

**Mémoire de stage**

MASTER 2

**Mention GAED**

(Géographie, Aménagement, Environnement, Développement)

**Parcours GEOIDES**

(Géographie, Information, Interface, Durabilité, EnvironnementS)

## **Les forêts de Belledonne face au changement climatique**

Mémoire présenté et soutenu le 9 septembre 2025

Par : Omar Daniel KEIJZER

Sous la direction de :

Jean Louis REBUFFET, vice-président du groupement des sylviculteurs de Belledonne

Devant le jury composé de :

Monsieur Franck GIAZZI Enseignant-Chercheur (IUGA) enseignant référent

Monsieur Simon MEYNIER, Enseignant-Chercheur (IUGA), examinateur

## Remerciements :

Je tiens à remercier dans un premier temps mon encadrant de stage, Jean-Louis Rebuffet, pour son accompagnement tout au long de ce mémoire, qui m'a introduit et initié au monde de la foresterie et m'a permis d'accéder à de nombreux contacts précieux.

Je remercie Christophe Chauvin ainsi que tous les chercheurs, techniciens et ingénieurs rencontrés durant ce stage. Leurs échanges, leur expertise et leurs expériences de terrain ont largement nourri ma réflexion et donné de la profondeur à cette étude.

Je remercie aussi Franck Giazzi pour ses suggestions et ses conseils lors du suivi de mon étude.

Je suis reconnaissant envers la Communauté de communes du Grésivaudan et Marion Chaumontet, ainsi qu'à tous ses membres, qui m'ont accueilli au sein de leur bureau deux jours par semaine durant ma période de stage, pour leur accueil et leur bienveillance.

Un grand merci au Groupement des sylviculteurs de Belledonne de m'avoir accueilli en tant que stagiaire.

## Table des matières

Remerciements :.....	2
Sigles et acronymes :.....	4
Introduction.....	5
II. Méthodologie.....	8
II.1 Approche cartographique.....	8
II.1.a Données mobilisées .....	8
II.1.b cartographie historique et occupation du sol .....	10
II.1.c cartographie du dépérissement .....	11
II.2 Approche qualitative.....	11
III. Résultats.....	13
3.1. Évolution historique des forêts de Belledonne (XVIIIe – XXIe siècle)...	13
3.2. État actuel de la forêt de Belledonne .....	20
3.3. Perceptions et pratiques d’adaptation sylvicole .....	24
IV. Discussion.....	27
4.2. Vers une sylviculture adaptative.....	27
4.3. Gouvernance forestière.....	29
Conclusion .....	30
Références bibliographiques : .....	33
Table des figures .....	35
Table des tableaux.....	36
Table des photographies.....	36
Annexes .....	36

## Sigles et acronymes :

**GIEC** : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

**NDVI** : Normalized Difference Vegetation Index (Indice de végétation par différence normalisée)

**MNT** : Modèle Numérique de Terrain

**ONF** : Office National des Forêts

**CNPF** : Centre National de la Propriété Forestière

**DDT** : Direction Départementale des Territoires

**Sylv'ACCTES** : Sylviculture Adaptée au Changement Climatique, Territoires, Entreprises et Société

**BD ALTI®** : Base de données altimétriques de l'IGN

**BD Forêt® v2.0** : Base de données de la couverture forestière de l'IGN

**BRGM** : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

**COSIA** : Couches d'Occupation des Sols par Interprétation Automatisée

**ETP** : Évapotranspiration Potentielle

**FFN** : Fonds Forestier National

**FORDEAD** : Forest Dieback Detection (outil de détection de dépérissement par télédétection)

**IGN** : Institut national de l'information géographique et forestière

**SD** : Écart-type (Standard Deviation)

**ZNIEFF** : Zone Naturelle d'Intérêt Écologique, Faunistique et Floristique

**DSF** : Département Santé des Forêts (service du ministère de l'Agriculture chargé du suivi sanitaire des forêts en France).

## Introduction

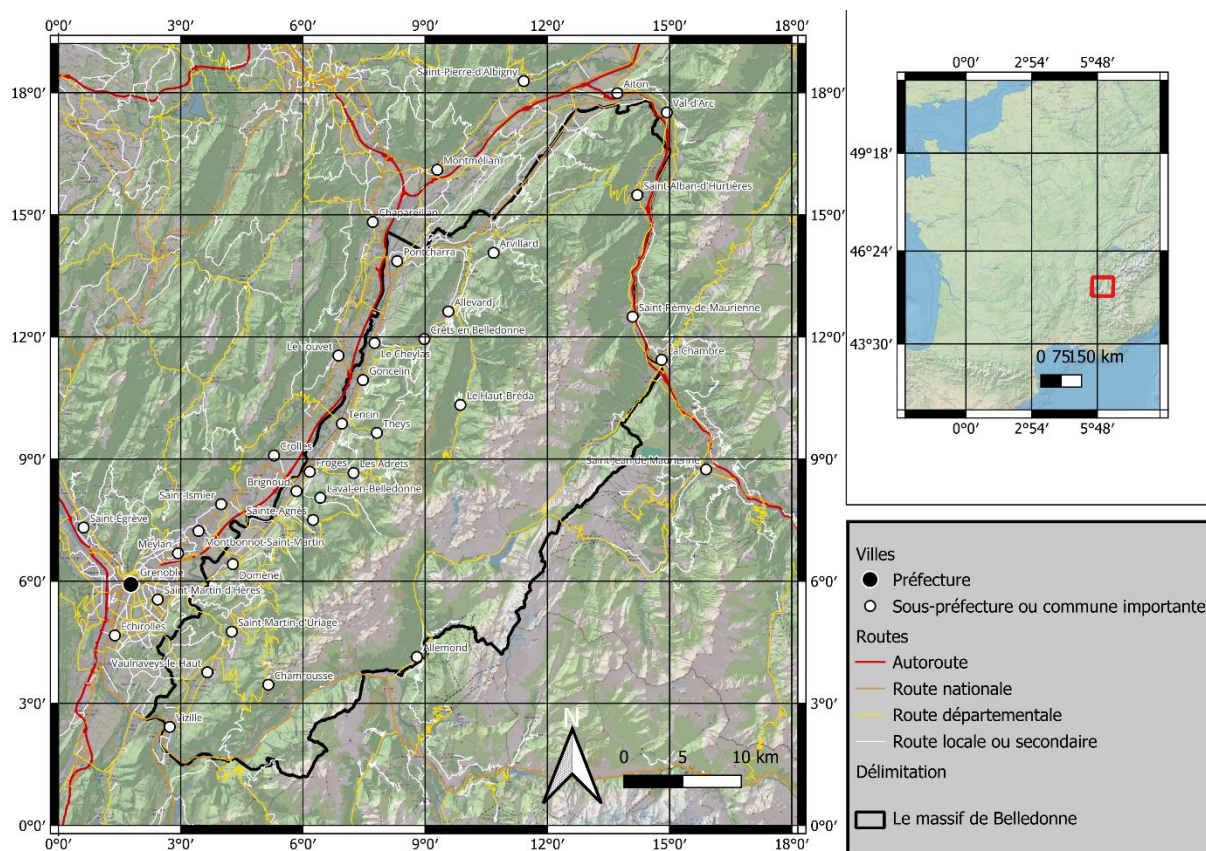
Le changement climatique perturbe profondément les forêts de montagne : selon le GIEC (AR6, 2023), la température globale a déjà augmenté d'environ +1,1 °C entre 2011 et 2020 par rapport à 1850–1900 ; au sein des Alpes européennes, la température moyenne a augmenté d'environ +2 °C depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, soit près du double du réchauffement global (Auer et al., 2007). Ce réchauffement s'exprime par une modification notable du cycle hydrologique dans les Alpes et résulte en une intensification de l'évapotranspiration dans plusieurs secteurs des Alpes, notamment sur les versants sud-ouest (Castelli, 2021). Les forêts sont particulièrement touchées, affaiblies par des épisodes de sécheresse et des vagues de chaleur de plus en plus fréquentes, entraînant un stress hydrique. Les peuplements forestiers affaiblis sont plus vulnérables face aux insectes ravageurs, aux incendies de forêt et aux tempêtes (Senf et al., 2020). Les pessières apparaissent comme les forêts les plus vulnérables, notamment l'épicéa (*Picea abies*), qui connaît une mortalité en hausse ces dernières années (Saintonge et al., 2021). En effet, les canicules successives de 2018 à 2020 ont entraîné des dépérissements massifs d'épicéas dans de nombreux pays européens (Saintonge et al., 2021). Ces dépérissements d'épicéas sont majoritairement à l'origine d'un petit coléoptère : le scolyte typographe, colonisant les épicéas affaiblis et malades (Jakoby et al., 2019). Le scolyte typographe profite du réchauffement climatique : l'élévation des températures stimule sa croissance, ce qui entraîne la naissance de nouvelles générations chaque année, surtout à basse altitude (Jakoby et al., 2019).

Les forêts touchées sont majoritairement issues de monocultures d'épicéas, particulièrement affaiblies face au changement climatique (Saintonge et al., 2021). Pour faire face à ce dépérissement massif, les méthodes de gestion forestière doivent s'adapter afin de garantir la pérennité des forêts et assurer leur rôle de production. Les méthodes traditionnelles de gestion forestière, basées sur des forêts homogènes et des rotations fixes, ne conviennent plus à la situation actuelle. Selon Pretzsch et al. (2017), les forêts mixtes d'épicéa, de sapin et de hêtre en montagne présentent une productivité et une stabilité plus élevées que les monocultures, ce qui augmente leur capacité à résister aux insectes nuisibles, au stress hydrique et aux changements climatiques. Face aux enjeux climatiques, des pratiques de gestion en couvert continu ont vu le jour : elles allient la conservation de la productivité, la diversité structurale et la sauvegarde écologique de la forêt (O'Hara, 2016).

Cette étude s'inscrit dans cette nouvelle crise en se focalisant sur un exemple concret au cœur de ce phénomène : les forêts du massif de Belledonne, touchées par des dépérissements importants. Une grande partie des pessières de Belledonne est issue de cultures monospécifiques équiennes. À l'instar d'autres forêts françaises, elles résultent de politiques sylvicoles productivistes, souvent liées aux plantations mises en œuvre lors des programmes de reboisement du Fonds forestier national d'après-guerre (Saintonge et al., 2021). Ces constats soulèvent une interrogation majeure au cœur de ce travail : comment l'histoire forestière du massif de Belledonne éclaire-t-elle les vulnérabilités actuelles face aux dépérissements liés aux

changements climatiques, et quelles pratiques sylvicoles adaptées pourraient permettre une gestion résiliente des forêts dans ce territoire montagnard ?

Situé dans les Alpes françaises du Nord, le massif de Belledonne se trouve majoritairement en Isère, avec une partie de son versant nord-ouest en Savoie (Figure 1).



(Figure 1 : Carte de localisation du massif de Belledonne)

Ce massif de moyenne et haute montagne culmine à 2 977 m et s'étire sur environ 80 km. Belledonne présente un versant occidental abrupt dominant la vallée du Grésivaudan (Grenoble et Chambéry) et un versant oriental surplombant la Maurienne et l'Oisans. Entre 800 m et 1 800 m d'altitude, s'étend un vaste étage forestier d'environ 71 500 hectares qui occupe aujourd'hui 56 % du territoire. Le massif présente une grande variété de conditions climatiques locales avec des influences océaniques, continentales ainsi que des tendances méditerranéennes dans le sud du massif (CNPF, 2008). Concernant la géologie du massif, Belledonne est un socle cristallin des Alpes, sa structure lithologique et tectonique résulte d'une juxtaposition de domaines orogéniques distincts gneiss, migmatites et granitoïdes (Ménot, 1988).

Il s'agit pour l'essentiel d'une forêt de montagne mixte à base de hêtraie-sapinière (*Fagus sylvatica* et *Abies alba*) et de pessières d'épicéa (*Picea abies*). Au-dessus de 1 600 m, on retrouve des peuplements de résineux constitués essentiellement d'épicéas et également de sapins, mais en proportion moindre. Entre 900 m et 1 600 m, les peuplements sont composés de mélanges de feuillus et résineux, en futaies d'origines naturelles ou artificielles. Les

peuplements de feuillus comprennent des essences diverses : hêtre, érable, frêne, merisier, sorbier, noisetier, bouleau et châtaignier. En dessous de 900 m, les versants sont surtout occupés par des feuillus, notamment le châtaignier, le frêne, l'érable, le tremble et le charme. L'épicéa commun figure parmi les espèces dominantes en Belledonne, occupant une large part de l'étage montagnard supérieur et subalpin, souvent sur versants ubacs ou sur sols frais. Apprécié pour sa croissance rapide et la qualité de son bois, il constitue une ressource économique stratégique pour la filière locale.

La forêt de Belledonne abrite en effet une filière bois dynamique : près de 200 000 mètres cubes de bois sont récoltés chaque année, approvisionnant quelque 400 entreprises de première et seconde transformation et générant environ 1 800 emplois directs sur le territoire (Espace Belledonne, s.d.). Outre la production de bois d'œuvre, la diversité des conditions climatiques, topographiques et d'exposition favorise une biodiversité remarquable à différentes échelles. L'ensemble de la forêt est classé en ZNIEFF (Zone Naturelle d'Intérêt Écologique, Faunistique et Floristique), et le massif abrite de nombreux milieux remarquables (zones humides, cembraies, tourbières acides) (Espace Belledonne, s.d.). Les peuplements forestiers de Belledonne jouent également un rôle de protection naturelle contre les risques d'avalanche, les chutes de blocs et l'érosion des versants (ONF, 2022).

Cette étude s'est déroulée au sein du Groupement des Sylviculteurs de Belledonne (GSB), une association regroupant des propriétaires forestiers privés dans le massif. Implanté aux Adrets en Isère, le GSB accompagne les propriétaires dans leurs démarches forestières (organisation de travaux, valorisation du bois, facilitation de la commercialisation) et représente l'intérêt collectif des adhérents.

L'objectif de l'étude est, dans un premier temps, de comprendre pourquoi la crise du dépérissement forestier s'est aggravée récemment. Pour ce faire, nous ferons d'abord une reconstitution diachronique du couvert forestier depuis trois siècles pour expliquer la structure actuelle des peuplements et l'influence des activités humaines. Cette étape s'appuiera sur des outils cartographiques historiques : la carte de Cassini, la carte d'État-Major, ainsi que des photographies aériennes anciennes. Ensuite, une analyse comparée entre la forêt actuelle et son état il y a dix ans, période précédant le déclin massif observé récemment, sera menée. Les images satellitaires Sentinel-2 permettront de cartographier les anomalies de végétation en utilisant l'indice NDVI sur une période de six ans, méthode largement utilisée pour détecter des signes de dépérissement foliaire ou des changements dans la santé forestière (Buras et al., 2021).

