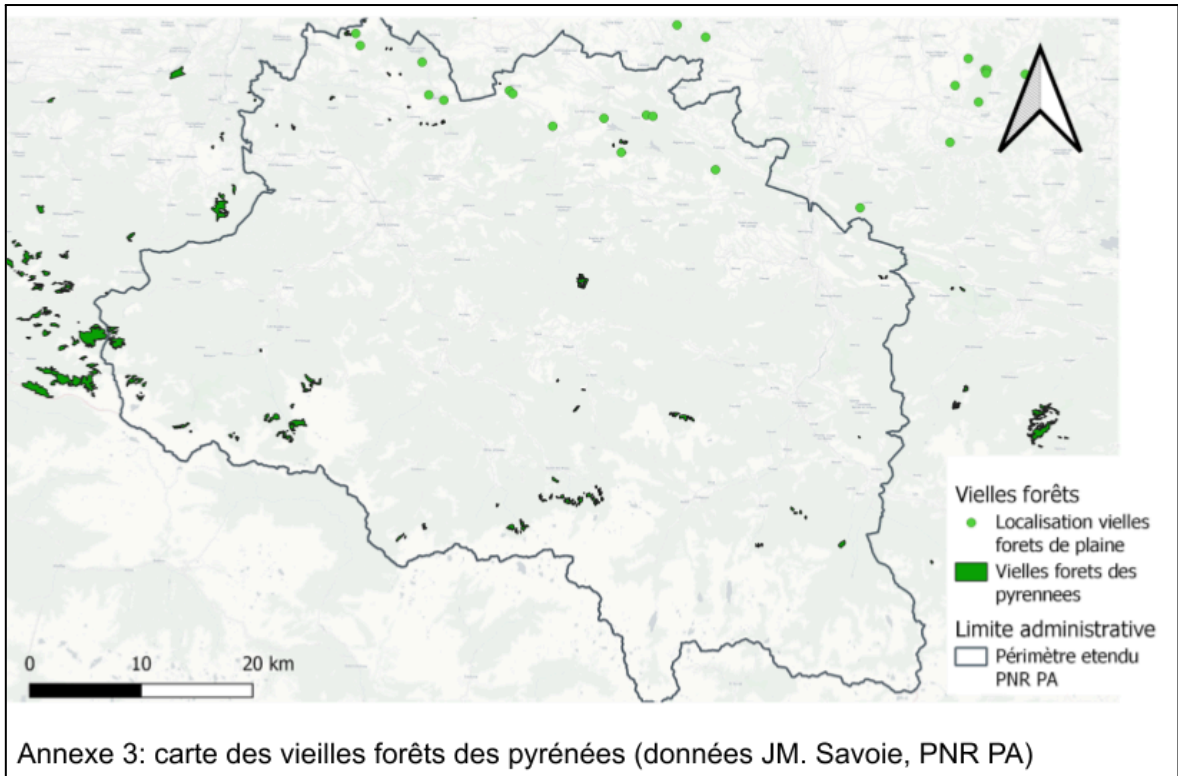
Thématiques	Questions
Présentation/ contexte	<ul style="list-style-type: none"> ● Pouvez-vous me présenter votre poste au sein du PNR ? Et votre implication dans la mise en place de Trame de vieux bois ? ● Quels sont les enjeux forestiers spécifiques dans votre territoire ? ● Pouvez-vous me décrire l'historique de la mise en place de la Trame ? ● Quels étaient les principaux objectifs pour la mise en place de la Trame de vieux bois ?
Organisation et fonctionnement du projet	<ul style="list-style-type: none"> ● Quels sont les acteurs impliqués dans le projet ? ● Quels financements sont mobilisés pour ce projet ? ● Quelles actions spécifiques le PNR a dû mettre en place ?
La contribution du LiDAR	<ul style="list-style-type: none"> ● Avez-vous mobilisé la modélisation LiDAR dans la mise en place de votre Trame ? <p>Si oui:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ <i>Comment vous a-t-elle été utile ? (IMAT? Autres?)</i> ○ <i>Avez-vous réalisé des travaux complémentaires pour contrôler les données produites par le LiDAR ?</i> ○ <i>Y a-t-il une bonne fiabilité des données ?</i> <p>Si non:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ <i>Qu'est ce qui vous a permis d'identifier vos zones forestières à fort enjeux écologiques ? (Corridors et réservoirs)</i>
Critères de sélection	<ul style="list-style-type: none"> ● Quels ont été les indicateurs que vous avez retenus pour identifier le tracé de la Trame ? <ul style="list-style-type: none"> ○ Avez-vous pris en compte des facteurs tels que le relief ? la nature des propriétés ? La fragmentation du foncier ? ● Comment les avez-vous priorisés ?
Fonctionnalité de la Trame forestière	<ul style="list-style-type: none"> ● Avez-vous réussi à avoir un bon maillage de cœur de biodiversité et de corridors sur le territoire ? ● Avez-vous mis en place des contrats de protection pour pérenniser la Trame ? (ORE? Autres?) ● Êtes-vous parvenu à mettre en place des zones de libre évolution ? Comment ? (Nouvelle réserve biologique ? Autre ?)