Dans un second temps, l'étude visera à identifier les moyens d'action envisageables face à cette crise en cours. Nous consulterons les acteurs locaux du territoire (agents de la chambre d'agriculture et du CNPF, représentants de la DDT, chercheurs) à travers des entretiens semi-directifs dans une démarche exploratoire. Ces retours de terrain permettront de comprendre les perceptions des acteurs locaux et d'explorer des pistes de gestion sylvicole adaptées aux enjeux majeurs : diversification des essences, pratiques à couvert continu, régénération naturelle ou alternatives mixtes plus résilientes.



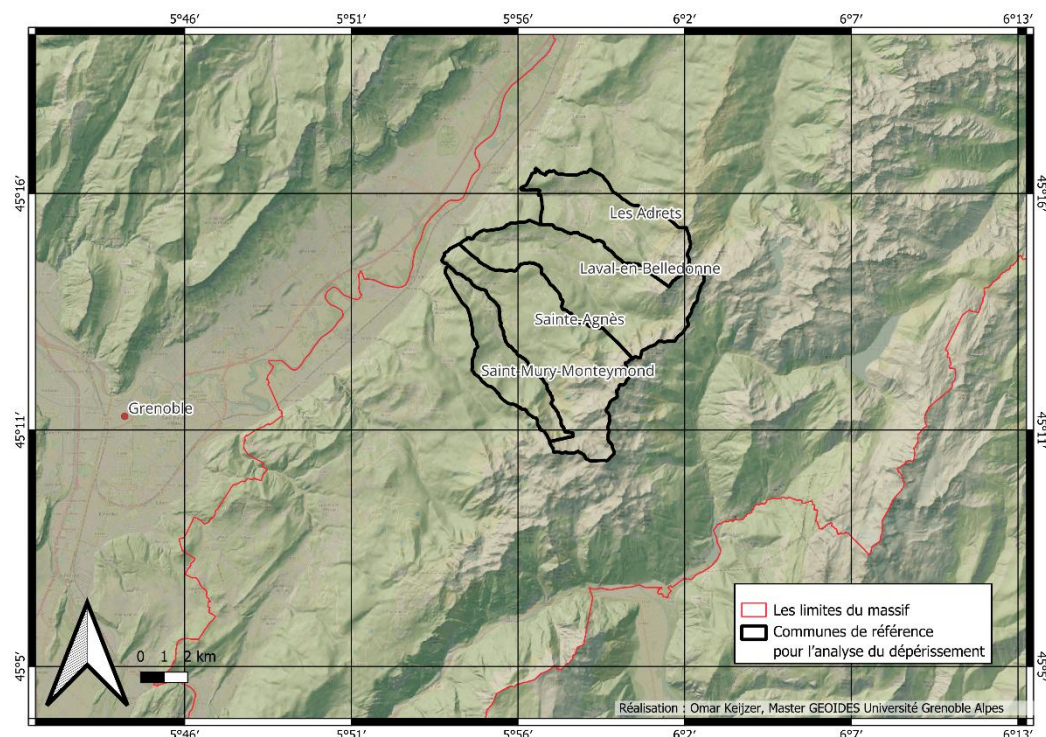
## II. Méthodologie

### II.1 Approche cartographique

#### II.1.a Données mobilisées

Pour pouvoir quantifier la crise forestière à l'échelle locale, nous adopterons une approche cartographique. À l'exception de la carte de localisation générale du massif, l'ensemble des productions cartographiques de cette étude se concentre sur quatre communes situées sur le versant ouest de Belledonne : Les Adrets, Laval-en-Belledonne, Sainte-Agnès et Saint-Mury-Monteymond

(figure2). Ces communes ont été choisies en raison de la forte intensité des dépérissements observés dans ces secteurs, visibles à travers la cartographie et les observations de terrain, plusieurs parcelles ayant été visitées dans ces communes.



(Figure 2 : Localisation des quatre communes cibles de l'étude (Sainte-Agnès, Saint-Mury-Monteymond, Laval-en-Belledonne et Les Adrets))

#### Cartes anciennes et photographies aériennes

Pour l'analyse diachronique des dynamiques forestières, plusieurs cartes anciennes ont été utilisées, accessibles via la plateforme IGN Géoportail. Trois sources principales ont été mobilisées :

- La carte de Cassini, datant du XVIII<sup>e</sup> siècle, est le premier levé cartographique topographique de la France.



- La carte d'État-Major, datant du XIX<sup>e</sup> siècle, réalisée entre 1825 et 1866 ; c'est le successeur de la carte de Cassini.
- Les photographies aériennes de 1950, issues des premières campagnes d'acquisition systématique menées par l'Institut géographique national entre 1947 et 1965.

La comparaison visuelle des cartes historiques permettra d'identifier la progression ou la régression du couvert boisé sur les quatre communes ciblées depuis le XVIII<sup>e</sup> siècle.

## **Données vectorielles**

Les données vectorielles correspondent à des couches géoréférencées constituées de polygones, de lignes ou de points. Dans ce travail, elles permettent notamment de représenter la couverture forestière, le dépérissement et la géologie du massif étudié. Les données forestières sont utilisées pour produire les cartes d'occupation du sol. Elles se présentent sous la forme de couches vecteur contenant des informations sur les essences (feuillus, conifères, mixtes) et sur le type de peuplement (forêt fermée/ouverte). Deux bases de données vectorielles ont été mobilisées pour cartographier l'occupation forestière actuelle : COSIA et BD Forêt® version 2.0.

Les données COSIA (Couches d'Occupation des Sols par Interprétation Automatisée) sont une base de données vectorielles de la couverture du sol obtenue par une méthode basée sur l'analyse des images satellites. Ce modèle prédit la couverture du sol grâce à des processus d'intelligence artificielle : un modèle numérique attribue alors statistiquement une classe à chaque pixel (IGN). Elle permet de fournir une cartographie large de la couverture forestière avec une précision adaptée à l'échelle régionale, mais peut être approximative dans les détails.

La BD Forêt® version 2.0 est une base de données vectorielles de la couverture forestière réalisée à partir de données de terrain et de données statistiques. Elle attribue une classe aux différentes formations végétales forestières et naturelles et permet de distinguer les types de peuplements purs et mixtes. Ces données offrent une analyse précise de la composition forestière et des essences présentes.

Les dernières données vectorielles utilisées sont des données géologiques issues du BRGM, téléchargées afin de produire une carte géologique de la zone d'étude et étudier une éventuelle corrélation entre géologie et dépérissement.

## **Imageries satellitaires et données raster**

Pour identifier les zones de dépérissement forestier, nous utiliserons la télédétection à partir de l'imagerie satellitaire Sentinel-2. Des images couvrant l'ensemble du massif de Belledonne ont été téléchargées pour les années 2017 à 2023 via la plateforme Copernicus SciHub, au format L2A (niveau de traitement incluant la correction atmosphérique). L'imagerie satellitaire utilisée est exploitée sous forme de données raster, c'est-à-dire des grilles régulières de pixels où chaque cellule porte une valeur numérique, ce qui permet de représenter des phénomènes continus dans l'espace.

Ces images nous permettent de calculer l'indice de végétation NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) pour évaluer la végétation terrestre. Cet indice mesure la réflectance dans les

bandes spectrales du rouge (RED) et de l'infrarouge proche (NIR), selon la formule suivante :  $NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$ . La NDVI varie entre -1 et 1, -1 représentant des espaces non végétalisés, des valeurs proches de 0 représentent des sols nus ou une végétation éparse, et les valeurs proches de 1 représentent une végétation dense, plus les valeurs sont élevées plus les végétations ont une activité photosynthétique élevée.

Cet indice est utile pour analyser l'évolution de la couverture forestière et ainsi voir où la forêt se dégrade et où elle se régénère à la suite d'efforts de reboisement. En comparant les données NDVI de chaque année, il sera possible de repérer des anomalies dans la couverture forestière sur une période donnée.

Des données forestières de dépérissement existent à l'échelle européenne : les données Hansen, ou Hansen Global Forest Change, sont un jeu de données mondial produit par l'Université du Maryland (UMD) sous la direction de Matthew Hansen, en collaboration avec Google et l'USGS (Hansen *et al.*, 2013). Ces données présentent les zones où il y a des pertes forestières chaque année entre 2001 et 2024. Une cartographie utilisant ces données est réalisée ; il est alors pertinent de comparer ces données avec les cartes produites à partir de l'imagerie satellitaire.

Finalement, nous avons utilisé un Modèle Numérique de Terrain (MNT) issu de la BD ALTI® (IGN, résolution 25 m) pour produire des cartes d'altitude et d'exposition des versants. Ces cartes seront également comparées aux autres cartes produites pour trouver d'éventuels liens avec le dépérissement.

## II.1.b cartographie historique et occupation du sol

Pour obtenir la cartographie historique et la cartographie de l'occupation, les données sont d'abord téléchargées. Les cartes historiques sont téléchargées à travers des services WMTS du Géoportail. L'occupation du sol COSIA et BD Forêt® v2.0 est téléchargée sur le site de l'IGN pour le département de l'Isère. Les données Hansen sont téléchargées à partir du site dédié et la couche géologique est téléchargée sur le site du BRGM. Les données sont découpées en fonction de la zone d'étude (les 4 communes ciblées).

Pour l'occupation du sol, une symbologie appropriée est appliquée pour pouvoir différencier les types de formations végétales ou géologiques pour chaque jeu de données. À partir des données forestières, des indicateurs de l'occupation du sol ont été produits. Les surfaces occupées par chaque type de formation végétale ont été calculées en mètres carrés dans QGIS, puis exportées vers R. Les valeurs agrégées ont été rapportées à la surface forestière totale afin de produire des diagrammes circulaires exprimant la répartition relative des essences et types de peuplements.

Le MNT a été exploité pour générer deux cartes topographiques : la répartition altitudinale de la zone d'étude par classes de paliers et l'exposition des versants, calculée grâce aux outils raster de QGIS.

## II.1.c cartographie du dépérissement

Pour cartographier les dépérissements, l'objectif était dans un premier temps d'utiliser le modèle FORDEAD, qui est une méthode développée par l'INRAE. Ce modèle, développé en 2021, permet de détecter les anomalies de végétation à partir des images satellites. Développé en contexte de crise, son objectif est de pouvoir détecter les dépérissements de scolytes le plus rapidement possible (ONF, 2023). Cet outil s'appuie sur une série temporelle d'images satellites pour modéliser la saisonnalité du NDVI.

De multiples tentatives ont été effectuées pour travailler avec FORDEAD, malheureusement des erreurs associées aux paramètres du script et diverses configurations de fichiers ont rendu l'exécution impossible. Après avoir renoncé à FORDEAD, nous nous sommes appuyés sur le principe de FORDEAD et nous avons réorienté notre méthode vers une construction manuelle de la série NDVI à l'aide de RStudio. Les images Sentinel-2 que nous avons déjà prétraitées, découpées sur la zone d'étude et réduites aux bandes nécessaires, utiles dans un premier temps pour le traitement FORDEAD, ont été importées dans R, où nous avons calculé le NDVI pour chaque année. Grâce à R, deux rasters ont été générés en calculant la moyenne interannuelle du NDVI (mean) et l'écart-type interannuel du NDVI (sd). Ces calculs ont permis de créer deux rasters synthétiques qui ont pu être visualisés et qui servent de référence pour détecter les anomalies.

Pour détecter une anomalie potentielle en 2023, choisie comme année représentative du dépérissement, nous avons calculé un raster d'anomalie NDVI en soustrayant le raster du NDVI 2023 de celui de la moyenne NDVI entre 2017 et 2023. Cela permet de mettre en évidence les pixels où le NDVI, donc la vigueur de la végétation en 2023, est significativement inférieur à la normale. Une classification en cinq classes a été appliquée (forte diminution, diminution modérée, stabilité, légère augmentation et forte augmentation), afin de produire une carte thématique qui permet de repérer visuellement les taches de dépérissement.

Afin de réduire les biais liés à l'altitude ou à la présence de zones non boisées, nous avons filtré notre zone d'étude en nous focalisant uniquement sur les zones forestières, en utilisant la base de données forestières BD Forêt®. Les formations non ligneuses (landes, pelouses) ont été exclues pour éviter les faux positifs. En parallèle, une carte du NDVI moyen et une carte de l'écart-type interannuel ont été produites pour interpréter les zones à forte variabilité ou à végétation structurellement faible. Ces couches fournissent un référentiel de base pour relativiser les anomalies observées et affiner la lecture spatiale du dépérissement.

La carte d'anomalie pourra être croisée avec les autres cartes produites (exposition des versants, altitude) et superposée avec les formations végétales (couche BD Forêt®) pour mettre en évidence la sensibilité des essences et des types de formations végétales face au dépérissement.

## II.2 Approche qualitative

Pour comprendre les différentes approches sylvicoles en montagne et la gestion de la crise actuelle, plusieurs sorties sur le terrain ont été effectuées afin de rencontrer des acteurs impliqués dans la gestion et le suivi des forêts de Belledonne.

### Visite d'une parcelle scolytée

Accompagné de mon tuteur et de Christophe Chauvin (ingénieur forestier), j'ai visité une parcelle de forêt totalement atteinte par le scolyte typographe afin de déterminer quelle gestion appliquer sur cette parcelle dans le futur. Durant la journée et la visite, j'ai eu l'occasion d'échanger sur l'évolution des peuplements, les choix entre régénération naturelle et plantation, et les stratégies mises en place après une infestation.

### **Entretien avec la DDT**

J'ai conduit un entretien formel avec Mme Depommerie, Responsable de la Cellule Forêt à la DDT (Direction Départementale des Territoires). Nous avons abordé le rôle institutionnel de la DDT face aux crises sanitaires forestières, les procédures d'autorisation de coupes, les mesures réglementaires en cas d'infestation, et les perspectives de gestion forestière adaptative permises par les outils réglementaires.

### **Journée de coupe sanitaire avec la Chambre d'Agriculture**

Aux côtés de Typhaine Dannoux, conseillère forestière de la Chambre d'agriculture, j'ai participé à une opération de repérage et de marquage des arbres avant coupe dans une parcelle forestière prévue pour un chantier. L'objectif était de valoriser des parcelles à proximité d'un chantier de bois scolytés pour pouvoir rentabiliser la venue des bûcherons. Pour cela, la Chambre d'agriculture ou le CNPF peuvent être sollicités sans frais pour établir un diagnostic sylvicole. Le diagnostic est réalisé avec le propriétaire, s'il le souhaite. Nous procédons alors à un marquage pour pouvoir sortir les bois matures tout en favorisant une régénération forestière. Les individus ciblés sont marqués à la bombe de peinture, puis répertoriés dans un tableau précisant leur diamètre, leur essence (épicéa, sapin ou feuillu) et leur type de valorisation (bois de charpente, bois palette, bois sec). Certains feuillus sont conservés volontairement, car ils apportent de l'ombre bénéfique à la régénération naturelle, tout en présentant un potentiel de valorisation différée (dans 10 à 15 ans). Tous les résineux de plus de 30 cm de diamètre sont en revanche systématiquement prélevés.

### **Sortie conseils avec le CNPF**

J'ai accompagné un agent du CNPF pour un diagnostic de deux parcelles forestières dans la commune de Laval, appartenant à des propriétaires sollicitant des conseils sur la gestion de leur forêt. La première parcelle appartient à un propriétaire résidant à Marseille. L'ensemble de sa parcelle, longeant la route, a été sévèrement infesté par le scolyte typographe : les épicéas sont entièrement desséchés, plusieurs commencent à tomber spontanément et quelques-uns se sont déjà effondrés sur la route. Lucas Robin (agent du CNPF) a été contacté par les voisins riverains, situés le long de la route qui longe la parcelle, cherchant une solution pour une situation devenant dangereuse pour les usagers et les parcelles avoisinantes. Une inspection par drone a été menée pour documenter l'état du peuplement et évaluer le risque.

La deuxième parcelle que nous avons visitée a été grandement affaiblie en raison d'une coupe rase réalisée en aval, qui a exposé les pieds restants aux vents et aux intempéries. Lucas Robin a donc donné des conseils sur mesure, tenant compte des souhaits du propriétaire tout en

préconisant une gestion plus respectueuse des équilibres sylvicoles et des dynamiques naturelles de régénération.

### **Journée préparatoire ONF / Sylv'ACCTES**

J'ai participé à une matinée aux côtés d'un agent de l'ONF et d'un représentant de Sylv'ACCTES, dédiée à la préparation d'une sortie pédagogique. J'ai assisté à l'organisation des itinéraires pour que la sortie pédagogique puisse illustrer des cas de régénération forestière réussie, en présentant des peuplements divers (feuillus, résineux, mélanges) et en expliquant les différents cycles de vie forestiers, depuis les espèces pionnières jusqu'aux strates plus matures. Cette journée m'a également permis d'échanger sur ces sujets, et notamment sur les meilleures méthodes sylvicoles à adopter en montagne.

### **Journée technique au Semnoz**

J'ai assisté à une journée terrain organisée par l'ONF, en présence d'agents de terrain, d'experts du DSF et de représentants institutionnels. Cette journée, divisée en deux, était composée d'une sortie forestière pendant la matinée où différents thèmes furent abordés : la gestion post-dépérissement, les coupes sanitaires, la diversification des essences, les protocoles de régénération et le suivi de plantation, avec des présentations d'expérimentations dans les forêts du Semnoz. L'après-midi, nous avons suivi un séminaire sur le scolyte, puis un jeu de rôle en groupe dans lequel les participants devaient associer des modalités de gestion forestière, de la non-intervention à la coupe intensive, à des cas concrets présentés.

Pendant les journées terrain et entretiens, j'ai pu rassembler des informations et des données sur une multitude de sujets concernant la forêt de Belledonne et son contexte de crise. Les journées, étant remplies d'informations, étaient parfois hétérogènes dans leur format, les sujets abordés et les temps d'échanges. Ceci a produit des données qualitatives très variées. Nous avons néanmoins identifié deux axes jugés centraux dans le contexte local pour produire une analyse thématique : les méthodes sylvicoles en montagne et la gestion de la crise actuelle. Ce sera donc une démarche exploratoire dans laquelle nous analyserons les retours dans un tableau comparatif qui regroupe ces deux axes en synthétisant les discours obtenus provenant des acteurs rencontrés. Cela nous permettra d'explorer les différents points de vue sur les sujets liés à la crise actuelle en Belledonne et sur les solutions proposées. Nous pourrions ainsi mettre en perspective ces visions afin de voir si les avis convergent ou, au contraire, divergent sur certains points.

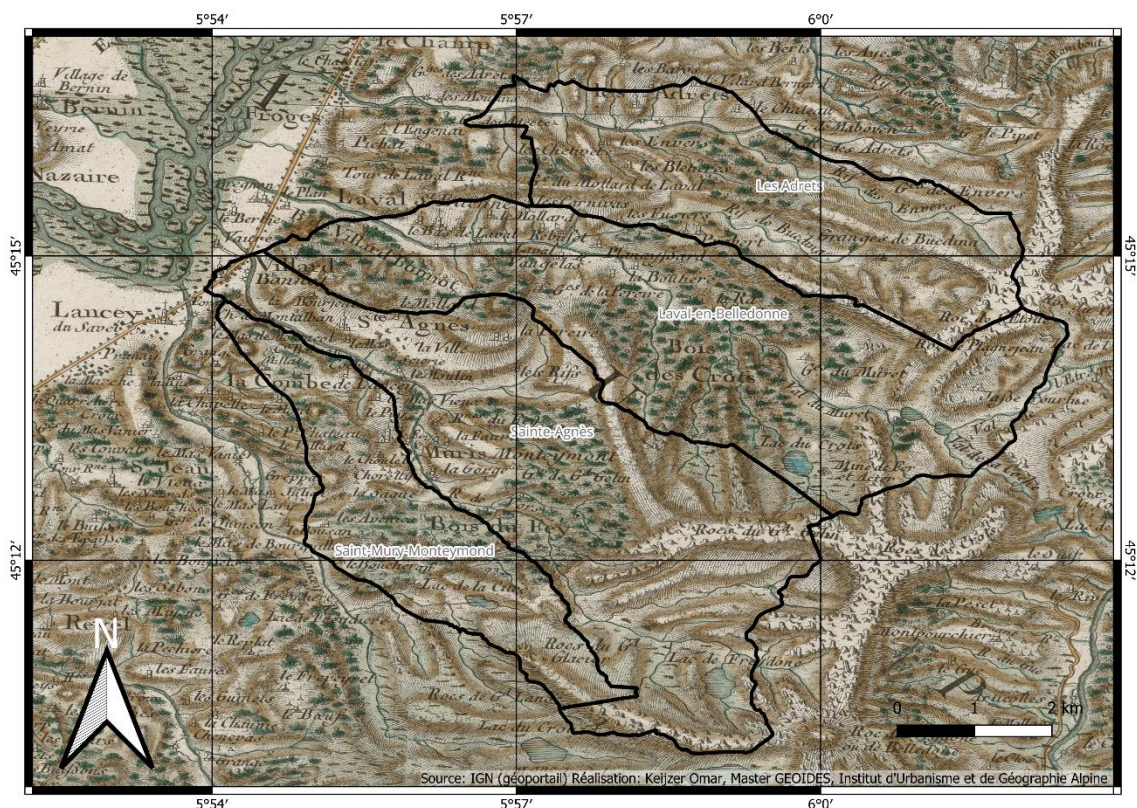
## **III. Résultats**

### **3.1. Évolution historique des forêts de Belledonne (XVIIIe – XXIe siècle)**



Pour comprendre le dépérissement actuel en Belledonne, il est essentiel d'étudier son histoire. Remonter l'histoire du massif et de ses forêts nous permettra de mieux comprendre l'affaiblissement actuel. L'analyse diachronique du couvert forestier s'appuie sur l'observation de documents cartographiques historiques et d'images aériennes centrées sur quatre communes du versant occidental de Belledonne : Laval-en-Belledonne, Saint-Mury-Monteymond, Sainte-Agnès et Les Adrets (figure 2). Ces communes, localisées entre 600 et 1 800 m d'altitude, sont représentatives de la dynamique paysagère du piémont belledonnien.

À la fin du XVII<sup>e</sup> siècle, la France est encore un pays très rural et boisé, avec une couverture forestière représentant 30 à 35 % de son territoire. Mais déjà à cette période, la croissance des besoins en bois entraîne une surexploitation de la forêt. En Belledonne, ceci est particulièrement visible : le paysage est alors très différent de celui que nous connaissons actuellement. Une mosaïque de forêts, pâturages et landes, façonnée par des siècles d'activités humaines et pastorales, recouvre la vallée. La carte de Cassini, réalisée au XVIII<sup>e</sup> siècle, dépeint en effet un paysage de Belledonne très largement ouvert, montrant de petites taches forestières disséminées sur les pentes les plus escarpées, au milieu de vastes espaces ouverts dédiés à l'agriculture et aux pâturages (figure 3).



(Figure 3 : Carte de Cassini recouvrant les 4 communes cibles (XVIII<sup>e</sup> siècle))

Les forêts y apparaissent fragmentées et cantonnées aux zones d'accès difficile (pentes raides, ravins), tandis que l'empreinte agropastorale est omniprésente. À cette époque, la vallée et les coteaux de moyenne altitude sont anthropisés : les champs cultivés, les vergers, les landes et les alpages occupent la majeure partie du territoire, ne laissant subsister que des îlots boisés discontinus. Plusieurs siècles d'essor agricole et d'élevage avaient entraîné un important défrichement de Belledonne. La population rurale utilise la forêt comme ressource polyvalente,



exerçant une forte pression sur le couvert boisé : prélèvements de bois de feu et de construction, pacage du bétail dans les sous-bois, collecte de litière et fabrication de charbon de bois pour l'artisanat local et les forges métallurgiques (*Ténot, 1919*). Pendant cette époque, les droits d'usage étaient souvent source de conflits entre communautés villageoises, grands propriétaires et ordres religieux, chacun revendiquant ses privilèges sur l'exploitation du bois ou le pacage des animaux. En effet, les limites des propriétés étaient mal définies, ce qui entraînait maints procès et tensions (*Département de l'Isère, 2019*).

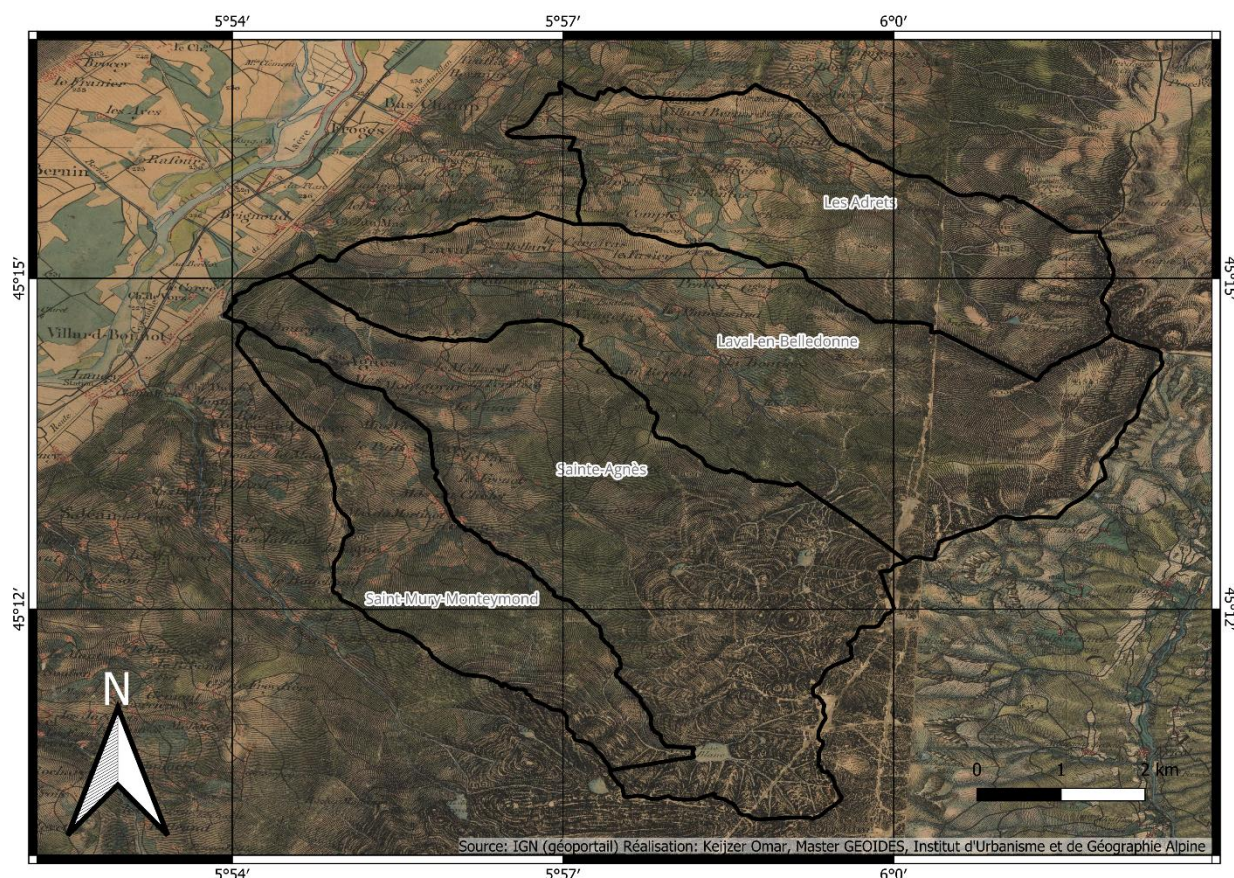
Prenant conscience de cette dégradation forestière, qui a lieu non seulement en Belledonne mais sur l'étendue du territoire national, la monarchie cherche alors à réguler davantage la gestion. En 1669, Colbert met en œuvre l'Ordonnance des Eaux et Forêts, marquant ainsi un tournant dans la gestion forestière au début du XVIII<sup>e</sup> siècle (*Hagimont, 2021*). Cette ordonnance instaure d'abord un droit de préemption sur les bois : l'État a besoin du bois pour la construction navale, la flotte française devant être capable de rivaliser avec les autres puissances de l'époque (*Hagimont, 2021*). À chaque arbre est attribuée une fonction ; pour chaque forêt, les propriétaires peuvent exploiter leur taillis mais sont contraints de réserver une partie de leur territoire à des futaies qu'ils ne peuvent pas exploiter et qu'ils doivent entretenir. L'ordonnance renforce également les pouvoirs des officiers des maîtrises forestières et impose des interdictions d'accès à certaines portions de forêts, tout en organisant une surveillance active des forêts communales (*Hagimont, 2021*). Cette ordonnance porta ses fruits dans un premier temps, mais à la suite de la mort de Colbert et de celle de Louis XIV, la dégradation des forêts continua (*Gaudin, 1996*). De plus, ces réglementations restèrent largement inappliquées en Dauphiné : le manque de gardes forestiers et l'attachement des communautés rurales à leurs droits d'usage conduisirent à des infractions massives et à de nombreux conflits locaux (*Département de l'Isère, 2019*). En outre, durant la seconde moitié du XVIII<sup>e</sup> siècle, le système mis en place par Colbert est fortement contesté par les physiocrates comme Quesnay, qui prônent un retour à la nature et considèrent l'agriculture comme la principale source de richesse. La monarchie elle-même infléchit alors sa politique forestière dans un sens plus libéral, sous l'influence des physiocrates. Après les grandes disettes de 1709 et 1766, les défrichements sont encouragés pour accroître les terres cultivables, et les forêts privées échappent à tout contrôle (*Gaudin, 1996*). Cette libéralisation des défrichements accélère le recul des forêts iséroises, qui coïncide avec l'essor de la demande en bois des industries rurales (verreries, forges, tuileries, etc.) (*Département de l'Isère, 2019*).