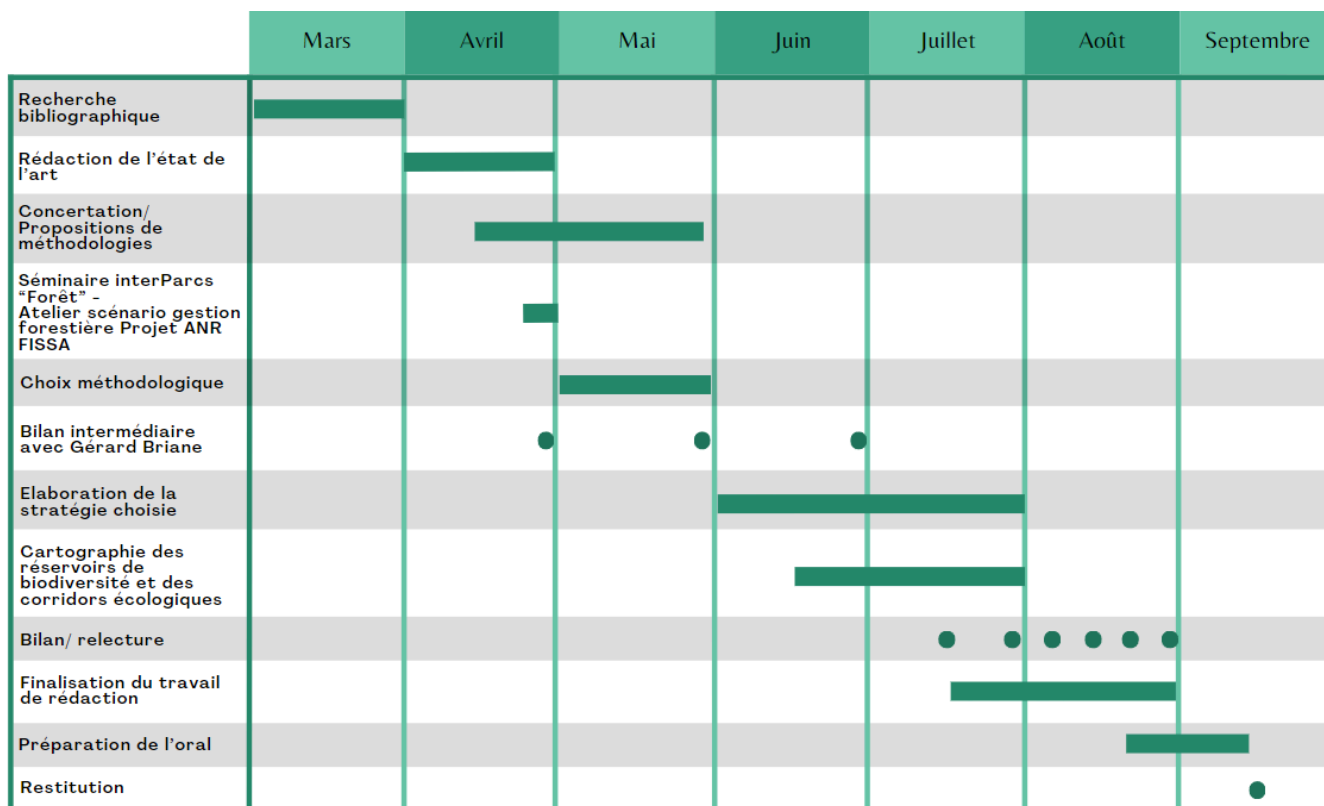
Gestion forestière	<ul style="list-style-type: none"> ● Ce projet a-t-il mené à des évolutions de pratiques sylvicoles ? <ul style="list-style-type: none"> ○ Si oui, lesquelles et comment? ○ Si non, pourquoi ? Quels ont été les obstacles ?
Valorisation	<ul style="list-style-type: none"> ● Comment valorisez-vous cette Trame de vieux bois ? Auprès des communes ? Des forestiers ? Propriétaires ? etc. ● Avec quels types d'acteurs échangez vous sur ce projet ? Et qui y ont contribué ?
Retour d'expérience	<ul style="list-style-type: none"> ● Quels sont les principaux enseignements que vous avez tirés de la mise en place et du fonctionnement de votre Trame fonctionnelle ? ● Quels obstacles majeurs avez-vous rencontrés et comment les avez-vous surmontés ?
Perspectives	<ul style="list-style-type: none"> ● Envisagez-vous de réaliser des suivis de la fonctionnalité de ces Trames? Comment ? (Protocole, fréquence,...) ● Quelles améliorations envisagez-vous pour votre Trame dans le futur ? ● Quelles sont les perspectives d'évolution de votre Trame à