La croissance démographique combinée à une proto-industrialisation provoque l'essor d'activités manufacturières rurales comme les forges, verreries et autres ateliers exigeant de grandes quantités de bois, notamment comme combustible et comme matière première, ce qui a eu un impact majeur sur la forêt (*Hagimont, 2021*). Les nouvelles politiques libérales bénéficient fortement à l'industrie sidérurgique en Belledonne, notamment sur le versant occidental qui est particulièrement touché par cette industrialisation. La morphologie y est favorable : les nombreux torrents, passant dans de fortes ruptures de pente, créent des moteurs puissants pour les usines et ont favorisé leur installation. Des coupes abusives pour alimenter ces industries sont documentées même avant la réforme de Colbert, ce qui indique une pression locale précoce dès 1700 (*Gadoud, 1917*). La commune d'Allevard était le centre industriel majeur, dont les besoins en combustible accéléraient la déforestation : vers 1790, on y consomme environ 30 950 charges de charbon de bois par an, alimentant deux hauts-fourneaux et plusieurs martinets (*Gadoud, 1917*). Un tel niveau d'extraction a conduit localement à la disparition quasi totale des boisements, les taillis étant coupés à blanc pour être convertis en

charbon, aggravant la pénurie de combustible déjà criante à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle (*Département de l'Isère*, 2019). De même, l'exploitation des mines consommait beaucoup de bois pour l'étagage des galeries, notamment dans les districts miniers d'Allevard et de Theys, tandis que les fourneaux et martinets de la vallée du Grésivaudan dévoraient le bois pour fondre le minerai et actionner les marteaux des forges (*Oury*, 2020). Gadoud (1917) indique : « *le versant gauche du Grésivaudan a été véritablement déboisé pendant le XVIII<sup>e</sup> siècle du fait d'une surexploitation intense. Les statistiques comparatives sont éloquentes : sur ce seul versant, on comptait plus de 13 fourneaux et plus de 16 martinets, contre 7 forges seulement dans le Vercors et 9 en Chartreuse* ».

À la veille de la Révolution, le déclin du couvert forestier atteint un niveau critique. La France reste encore un pays boisé avec 30 % de son territoire couvert au début du XVIII<sup>e</sup> siècle, mais la pression cumulative des besoins a provoqué une véritable crise du bois dans les années 1780 (Deveze, 1996). En 1788, la *disette de bois* et la flambée des prix préoccupent toute la France, alimentant le mécontentement social à la veille de la Révolution (Deveze, 1996). La forêt française continue cette tendance de recul pendant la Révolution française : les révolutionnaires, voulant rompre avec le régime centraliste, libèrent les propriétés privées de l'obligation de respecter l'Ordonnance des Eaux et Forêts, ce qui entraîne plus de défrichements pour un gain rapide. Les révolutionnaires confient la gestion des bois aux autorités locales et aux propriétaires privés, tandis que les forêts domaniales sont massivement vendues pour éponger les dettes de l'État (Hagimont, 2021). Les discours sur la forêt reflètent les oppositions politiques de l'époque : chaque camp accuse l'autre d'être responsable du recul. Pour les révolutionnaires, la dégradation des forêts est l'héritage d'un système féodal injuste qu'ils cherchent à réparer. En revanche, les partisans de l'ordre ancien considèrent que c'est la Révolution elle-même qui a provoqué le chaos et les dégâts forestiers (Hagimont, 2021).

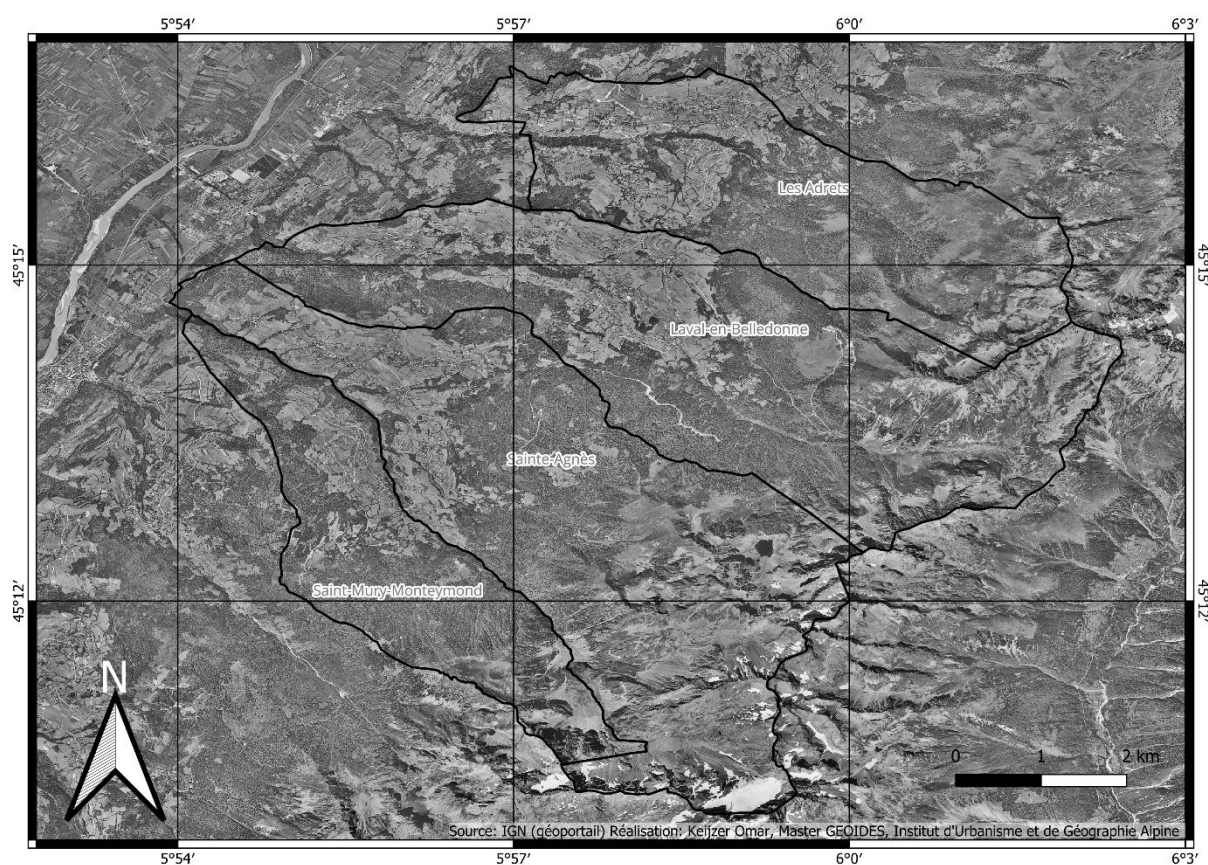
Le début du XIX<sup>e</sup> siècle correspond au point bas historique de la forêt en France. Vers 1820, on estime que la forêt ne couvre plus qu'environ 15 % du territoire national (Gaudin, 1996). Sur Belledonne, ceci est également visible : Tenot (1919) indique : « *Il y a, dans la vallée de l'Olle, 7 scies à eau qui consomment beaucoup de bois pour des planches. De plus, les habitants des hameaux élevés font actuellement des défrichements ou essarts qui occasionnent souvent des incendies dans les forêts, et la trop grande quantité de chèvres, qu'on mène paître pendant 6 ou 8 mois dans les forêts et les bois taillis, active cette dévastation* ». Cette description de la vallée de l'Eau d'Olle illustre la combinaison de facteurs qui ont réduit la forêt de Belledonne. Il faudra attendre 1824 pour que la tendance s'inverse avec la création de l'École royale forestière à Nancy sous le règne de Charles X. La Restauration promulgue le Code forestier de 1827, qui dote l'administration des Eaux et Forêts de pouvoirs coercitifs accrus pour mettre un terme aux abus. Inspiré des principes colbertiens, ce code interdit strictement le pâturage en forêt sans autorisation, régleme les coupes et prévoit des peines sévères contre le vol de bois ou les incendies volontaires (Boutefeu, 2005). Ces mesures commencent à porter leurs fruits au fil du XIX<sup>e</sup> siècle, malgré de fortes résistances des communautés rurales attachées à leurs droits d'usage (pâturage, panage, cueillette) (Hagimont, 2021). Dans certaines régions françaises, comme les Pyrénées, des soulèvements armés, comme la guerre des Demoiselles (1829–1832), éclatent même pour protester contre les gardes forestiers et l'application du Code forestier (Hagimont, 2021).



(Figure 4 : Carte d'état-major recouvrant les 4 communes cibles (XIX<sup>e</sup> siècle))

La carte d'état-major montre que sur cet intervalle de 100 ans, nous observons quelques reboisements spontanés de friches autour des villages (par exemple au sud de Laval-en-Belledonne ou vers Saint-Mury-Monteymond), liés à l'abandon de parcelles marginales (figure ). Cependant, la matrice paysagère reste majoritairement ouverte : la forêt de 1860 demeure un patchwork de prés et de landes, parsemé de bosquets morcelés, ces derniers restant confinés aux zones de forte pente ou de moindre valeur agricole. Autrement dit, le recul de l'agriculture montagnarde n'est pas encore généralisé et l'essor industriel du XIX<sup>e</sup> ne profite pas immédiatement à la forêt de Belledonne. Il faut noter que les usages économiques de la forêt évoluent au cours du siècle, ce qui influence indirectement la composition des peuplements. Jusqu'au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, le charbon de bois reste le principal carburant de l'industrie locale (Viallet, 2018). La révolution industrielle amène néanmoins de nouveaux combustibles : le charbon de terre (houille), qui prend progressivement la place du charbon de bois dans les forges et manufactures vers 1850-1870 (Archives nationales du monde du travail, s.d.). Ce changement, associé à la centralisation de la production dans les grands bassins charbonniers du Nord et de l'Est, entraîne la fermeture progressive des hauts-fourneaux d'Allevard à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Ce déclin industriel relâche alors la pression sur les taillis environnants, jusqu'à surexploités pour produire du charbon de bois (Viallet, 2018).

Le XX<sup>e</sup> siècle voit un retournement de la tendance, avec une reconquête progressive puis massive de la forêt en France : tandis que 8 à 9 millions d'hectares seraient encore boisés vers 1830, 12 millions le sont en 1945 et 17 millions en 2018 (Hagimont, 2021). L'abandon des terres agricoles s'amorce dès la fin du XIX<sup>e</sup> et se poursuit dans l'Entre-deux-guerres, donnant naissance à des « nouvelles forêts » (Hagimont, 2021). Cette tendance est notamment présente en Belledonne, où l'on observe une diminution de la population agricole, témoignant d'une déprise progressive des terres marginales (Tenot, 1919). L'État français engage dès l'après-guerre un effort sans précédent de reboisement planifié. En 1946 est créé le Fonds forestier national (FFN), instrument financier alimenté par une taxe sur les bois, destiné à subventionner d'ambitieux programmes de plantations sur tout le territoire. Les aides du FFN dynamisent fortement les plantations, surtout de résineux (Saintonge et al., 2021). La comparaison d'images aériennes illustre ce tournant : sur la photographie aérienne des années 1950 (figure 5), nous voyons clairement la progression du couvert boisé par rapport au XIX<sup>e</sup> siècle.



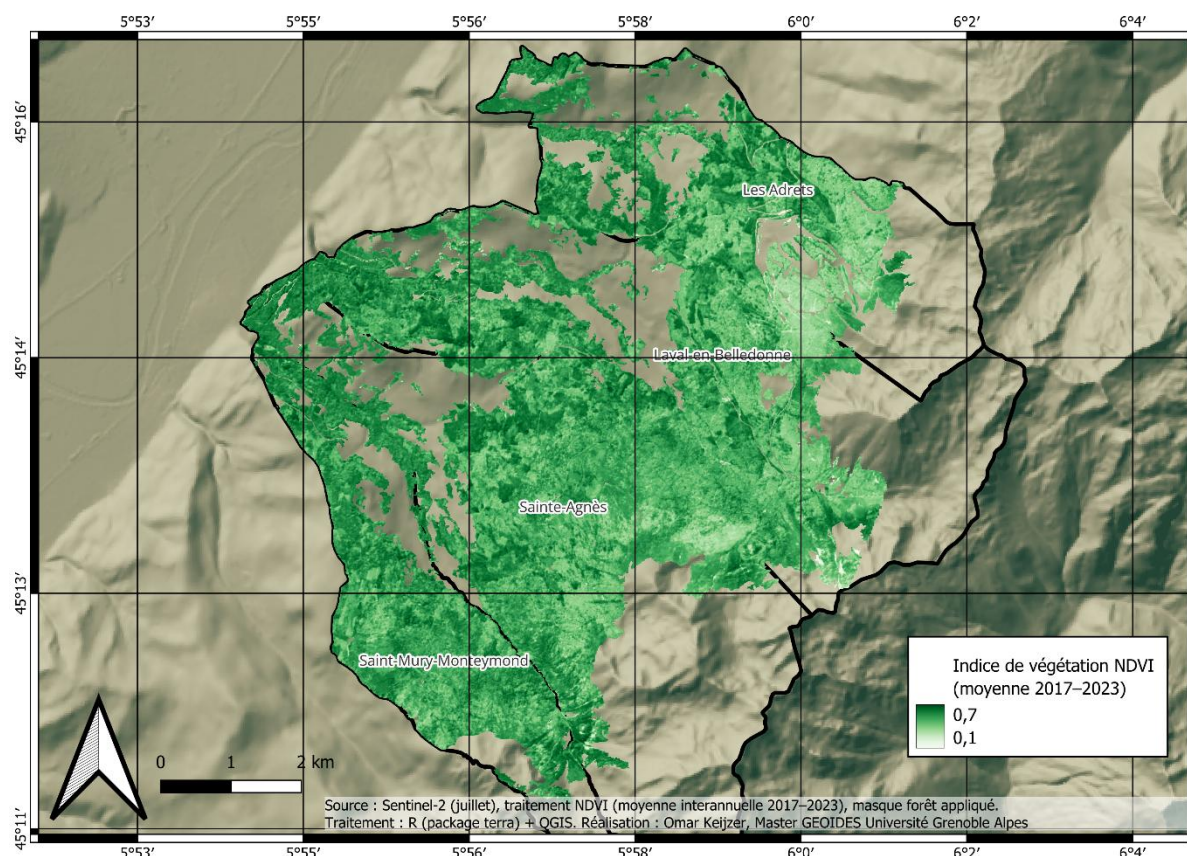
(Figure 5 : Photographie aérienne recouvrant les 4 communes cibles (IGN, 1952))

De nombreux anciens prés de fauche et champs situés sur les pentes ensoleillées (par ex. au sud de Sainte-Agnès, aux Adrets) sont en cours d'enfrichement et commencent à se boiser spontanément. Le paysage de l'après-guerre est encore hétérogène, nous distinguons des mosaïques de milieux ouverts, mêlant friches, landes à genêt et prés boisés, signe d'une transition en cours. Mais la trajectoire est lancée : sous l'effet de la déprise agricole l'abandon des cultures en terrasse, et le recul de l'élevage extensif, la forêt monte en altitude et regagne les terrains autrefois cultivés.



Ce boom forestier profite largement aux zones de moyenne montagne comme Belledonne, où de vastes chantiers de plantation sont réalisés de 1950 aux années 1980 sur d'anciennes terres agricoles en friche. Les essences privilégiées sont des conifères à croissance rapide : pin laricio, pin sylvestre, mais surtout épicéa commun et Douglas, qui bénéficient de financements prioritaires (83 % des arbres plantés via le FFN sont des résineux) (ONF, s.d.). Belledonne semble avoir suivi la dynamique observée dans d'autres massifs alpins : après la Seconde Guerre mondiale, les reboisements ont privilégié les résineux, notamment les épicéas. Il est donc vraisemblable que de nombreuses pessières monospécifiques aient été plantées, y compris en dessous de 1000 m d'altitude, là où les feuillus étaient historiquement dominants.

Au début du XXI<sup>e</sup> siècle, la forêt de Belledonne présente un visage très différent de celui du XVIII<sup>e</sup>. Les dernières analyses satellitaires montrent un couvert forestier désormais quasi continu sur les versants autrefois cultivés. La cartographie par indice de végétation NDVI moyen sur 2017–2023 (figure 6) met en évidence une densification avancée du couvert.



(Figure 6 : moyenne interannuelle NDVI 2017-2023 recouvrant les 4 communes cibles)

Hormis les sommets et alpages, le massif apparaît couvert d'un manteau boisé quasi ininterrompu, avec des valeurs de NDVI > 0,6 sur la plupart des pentes de moyenne altitude. Ce gradient altitudinal traduit la complète conversion des friches post-agricoles en forêts fermées. En résumé, Belledonne a connu en un peu plus de 150 ans une transition forestière exemplaire : d'un minimum de forêt vers 1850 à un maximum historique aujourd'hui. Nous évaluons que le paysage y est plus boisé qu'il ne l'a jamais été depuis des siècles. Cette dynamique récente s'accompagne d'une maturation progressive des peuplements : les jeunes

boisements des années 1950 ont désormais environ 70 ans, commençant à acquérir une structure plus complexe (canopée qui se referme, apparition de bois mort, etc.).

### 3.2. État actuel de la forêt de Belledonne

Le reboisement du couvert forestier apporte néanmoins aujourd'hui de nouvelles vulnérabilités. Liées aux changements globaux, les peuplements monospécifiques d'épicéa plantés dans les années 1950-1980 se révèlent très sensibles aux aléas climatiques récents (Dobor et al., 2020). Des dépérissements massifs d'épicéas ont été observés sur les contreforts de Belledonne dès les étés 2015 et 2018. Les épicéas affaiblis par la sécheresse deviennent une proie facile pour des attaques parasitaires, en particulier du scolyte typographe (*Ips typographus*) (ONF, 2025).

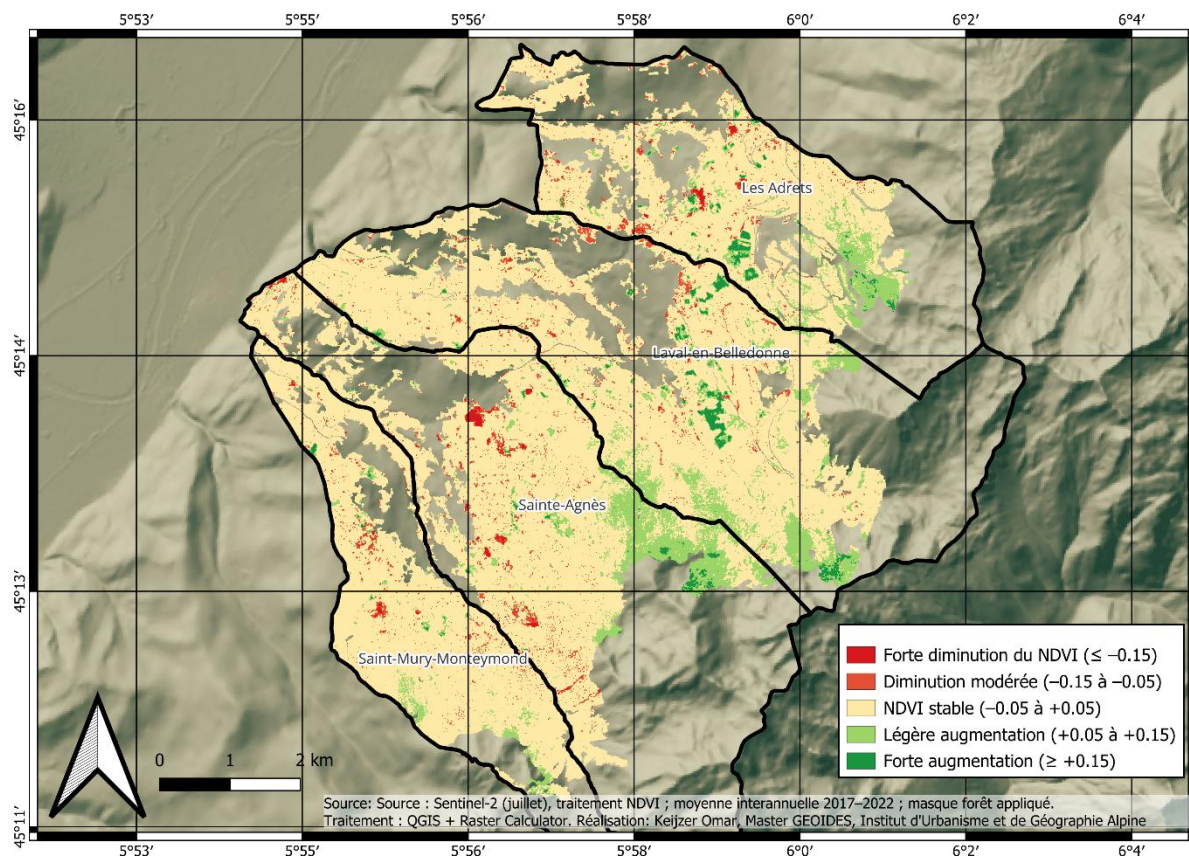
Le scolyte est un insecte indigène inféodé à l'épicéa, qui permet de réguler les populations en colonisant les arbres affaiblis. Néanmoins, depuis quelques années, un affaiblissement physiologique important des arbres, causé par des sécheresses répétées et des canicules, réduit leur capacité de défense, notamment la production de résine. La colonisation débute souvent à la base du houppier, zone à cambium épais, où un mâle fore une chambre d'accouplement et émet des phéromones d'agrégation, attirant 2 à 3 femelles qui creusent des galeries maternelles et pondent, donnant naissance à des galeries larvaires perpendiculaires. Environ 3 000 insectes suffisent à tuer un arbre, et un individu colonisé peut produire jusqu'à 30 000 émergents. Avec des étés chauds (ex. 2022–2023), le nombre de générations annuelles est passé de 1–2 à 2–3, entraînant une multiplication rapide des populations (communication personnelle, ONF, Journée technique au Semnoz, 2024). La saturation d'un arbre provoque l'émission de phéromones de répulsion et la colonisation des arbres voisins, créant des foyers en taches. Les forêts touchées sont facilement discernables par des feuillaisons rousses ainsi que des cimes sèches, notamment à un stade avancé du dépérissement.

Il faut noter que les épicéas ne sont pas les seuls arbres touchés à grande échelle : le frêne, espèce commune en moyenne montagne et notamment en Belledonne, est de plus en plus affecté par la chalarose, un champignon (*Hymenoscyphus fraxineus*) qui s'est propagé depuis les années 1990 à l'ensemble de l'Europe. Le pathogène induit un dépérissement de la cime, des lésions du bois et des pertes foliaires qui affaiblissent considérablement les peuplements (Combes et al., 2024).

Pour bien comprendre la situation, nous avons cartographié le dépérissement sur le massif grâce à la télédétection. Cette carte a pour objectif d'identifier les zones forestières ayant connu une baisse significative de vigueur végétative en 2023, en comparaison avec la moyenne des années 2017 à 2022. Elle repose sur l'utilisation du NDVI.

Comme l'illustre la carte des anomalies de végétation en juillet 2023 par rapport à la moyenne 2017–2022 (indice NDVI) (figure 7), de larges taches rouges apparaissent, signalant des baisses prononcées de biomasse foliaire en 2023. Cette tendance est confirmée sur le terrain, où de nombreuses pessières présentent un dépérissement marqué, avec des arbres scolytes secs et tombés (Photographie 1).





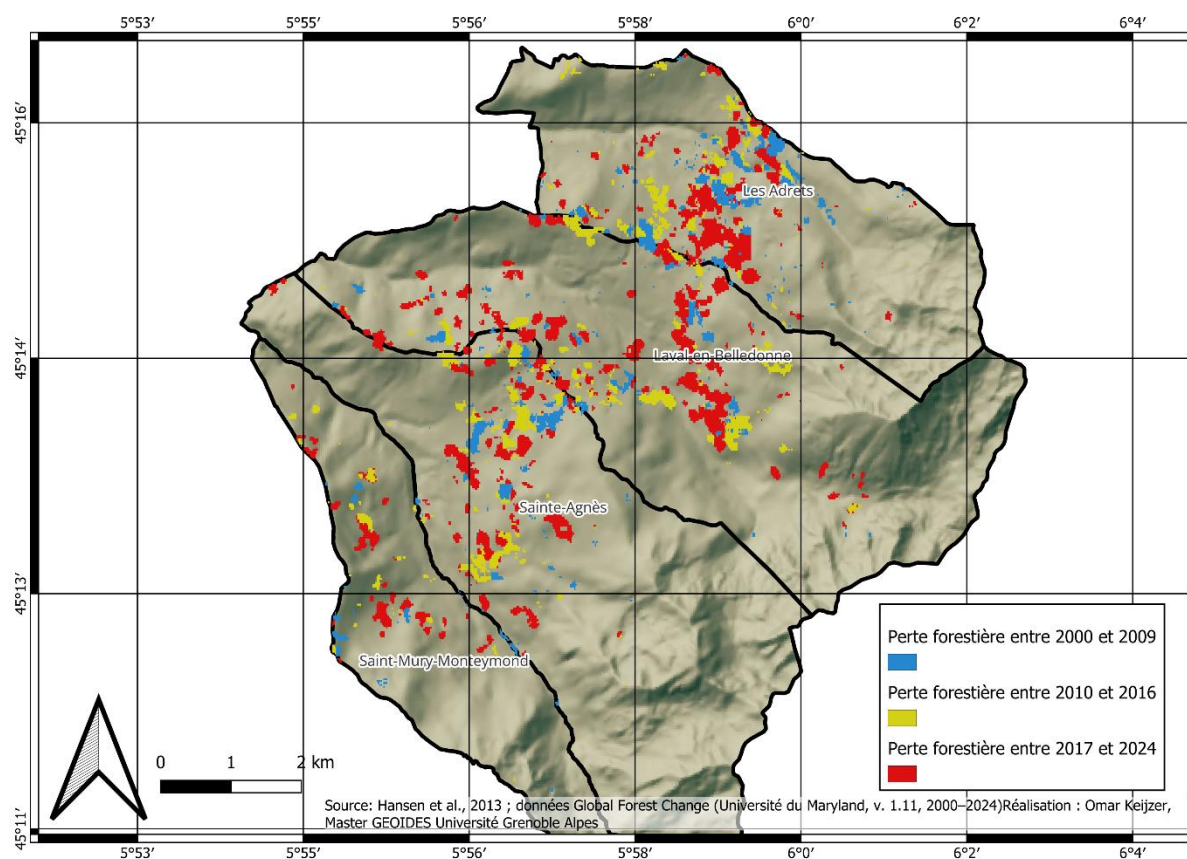
(Figure 7 : Anomalies de végétation en juillet 2023 par rapport à la moyenne 2017–2022 (indice NDVI))



(Photographie 1 – Parcelle d'épicéas dépérissants sur le versant occidental de Belledonne (commune de Laval-en-Belledonne))  
Photographie personnelle, 2025.

Ces foyers de dépérissement sont particulièrement concentrés sur le versant occidental du massif (dominant la vallée du Grésivaudan) et dans certaines combes internes. Le secteur des communes de Sainte-Agnès, Saint-Mury-Monteymond ou Les Adrets présente de multiples zones en anomalie négative, ce qui correspond visuellement à des peuplements éclaircis ou roussis. Cette analyse permet de spatialiser les dynamiques de végétation à court terme, mais doit être interprétée en tenant compte de la variabilité naturelle, qui peut être révélée par la carte de l'écart-type NDVI interannuel (annexe 1).

Les données Hansen, qui cartographient les pertes annuelles de surface forestière à l'échelle mondiale (2001–2024), permettent de confirmer si les zones affaiblies correspondent bien à des coupes ou à des mortalités récentes (figure 8). Nous avons distingué trois périodes afin d'identifier celles durant lesquelles les pertes ont été les plus importantes et de vérifier si ces résultats coïncident avec ceux obtenus par la télédétection.



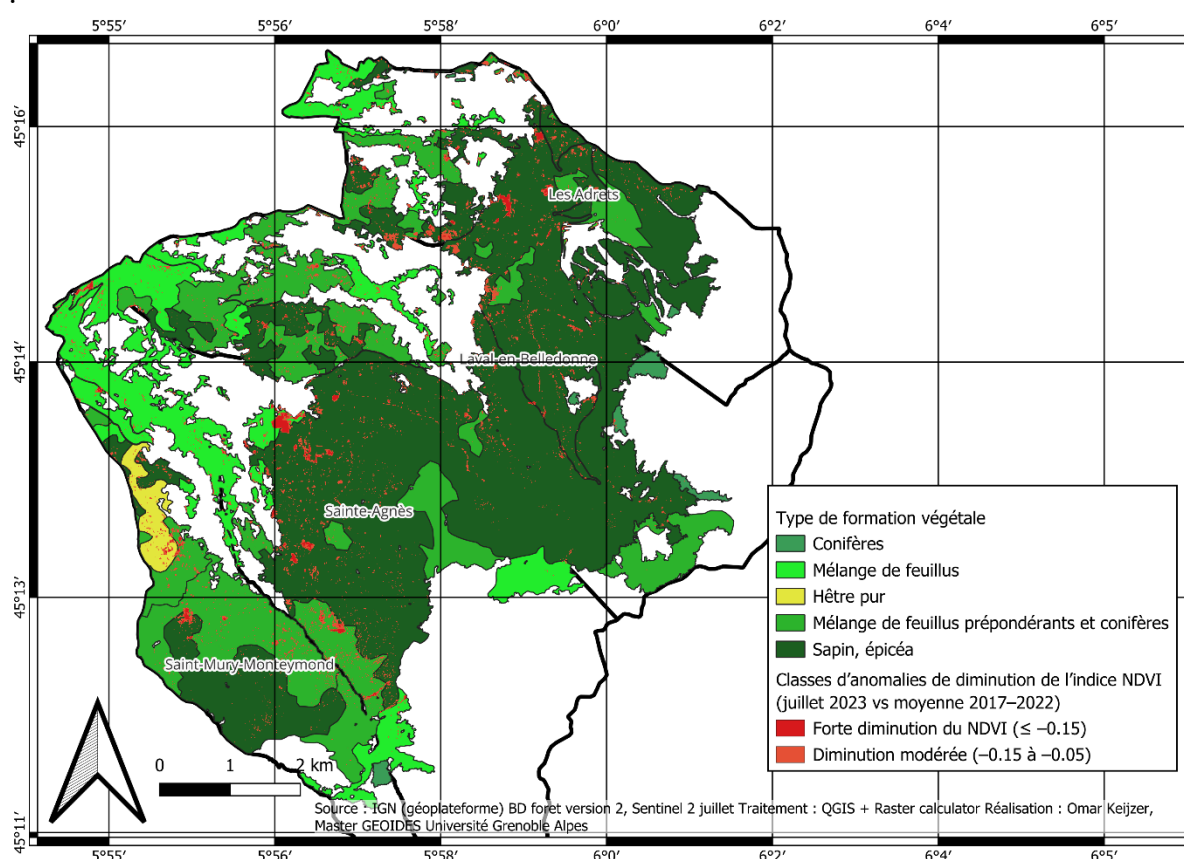
(Figure 8 : Perte de surface forestière cumulée entre 2000 et 2024 (données Hansen/UMD))

La carte des données Hansen révèle de nombreux points de perte forestière au sein du massif de Belledonne. Nous observons que, sur la première période, les pertes étaient diffuses et limitées, reflétant essentiellement des coupes sylvicoles ponctuelles ou des chablis isolés. Entre 2010 et 2016, la dynamique reste modérée mais s'étend à de nouveaux secteurs, notamment



dans les piémonts et sur les versants ouest. En revanche, une concentration de pertes apparaît sur la période 2017–2024, touchant particulièrement le centre et le nord-est du périmètre (Les Adrets, Laval-en-Belledonne), ainsi que certaines zones autour de Sainte-Agnès et de Saint-Mury-Monteymond. Ces pertes récentes coïncident avec les zones des anomalies NDVI (figure 6), attestant que la baisse de vigueur végétative est bien liée à une mortalité ou à une dégradation physique du couvert forestier.