Annexe 1: Grille d'entretien réalisée auprès d'agents de différents PNR pour le retour d'expérience de la mise en place de Trame forestière et de mobilisation des données LiDAR



Annexe 2: Hiérarchisation des boisements coeur de biodiversité, données du PNR PA





Annexe 5: Diagramme de Gantt de l'organisation prévue en début de stage

Résumé

Dans le cadre de ma deuxième année de Master GAED (Géographie, Aménagement, Environnement et Développement), parcours GEMO (Gestion et évaluation des Environnements MONTagnards), j'ai effectué un stage au Parc Naturel Régional des Pyrénées Ariégeoises (PNR PA) sur la thématique des forêts. L'objectif était de poursuivre la calibration du LiDAR sur le terrain commencée en 2023 et de développer une stratégie pour une Trame forestière fonctionnelle, visant à protéger et optimiser les connexions entre les milieux forestiers d'intérêt écologique.

Les forêts, particulièrement en milieu montagnard, sont menacées par le changement climatique. Leur adaptation est cruciale pour assurer leur résilience. Mon stage a constitué une première étape pour établir cette Trame, en élaborant une méthodologie pour identifier les secteurs à enjeux écologiques, proposer des outils de protection et collaborer avec des partenaires. Afin de réaliser ce travail, j'ai effectué des recherches, échangé avec des agents externes sur leur retour d'expérience, participé à des ateliers, et utilisé la modélisation de la Trame Verte et Bleue (TVB) du PNR PA.

La mise en place de cette Trame repose sur des données existantes, notamment sur les vieilles forêts, les forêts anciennes, et les «cœurs de biodiversité» du projet TVB. La prochaine étape impliquera un travail cartographique pour intégrer ces données et procéder à une analyse spatiale. La modélisation LiDAR, produite a posteriori de ce rapport, fournira des informations complémentaires, comme l'indice de maturité (IMAT) des forêts, pour identifier de nouveaux secteurs à enjeux écologiques, après un traitement et une analyse de ces données.

Des outils de protection adaptés, tels que les Obligations Réelles Environnementales (ORE) et les Réserves Biologiques Intégrales, seront nécessaires pour la mise en œuvre de cette Trame forestière. Pour maximiser ses bénéfices, il faudra intégrer les enjeux de connectivité et adapter les paramètres en fonction des contraintes, qu'elles soient géographiques, entre montagne et plaine, ou liées au statut des forêts, privées ou publiques.

Mots-clés: Trame forestière, LiDAR, protection de l'environnement, écosystèmes forestiers, continuités écologiques

Abstract

As part of my second year of the GAED Master's program (Geography, Planning, Environment, and Development), specializing in GEMO (Management and Evaluation of Mountain Environments), I completed an internship at the Parc Naturel Régional des Pyrénées Ariégeoises (PNR PA) focusing on forest-related topics. The objective was to continue the field calibration of LiDAR started in 2023 and to develop a strategy for a functional forest network aimed at protecting and optimizing connections between forest areas of ecological interest.

Forests, particularly in mountainous areas, are threatened by climate change. Their adaptation is crucial to ensure resilience. My internship was a first step in establishing this network by developing a methodology to identify ecologically sensitive areas, propose protection tools, and collaborate with partners. To achieve this, I conducted research, engaged with external experts to gather feedback, participated in workshops, and utilized the Green and Blue Infrastructure (TVB) modeling of the PNR PA.

The implementation of this network relies on existing data, particularly on old-growth forests, ancient forests, and the «biodiversity cores» from the TVB project. The next step will involve cartographic work to do spatial analysis. LiDAR modeling, produced after this report, will provide additional information, such as the forest maturity index (IMAT), to identify new ecologically sensitive areas, following data processing and analysis.

Appropriate protection tools, such as Environmental Real Obligations (ORE) and Integral Biological Reserves, will be necessary for the implementation of this forest network. To maximize its benefits, it will be essential to incorporate connectivity issues and adapt parameters according to constraints, whether geographical, such as between mountains and plains, or related to the status of forests, whether private or public.

Keywords: Forest network, LiDAR, environmental protection, forest ecosystems, ecological connectivity