En croisant les données de dépérissement avec le type de peuplement et des facteurs environnementaux comme l'altitude, la géologie et l'exposition, des corrélations peuvent être établies. Pour examiner quels peuplements sont les plus touchés par les dépérissements, une carte superposant les zones de forte diminution du NDVI avec les types de peuplements forestiers issus des données BD Forêt a été réalisée (figure 9).



(Figure 9 : Croisement des classes d'anomalie NDVI négative (rouge : forte diminution, orange : diminution modérée) avec la cartographie des formations végétales du massif.)

Nous pouvons voir sur la carte de croisement que les secteurs de forte anomalie NDVI se superposent en grande partie aux forêts d'épicéa et de sapins, tandis que les zones forestières classées comme feuillus purs présentent moins de signaux de dépérissement. L'analyse diachronique confirme cette tendance : en reliant ces résultats avec les photographies aériennes des années 1950, nous observons que les dépérissements coïncident avec les secteurs ouverts correspondant aux zones massivement reboisées par le FFN. Les résultats suggèrent donc que le dépérissement touche en grande partie ces plantations d'épicéa, implantées hors de leur optimum écologique. En effet, la composition spécifique et l'histoire sylvicole des peuplements conditionnent fortement leur résilience. L'épicéa, espèce introduite ou favorisée à moyenne

altitude pour la production, s'avère très sensible au déficit hydrique prolongé et aux attaques d'insectes ravageurs, ce qui en fait l'essence la plus touchée par le dépérissement récent (Saintonge et al., 2021).

La carte de répartition altitudinale (annexe 2) montre que la majorité des zones forestières concernées par des anomalies de NDVI se situent en moyenne altitude, entre 1000 et 1600 m, renforçant ce constat. Cette répartition altitudinale correspond aux tendances observées à l'échelle alpine, où les peuplements d'épicéa montagnards présentent une forte sensibilité au déficit hydrique et aux scolytes, tandis que les zones plus hautes montrent une moindre intensité de dépérissement. L'histoire forestière récente nous permet de comprendre comment surviennent les dépérissements : la plantation massive d'épicéa a permis un reboisement rapide mais a fragilisé les peuplements. Néanmoins, de nombreux facteurs interviennent dans la détermination de l'intensité des dépérissements.

L'orientation des versants joue également un rôle dans le microclimat forestier. Nos données (annexe 3) suggèrent que les pentes exposées au sud et à l'ouest ont subi des dépérissements plus sévères. Ces versants, fortement ensoleillés en été, accentuent l'évapotranspiration et le stress hydrique. Ces versants en particulier, identifiés à l'échelle alpine comme sujets à un assèchement accru ces dernières décennies (intensification de l'ETP), correspondent aux secteurs où les baisses de NDVI sont les plus marquées. À l'opposé, les ubacs (versants nord et nord-est), plus frais et humides, présentent moins de foyers de dépérissement, ce qui suggère un effet protecteur lié à une moindre exposition à la chaleur estivale.

Le sol joue un rôle primordial dans la répartition des essences forestières, notamment en fonction de son acidité et de sa profondeur, paramètres conditionnés par la géologie. On pourrait ainsi s'attendre à ce que certaines formations géologiques accentuent la vulnérabilité des peuplements. La carte géologique des quatre communes ciblées (annexe 4) suggère que certaines anomalies de NDVI coïncident avec des substrats plus superficiels. Toutefois, il reste difficile d'établir une corrélation robuste, car la majorité du territoire est recouverte par des dépôts glaciaires quaternaires, lesquels masquent en grande partie l'influence des formations métamorphiques ou sédimentaires sous-jacentes et constituent logiquement le principal support des forêts actuelles.

### 3.3. Perceptions et pratiques d'adaptation sylvicole

Face au dépérissement, les instances forestières et les propriétaires cherchent comment réagir de la meilleure façon. Souvent, les dépérissements sévères sont suivis d'une coupe sanitaire afin de prévenir le développement du scolyte et de valoriser le bois qui n'est pas encore touché par la dégradation. Néanmoins, ne pas intervenir sur une forêt déjà morte peut bénéficier à la biodiversité et à la régénération future.

Pour savoir quelle gestion adopter après une coupe sanitaire et quelles méthodes sylvicoles mettre en place pour favoriser une forêt résiliente, de nombreux acteurs de la forêt de Belledonne ont été consultés. Un tableau a été réalisé à partir des informations obtenues lors des rencontres et entretiens informels, regroupant les éléments pertinents sur deux thèmes en

particulier : les méthodes sylvicoles en montagne et la gestion post-coupe sanitaire (Tableau 9).

Acteurs	Méthodes sylvicoles en montagne	Gestion post-coupe sanitaire
ONF	Privilégier le mélange d'essences, la création d'îlots de sénescence, la coupe au diamètre et la conservation du bois mort.	Travailler sur la régénération naturelle, broyer une part des rémanents de l'exploitation et envisager une plantation diversifiée si besoin.
CNPF	Gestion sélective, diversifier, éviter coupes rases sur petites propriétés.	Plantation uniquement en l'absence de régénération naturelle et avec des essences adaptées à la station.
DDT	Présente une hiérarchie dans les méthodes de sylviculture : l'objectif est de rester au même niveau ou augmenter de niveau. Par exemple si on est en futaie irrégulière ne pas régresser en futaie régulière	La coupe sanitaire est avant tout motivée par des raisons économiques : sauver la valeur restante et limiter la propagation des scolytes. C'est un investissement parce qu'il faut replanter derrière une coupe sanitaire
Cristophe Chauvin	Adopter une démarche de gestion adaptative qui combine recherche-action, expertise et concertation locale, en structurant les peuplements pour conserver une ambiance forestière et renforcer la biodiversité.	Intervention régénération naturelle avant toute intervention ; n'envisager la plantation que comme mesure chirurgicale, lorsque la dynamique naturelle fait défaut
Sylvactes	En montagne, privilégier le jardinage plutôt que les grandes coupes. Maintenir la diversité, préserver les zones patrimoniales et structurer la forêt en mélange. Éviter les interventions brutales et sanctuariser les micro-habitats sensibles.	Conserver le bois mort, éviter la mécanisation lourde.

(Tableau 1 : Tableau regroupant les avis des acteurs rencontrés)

L'opinion qui ressort sur les méthodes sylvicoles dans Belledonne prône un mélange adapté à la station, avec une gestion d'intervention minimale. Si la régénération est déjà en place, il faut la prioriser et envisager des plantations seulement en cas de déficit. L'écosystème doit viser la diversification, en cherchant toujours à garder une ambiance forestière avec des micro-habitats, du bois mort au sol, etc. Il y a un accord pour dire qu'une forêt en bonne santé, capable de produire du bois, est une forêt résiliente, avec une gestion en futaie irrégulière où l'on pratique du jardinage, des coupes au diamètre, en évitant les coupes rases et en limitant l'ouverture excessive du couvert forestier.

Les avis sur la gestion post-sanitaire divergent davantage. En effet, selon la situation, il n'est pas toujours adapté de faire une coupe rase sur une parcelle scolytée dont les insectes se sont déjà dispersés. La question qui revient souvent est la suivante : faut-il laisser la nature suivre son cours ou préserver la valeur économique ? On retrouve ici deux visions qui s'opposent. Beaucoup de propriétaires, lorsqu'ils voient une parcelle scolytée, se précipitent pour sauver le bois qui n'est pas encore atteint afin d'éviter de perdre sa valeur, ce qui est encouragé par les instances régionales comme la DDT. Néanmoins, en écoutant d'autres acteurs, on comprend qu'il est parfois plus pertinent de laisser la parcelle en l'état si une régénération naturelle se trouve en dessous.

En effet, les parcelles d'arbres morts contribuent toujours à maintenir une certaine ambiance forestière, notamment s'il reste quelques feuillus, et surtout si une régénération est déjà présente. Dans ce cas, laisser la forêt telle quelle permet souvent une régénération plus rapide que si l'on exporte toute la matière de la parcelle. Cette dynamique est observable sur le terrain où l'on peut observer de la régénération sur une parcelle scolytée laissée en libre évolution (photographie 2). De jeunes hêtres/érables et quelques semis de sapin/épicéa colonisent le sous-bois, illustrant un renouvellement forestier adaptée à la station.



*(Photographie 2 – Régénération naturelle sous couvert d'épicéas dépérissants (commune de Laval-en-Belledonne) Photographie personnelle 2025)*

Le plus important est de comprendre dans quelle situation se trouve la forêt. Si elle est proche d'une route ou de bâtiments, il faut couper, car cela représente un danger pour l'humain.



Néanmoins, si la parcelle ne pose pas de danger et qu'une régénération est présente, il peut être plus pertinent de laisser la nature suivre son cours, afin que la forêt se régénère plus rapidement et devienne plus résiliente par la suite. Il faut trouver une solution au cas par cas, et c'est là que la gestion prend toute son importance, d'où la nécessité d'une gouvernance forestière capable de concilier ces logiques en articulant sécurité, viabilité économique et maintien des fonctions écologiques.

## IV. Discussion

### 4.1. Vers une sylviculture adaptative

Pour faire face au contexte de crise, une sylviculture proche de la nature est adaptée : une sylviculture qui vise à ajuster les pratiques de gestion afin de renforcer la résistance et la plasticité des forêts montagnardes. Les principes fondamentaux d'une gestion proche de la nature sont pertinents sous climat changeant, l'objectif étant de favoriser des peuplements mélangés et structurés, de maximiser la régénération naturelle et de privilégier des essences bien adaptées au site. Ces orientations permettront à la forêt de mieux résister et d'assurer une production de bois sur le long terme.

Dans le massif de Belledonne, la pratique du jardinage (coupe sélective arbre par arbre ou par petites trouées) est historiquement ancrée du fait du relief. « *En montagne, il y a toujours eu une certaine retenue dans les pratiques, notamment à cause de la pente. On a souvent privilégié le "jardinage" [...] plutôt que de grandes coupes* », explique un technicien de l'association Sylv'ACCTES. Ce mode de gestion consiste à prélever de manière dispersée les arbres arrivés à maturité ou de valeur commerciale, tout en gardant en permanence un peuplement forestier sur pied. Ainsi, la coupe à diamètre (récolter seulement les sujets au-delà d'un diamètre-seuil) peut permettre d'extraire du bois d'œuvre tout en conservant l'ambiance forestière nécessaire à la régénération. Une telle récolte sélective « *stimule la régénération et limite la prolifération des ronces* » sous le couvert résiduel, notent des agents de l'ONF, qui la citent en alternative aux coupes rases dans les zones touchées par des dépérissements. Du point de vue écologique, cette pratique maintient une continuité d'habitat pour la faune et la flore forestières ; du point de vue sylvicole, elle évite de perdre la croissance des tiges intermédiaires et prépare un peuplement irrégulier plus résilient.

Conserver les bois sur pied et le bois mort est également un élément non négligeable. Laisser des îlots de vieux arbres en libre évolution et une proportion significative de bois mort au sol contribue à la biodiversité et à la fertilité du sol. Christophe Chauvin insiste : « *il est important de conserver un maximum de volume de bois mort afin de préserver le cortège de biodiversité [...] Ce bois mort joue également un rôle favorable dans la régénération forestière* ». La décomposition du bois mort restitue la matière organique et maintient l'humidité du sol – un aspect crucial sur des sols montagnards superficiels ou karstiques où l'exportation massive de biomasse appauvrit le site. Enlever les bois morts engendre des coûts importants pour un bénéfice discutable. Si l'on conserve une ambiance forestière, on peut extraire une partie du

bois, puis replanter ponctuellement certaines essences si nécessaire. En général, la régénération naturelle se met en place d'elle-même ; il ne reste plus qu'à combler quelques manques. Même sur quelques ares laissés nus avec de la matière organique sur place, la nature finit toujours par recoloniser. On peut envisager un enrichissement si les espèces en place sont peu productives, par exemple en introduisant du Douglas, qui profiterait de l'ambiance existante.

Pour une gestion continue, il faut éviter les coupes rases. Les coupes rases éliminent d'un coup la totalité du couvert, provoquant une rupture écologique et microclimatique néfaste : « *elles détruisent brutalement la biodiversité, et l'impact se fait ressentir pendant de nombreuses années* », souligne Christophe Chauvin. Enlever tout le couvert forestier expose le sol à un assèchement, à des écarts de température importants et à la colonisation par des ronces ou espèces pionnières concurrentes, ce qui ralentit la régénération ultérieure. Néanmoins, des coupes sanitaires sont parfois nécessaires sur des parcelles scolytées pour limiter la propagation de l'épidémie. Pour favoriser au maximum la régénération après une coupe sanitaire, il faut laisser les petits arbres en place : cela crée une ambiance forestière et limite le développement excessif de la ronce. L'exploitation doit se faire avec précaution, en évitant de passer partout, et en laissant une partie des tiges ou des plus petites, qui apporteront de l'humus et maintiendront ce « *climat* » forestier. Il ne faut pas tout couper, notamment autour des feuillus : plus qu'une mosaïque, il s'agit d'un mélange à préserver. Il peut même être pertinent de laisser certains tuteurs mourir sur place pour que les feuillus puissent mieux tenir. L'objectif n'est pas de miser sur ces arbres individuellement, mais sur l'ambiance qu'ils apportent.

L'adaptation des forêts de Belledonne au climat futur implique aussi de repenser le renouvellement des peuplements. La plantation de masse n'est plus adaptée au contexte d'aujourd'hui : elle a perdu en efficacité, même si elle reste une pratique traditionnelle héritée notamment de l'époque du FFN. Deux axes complémentaires se dessinent alors : tirer parti au maximum de la régénération naturelle, et, lorsque nécessaire, introduire de nouvelles essences ou provenances mieux adaptées (adaptation génétique des peuplements). La régénération naturelle est généralement privilégiée par les gestionnaires, car elle assure un renouvellement graduel et génétiquement local des arbres. Christophe Chauvin considère que « *la plantation est un échec lorsque la régénération naturelle est possible* », rappelant que les essences locales seront plus résilientes et moins coûteuses qu'un reboisement artificiel. Dans les peuplements mélangés de montagne, on observe fréquemment une régénération plurispécifique (par ex. sapin pectiné, hêtre, érable, sorbier... sous un vieux couvert d'épicéas), qu'il convient de favoriser en gardant un ombrage modéré. Là où cette régénération spontanée est abondante et vigoureuse, l'intervention doit être minimale, c'est-à-dire qu'on peut se contenter d'enlever les arbres morts ou trop dominants pour libérer la lumière aux jeunes pousses, sans nécessairement planter.

Si la régénération naturelle n'est pas présente, des opérations de reboisement assisté sont parfois préconisées. L'objectif est alors de diversifier les essences : on évite de replanter uniquement de l'épicéa pur. « *La replantation en épicéas est de moins en moins fréquente. On se tourne vers d'autres espèces : Douglas, essences feuillues, voire espèces exotiques testées par l'ONF* ». À l'ONF, ces reboisements d'adaptation se font en mosaïque, par petites taches mélangées, afin de ne pas recréer de monotypes vulnérables et d'accroître la biodiversité locale. Par exemple, le Douglas, essence nord-américaine bien adaptée aux stations montagnardes

subatlantiques, est expérimenté sur certains versants de Belledonne : son introduction est envisagée à condition d'éviter la monoculture et de l'associer à d'autres essences. Des essences feuillues méditerranéennes ou exotiques sont également testées de façon ponctuelle par l'ONF dans la région, dans une logique d'acclimatation progressive. Ces essais doivent s'accompagner d'un suivi scientifique rigoureux (suivi de croissance, santé des plants, etc.) et d'une gestion adaptative fondée sur le retour d'expérience.

Il convient de noter que planter n'est pas incompatible avec la régénération naturelle, au contraire. Les gestionnaires adoptent de plus en plus des stratégies mixtes : favoriser d'abord la régénération spontanée des essences locales résiduelles (sapin, épicéa, hêtre, érable), puis compléter par des îlots de plantation dans les trouées les plus dégarnies. Ces plantations en petites taches permettent d'introduire une palette d'essences supplémentaires (sorbier des oiseleurs, alisier blanc, tilleul à petites feuilles, cèdre, pin sylvestre, etc.), choisies pour leur potentiel de résilience et leur complémentarité écologique. On accepte alors qu'une part des introduits échoue, l'essentiel étant que certaines espèces s'installent et enrichissent le peuplement futur. Une telle diversification augmente les chances qu'au moins une partie du peuplement résiste à de futures sécheresses ou attaques biologiques. L'adaptation génétique passe aussi par le laisser-faire de la sélection naturelle : comme le souligne un représentant de la DDT, « *les individus les mieux adaptés survivent et assurent la régénération* » – ce qui sous-entend de ne pas systématiquement replanter partout à grands frais, mais de faire confiance à la résilience intrinsèque de la forêt là où c'est possible. Car ce n'est qu'en diversifiant les essences et les structures que l'on restaurera une forêt capable de remplir l'ensemble de ses fonctions malgré le climat changeant.

Une telle gestion ne limitera pas l'aspect économique de la filière. Comme le souligne le *Livre blanc de France Nature Environnement : Pour une gestion différenciée* (Chauvin, 2025), d'une part, elle réduit les coûts directs liés aux reboisements artificiels ou aux coupes sanitaires massives, en misant sur la régénération naturelle et la continuité du couvert. D'autre part, elle limite les risques de pertes soudaines liées aux crises climatiques ou parasitaires, ce qui sécurise la valeur du capital forestier à long terme. La diversification permet aussi de maintenir une production régulière de bois d'œuvre de qualité, tout en renforçant l'intégration des forêts dans l'économie locale via les services écosystémiques de protection de l'eau et du tourisme. Ainsi, la résilience écologique recherchée se double d'une résilience économique, en stabilisant la filière et en évitant la logique de cycles « tout ou rien » propre aux peuplements monospécifiques.

## 4.2. Gouvernance forestière

Les politiques publiques et les dispositifs d'aide jouent un rôle déterminant pour impulser ou non les changements de pratiques. Un frein fréquemment mentionné par les acteurs privés est le manque de soutien financier en cas de crise sanitaire ou de travaux d'amélioration. En Isère, des aides départementales existent théoriquement pour les coupes sanitaires post-scolytes, « *mais elles sont souvent indisponibles voire non existantes* », d'après les conseillers forestiers locaux. Faute de subvention ou d'assurance, le propriétaire sinistré n'a « *pas de raison*

*d'intervenir sur une parcelle scolytée, la perte économique étant quasi inévitable* ». Ce constat souligne la nécessité d'un accompagnement renforcé : sans aides à la reconstitution et sans débouchés pour le bois détérioré, de nombreux propriétaires préfèrent abandonner les peuplements dépérissants, augmentant dans certains cas les risques de propagation.

Les propriétaires sont davantage enclins à agir s'il existe un cadre incitatif clair et un financement qui leur permet de le faire. Néanmoins, sur une parcelle scolytée où les insectes se sont déjà dispersés, la non-intervention peut constituer une option de gestion à part entière (Jonášová & Prach, 2004). Reconnaître ces formes de gestion et financer une telle gestion d'accompagnement de la dynamique naturelle pourrait encourager les propriétaires à changer leur mode de gestion forestière.

Dans le massif de Belledonne, certaines aides existent toutefois. Le programme Sylv'ACCTES en est un exemple concret : cette association d'intérêt général propose des subventions substantielles aux propriétaires qui s'engagent dans une sylviculture vertueuse et résiliente. En forêt privée, Sylv'ACCTES finance jusqu'à « 70 % du montant HT des travaux » (et 50 % en forêt publique) dès lors que le propriétaire suit pendant dix ans un itinéraire sylvicole défini par le programme (Espace Belledonne, s.d consulté en 2025). Ce modèle de paiement pour services environnementaux, financé par des mécènes (entreprises, collectivités) et coordonné avec les acteurs forestiers, peut réduire la contrainte économique pesant sur les propriétaires. Comme mentionné précédemment, le CNPF et la chambre d'agriculture permettent également de réaliser des concertations techniques sans frais et d'accompagner les propriétaires souhaitant adopter une autre forme de gestion sylvicole.

Au niveau national, la forêt occupe une place limitée dans les politiques. Récemment, le décret n° 2025-29 du 8 janvier 2025 attribue la compétence « forêt » au ministère de la Transition écologique (Gouvernement français, 2025). Ce changement pourrait donner un rôle plus important aux questions entourant la crise actuelle. Néanmoins, l'absence d'un ministère dédié à la forêt et la rareté des crédits dédiés à la gestion adaptative restent un obstacle à surmonter pour généraliser ces pratiques à grande échelle.

## Conclusion

Remonter l'histoire de la forêt de Belledonne nous éclaire sur la fragilité de la forêt face au climat moderne : les plantations massives d'épicéa, établies hors de leur aire de répartition optimale, comptent davantage de dépérissements que tout autre type de forêt. La cartographie met en évidence que les pessières monospécifiques de moyenne montagne, favorisées pour leur productivité, subissent fortement les sécheresses récurrentes et les canicules de la dernière décennie. L'indice de végétation différentiel normalisé a permis d'identifier, en 2023, de larges foyers de perte de vigueur en comparant le NDVI estival à la moyenne 2017–2022. La carte des anomalies 2023 met en évidence de vastes plages rouges signalant des baisses prononcées de biomasse foliaire. Ces diminutions de végétation se concentrent surtout sur le versant occidental

de Belledonne (au-dessus de la vallée du Grésivaudan) et dans certaines combes internes. Le croisement avec les données Hansen Global Forest Change (pertes forestières annuelles) confirme que ces anomalies coïncident avec des mortalités ou coupes récentes sur 2017–2024. En croisant les foyers de dépérissement avec la composition des peuplements et la topographie, il ressort que les zones de forte anomalie NDVI correspondent majoritairement aux forêts d'épicéas.

L'étude qualitative des perceptions des acteurs locaux révèle un diagnostic partagé et des pistes d'adaptation convergentes. Tous les acteurs rencontrés constatent l'ampleur du phénomène et conviennent sur l'urgence d'adapter les pratiques sylvicoles vers des approches plus résilientes qui visent à une gestion en futaie irrégulière. Il en ressort qu'une forêt qui contient une diversité dans ses essences avec une structure hétérogène et qui est riche en micro-habitats est perçue comme plus apte à encaisser les chocs climatiques tout en assurant ses fonctions productives et écologiques. Concernant la gestion post-crise, les avis sont plus contrastés, témoignant d'un dilemme entre impératifs économiques et écologiques. D'un côté, beaucoup de propriétaires touchés par le scolyte se précipitent vers des coupes sanitaires pour sauver la valeur marchande résiduelle des épicéas avant que le bois ne se dégrade. De l'autre, plusieurs acteurs soulignent que, lorsque les arbres sont déjà en grande partie morts et qu'une régénération naturelle est présente en sous-étage, il peut être plus judicieux de laisser faire la nature plutôt que de tout exploiter. Ce choix du non-interventionnisme implique de sacrifier la valeur économique à court terme du bois sur pied, mais présente l'avantage d'une restauration plus naturelle et potentiellement plus résiliente à long terme. La décision doit se prendre au cas par cas, en fonction du potentiel de régénération et des enjeux de sécurité. Le débat reflète les différentes priorités des acteurs, mais tous insistent sur la nécessité de repenser la sylviculture de crise pour anticiper les dépérissements à venir.

Pour aller plus loin, il serait intéressant de comparer l'efficacité des différentes stratégies de diversification sylvicole, en expérimentant chaque scénario sur une parcelle distincte : des parcelles orientées uniquement vers la régénération naturelle en laissant le bois mort avec une intervention minimale, des parcelles replantées avec des espèces diversifiées, ainsi que des parcelles suivant une stratégie mixte, favorisant d'abord la régénération spontanée puis complétée par des plantations ciblées en îlots. L'enjeu est de mesurer quelles stratégies conduisent à une meilleure diversité et à une plus grande résilience de la forêt. Il existe encore peu de dispositifs d'expérimentation sur les stations de moyenne montagne, où les retours d'expérience comparatifs sont rares (Dobor et al., 2020). Nous savons maintenant que les forêts plus diversifiées sont plus résilientes face aux facteurs climatiques, mais de tels essais permettront également de déterminer quels mélanges locaux s'adaptent le mieux aux stations, tout en restant économiquement viables pour l'industrie du bois.

Les résultats de l'étude cartographique doivent toutefois être interprétés en tenant compte des limites méthodologiques. Sur le plan de la télédétection, des contraintes techniques ont orienté et restreint les analyses. Le modèle automatisé FORDEAD de détection précoce des dépérissements par séries temporelles Sentinel-2, initialement envisagé, n'a pu être utilisé malgré de multiples tentatives. Il en résulte que certains changements subtils ou localisés ont pu échapper à la détection, ou, au contraire, que certaines anomalies observées intègrent une part de variation non liée à un dépérissement réel. Pour l'approche qualitative, les entretiens et échanges réalisés étaient en grande partie informels et exploratoires, ce qui peut créer un biais de sélection ou d'interprétation. Pour aller plus loin, il serait pertinent d'augmenter l'échantillon

des acteurs forestiers et de mener des entretiens semi-directifs, fondés sur des thèmes plus précis, permettant une analyse thématique plus approfondie.

Adapter la forêt de Belledonne est nécessaire face à l'incertitude du climat futur. Si les recommandations sylvicoles proposées peuvent être appliquées en accompagnant les forêts vers une futaie irrégulière, la diversification des essences et la restauration de structures irrégulières devraient accroître la résilience écologique des peuplements (O'Hara, 2016). Des forêts mélangées comportant une mosaïque d'essences feuillues et résineuses aux réponses complémentaires auront statistiquement plus de chances de résister aux aléas : là où une essence donnée souffrira (comme l'épicéa sous sécheresse ou le frêne face à la chalarose), les espèces plus tolérantes continueront de jouer leur rôle de soutien au peuplement.



## Références bibliographiques :

Archives nationales du monde du travail. (s.d.). Mines et mineurs de charbon : L'exploitation du charbon – Utilisation du charbon. Archives nationales du monde du travail. <https://archives-nationales-travail.culture.gouv.fr/Decouvrir/Expositions/Expositions-virtuelles/Mines-et-mineurs-de-charbon/L-exploitation-du-charbon/La-production-de-charbon/Utilisation-de-charbon>

Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R., Schöner, W., Ungersböck, M., Matulla, C., Briffa, K. R., Jones, P. D., Efthymiadis, D., Brunetti, M., Nanni, T., Maugeri, M., Mercalli, L., Mestre, O., Moisselin, J.-M., Begert, M., ... Nieplova, E. (2007). HISTALP – Historical instrumental climatological surface time series for the Greater Alpine Region. *International Journal of Climatology*, 27(1), 17–46. <https://doi.org/10.1002/joc.1377>

Boutefeu, B. (2005). L'aménagement forestier en France : à la recherche d'une gestion durable à travers l'histoire. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, 6(2). <https://doi.org/10.4000/vertigo.4446>

Buras, A., Rammig, A., & Zang, C. S. (2021). The European Forest Condition Monitor: Using remotely sensed forest greenness to identify hot spots of forest decline. *Frontiers in Plant Science*, 12, Article 689220. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.689220>

Castelli, M. (2021). Evapotranspiration changes over the European Alps: Consistency of trends and their drivers between the MOD16 and SSEBop algorithms. *Remote Sensing*, 13(21), 4316. <https://doi.org/10.3390/rs13214316>

Centre national de la propriété forestière (CNPf). (2008). Guide pour les forêts des massifs de Belledonne et du Grand Arc : Identifier les stations forestières de Rhône-Alpes (Synthèse pour les Alpes du Nord et les montagnes de l'Ain). CNPF. [https://auvergnerhonealpes.cnpf.fr/sites/socle/files/cnpf-old/405193\\_guide\\_belledonne\\_2008\\_bd\\_1\\_1.pdf](https://auvergnerhonealpes.cnpf.fr/sites/socle/files/cnpf-old/405193_guide_belledonne_2008_bd_1_1.pdf)

Combes, M., Webber, J., & Boddy, L. (2024, 6 août). Current understanding and future prospects for ash dieback disease with a focus on Britain. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 97(5), 678–691. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpae040>

Département de l'Isère. (2019). Chroniques d'Archives, numéro 32. Archives départementales de l'Isère. [https://archives.isere.fr/sites/isere-archives-fr/files/inline-files/chronique-v4\\_reduit.pdf](https://archives.isere.fr/sites/isere-archives-fr/files/inline-files/chronique-v4_reduit.pdf)

Devèze, M. (1966). Les forêts françaises à la veille de la Révolution. *Revue d'Histoire Moderne & Contemporaine*, 13(4), 241–272. <https://doi.org/10.3406/rhmc.1966.2921>

Dobor, L., Hlasny, T., Rammer, W., Zimová, S., Barka, I., & Seidl, R. (2020). Is salvage logging effectively dampening bark beetle outbreaks and preserving forest carbon stocks? *Journal of Applied Ecology*, 57(1), 67–76. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13518>

Espace Belledonne. (s.d.). Forêt et filière bois. <https://espacebelledonne.fr/foret-filiere-bois/>

Gadoud, M. (1917). Les forêts du Haut Dauphiné à la fin du XVII<sup>e</sup> siècle et de nos jours. *Recueil des travaux de l'institut de géographie alpine*, 5(1), 1–113. <https://doi.org/10.3406/rga.1917.4702>

Gaudin, S. (1996). Quelques éléments d'histoire forestière et généralités sur la... (D32 – Historique et état des forêts en France et dans le monde). BTSA Gestion Forestière. <https://www.sylvaingaudin.fr/PDF/Histoire.pdf>

Gouvernement de la République française. (2025, 2 mai). Décret n° 2025-401 du 2 mai 2025 relatif à l'aide au renouvellement forestier (article D. 156-11 et suivant, Code forestier). Journal officiel de la République française. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000051550563>

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2023). Changements climatiques 2023 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au sixième rapport d'évaluation. GIEC. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>

Hagimont, S. (2021, 12 mai). Exploiter et protéger une ressource « naturelle » : la forêt française depuis Colbert. Encyclopédie d'histoire numérique de l'Europe (EHNE). ISSN 2677-6588. <https://ehne.fr/fr/eduscol/terminale-hggsp/exploiter-et-protoger-une-ressource-naturelle-la-foret-francaise-depuis-colbert>

Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, L., Chini, L., Justice, C. O., & Townshend, J. R. G. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342(6160), 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>

Jakoby, O., Lischke, H., & Wermelinger, B. (2019). Climate change alters elevational phenology patterns of the European spruce bark beetle (*Ips typographus*). *Global Change Biology*, 25(12), 4048–4063. <https://doi.org/10.1111/gcb.14766>

Jonášová, M., & Prach, K. (2004). Central-European mountain spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) forests: Regeneration of tree species after a bark beetle outbreak. *Ecological Engineering*, 23(1), 15–27. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2004.06.010>

Ménot, R.-P. (1988). An overview of the geology of the Belledonne Massif (external crystalline massifs of the Western Alps). *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 68(3), 531–542. <https://www.researchgate.net/publication/257921170>

Office national des forêts (ONF). (s.d.). La grande Histoire des forêts (#Episode 6) – Se relever de la Seconde Guerre mondiale avec le Fonds forestier national. ONF. <https://www.onf.fr/onf/la-grande-histoire-des-forets-episode-se-relever-de-la-seconde-guerre-avec-le-fonds-forestier-national.html>

Office national des forêts (ONF). (2022, 20 juillet). Restauration des terrains en montagne : l'ONF en mission contre les avalanches. ONF. <https://www.onf.fr/vivre-la-foret/comprendre-la-foret/restauration-des-terrains-en-montagne/les-enjeux/lonf-en-mission-contre-les-avalanches.html>

Office national des forêts (ONF). (2023). La recherche à l'ONF : détecter plus tôt le dépérissement avec FORDEAD. ONF. <https://www.onf.fr/vivre-la-foret/la-recherche-lonf.html>

Office national des forêts (ONF). (2025). En forêt, la crise des scolytes s'accélère partout en France. ONF. <https://www.onf.fr/vivre-la-foret/comprendre-la-foret/foret-et-changement-climatique/les-dangers-qui-menacent-la-foret/en-foret-la-crise-des-scolytes-saccelere-partout-en-france.html>

O'Hara, K. L. (2016). What is close-to-nature silviculture in a changing world? *Forestry*, 89(1), 1–6. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpv043>

Oury, B. (2020). Exploitation du fer et gestion des ressources forestières en Dauphiné médiéval : enquête dans les sources historiques. *Histoire & Sociétés Rurales*, 54(2), 71–115. <https://doi.org/10.3917/hsr.054.0071>

Pretzsch, H., Forrester, D. I., & Buhus, J. (2017). *Mixed species forests: Ecology and management*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54553-9>

Saintonge, F.-X., Gillette, M., Blaser, S., Queloz, V., & Leroy, Q. (2021). Situation et gestion de la crise liée aux scolytes de l'Épicéa commun fin 2021 dans l'est de la France, en Suisse et en Wallonie. *Revue forestière française*, 73(6), 619–641. <https://doi.org/10.20870/revforfr.2021.7201>

Senf, C., Buras, A., Zang, C. S., Rammig, A., & Seidl, R. (2020). Excess forest mortality is consistently linked to drought across Europe. *Nature Communications*, 11, Article 6200. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19924-1>

Ténot, S. (1919). Le massif de Belledonne. Étude de géographie humaine. *Recueil des travaux de l'institut de géographie alpine*, 7(4), 601–689. <https://doi.org/10.3406/rga.1919.4760>

Viallet, H., Védrières, J., & Wahl, C. (2018). Archives du haut fourneau et des forges d'Allevard avant 1842 : Répertoire numérique de la sous série 94 J [Manuscrit]. Archives départementales de l'Isère. [https://archives.isere.fr/sites/isere-archives-fr/files/inline-files/94J\\_vd.pdf](https://archives.isere.fr/sites/isere-archives-fr/files/inline-files/94J_vd.pdf)

## Table des figures

Figure 1 : Carte de localisation du massif de Belledonne

Figure 2 – Localisation des quatre communes cibles de l'étude (Sainte-Agnès, Saint-Mury-Monteymond, Laval-en-Belledonne et Les Adrets)

Figure 3 : Carte de Cassini recouvrant les 4 communes cibles (XVIII<sup>e</sup> siècle)

Figure 4 : Carte d'état-major recouvrant les 4 communes cibles (XIX<sup>e</sup> siècle)

Figure 5 : Photographie aérienne recouvrant les 4 communes cibles (IGN, 1952)

Figure 6 : moyenne interannuelle NDVI 2017-2023 recouvrant les 4 communes cibles

Figure 7 : Anomalies de végétation en juillet 2023 par rapport à la moyenne 2017–2022 (indice NDVI)

Figure 8 : Perte de surface forestière cumulée entre 2000 et 2024 (données Hansen/UMD)

Figure 9 : Croisement des classes d'anomalie NDVI négative (rouge : forte diminution, orange : diminution modérée) avec la cartographie des formations végétales du massif.

## Table des tableaux

Tableau 1 : Tableau regroupant les avis des acteurs rencontrés

## Table des photographies

Photographie 1 – Parcelle d'épicéas dépérissants sur le versant occidental de Belledonne (commune de Laval-en-Belledonne)) Photographie personnelle, 2025

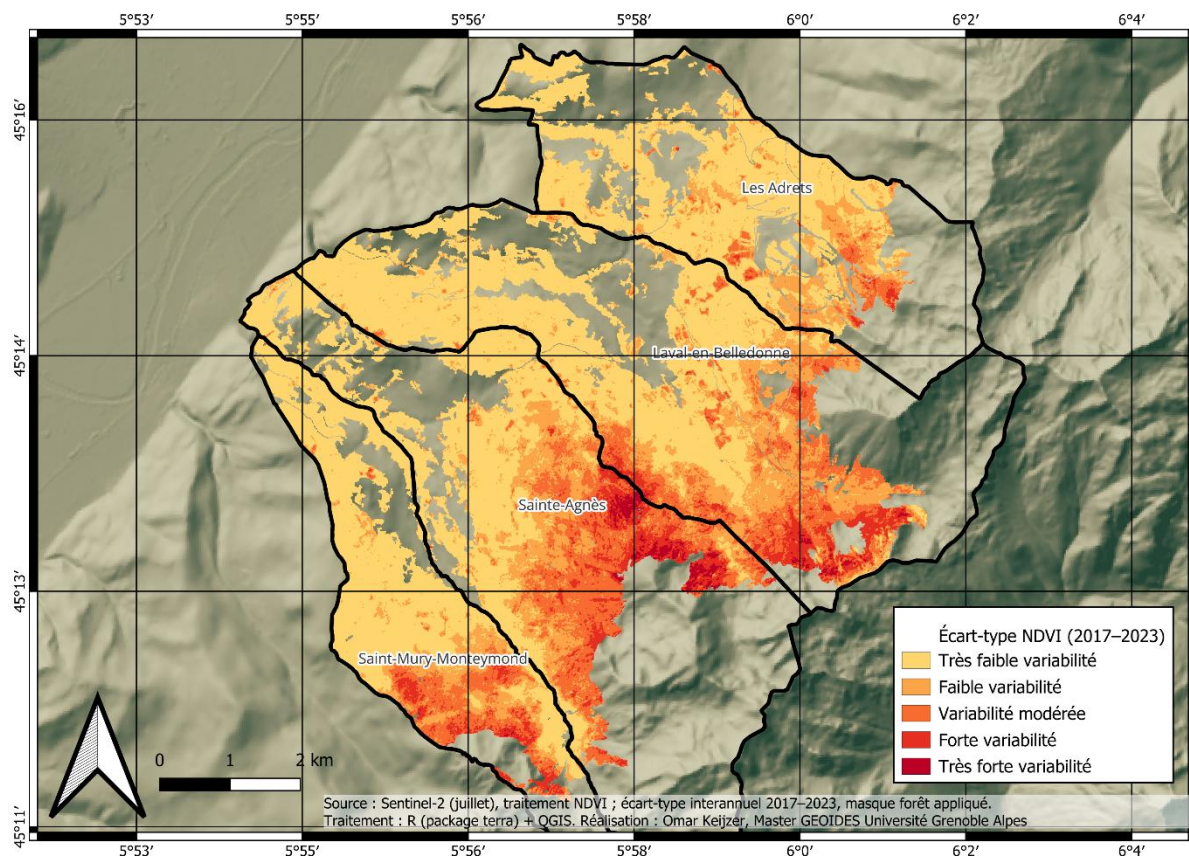
Photographie 2 – Régénération naturelle sous couvert d'épicéas dépérissants (commune de Laval-en-Belledonne) Photographie personnelle 2025

## Annexes

Annexe 1

Carte de l'écart-type NDVI interannuel entre 2017 et 2023

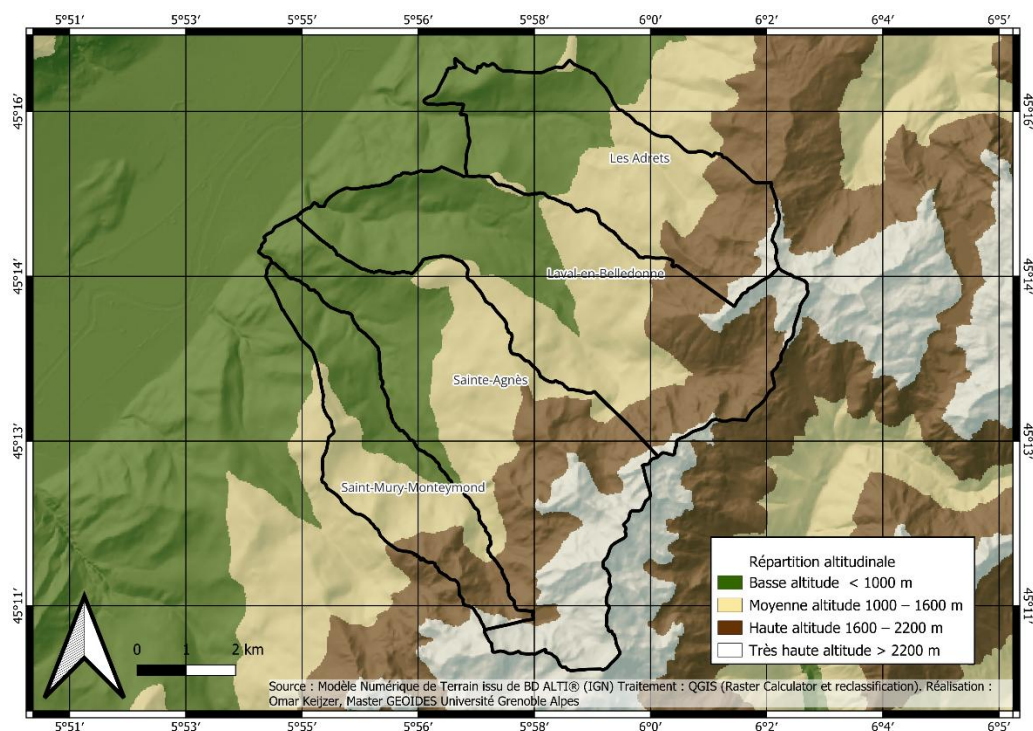




La carte de l'écart-type NDVI interannuel révèle la variabilité naturelle du NDVI, cette carte a pour objectif de contextualiser et de valider la carte des anomalies de végétation. Une baisse importante du NDVI dans une zone à faible variabilité constitue un signal significatif d'un dépérissement, tandis qu'une variation dans une zone à forte variabilité naturelle peut refléter un bruit saisonnier ou climatique et donc le résultat peut être mis en cause. Chaque pixel y représente l'amplitude des fluctuations du NDVI entre les années, permettant d'identifier les zones historiquement stables (écart-type faible) ou, au contraire, instables (écart-type élevé) cette carte permet d'exprimer si les données sont fiables. Par croisement visuel avec la carte des anomalies NDVI 2023, on constate que certaines zones de forte baisse de NDVI coïncident avec des secteurs historiquement stables (écart-type faible) ses données sont donc fiable. Nous voyons néanmoins que cette variabilité est particulièrement marquée dans les secteurs d'altitude, notamment en crête et dans les milieux ouverts. Dans ces cas, le signal doit être interprété avec prudence, plusieurs facteurs expliquent ce comportement : la phénologie alpine est fortement influencée par la variabilité interannuelle du climat, en particulier la date de déneigement. Un couvert neigeux persistant jusqu'à début juillet peut fortement abaisser le NDVI certaines années, tandis qu'un déneigement précoce permet à la végétation de se développer plus tôt, induisant des valeurs plus élevées. En parallèle, la présence de milieux semi-ouverts (landes, pelouses, interfaces forêt-prairie) et les effets atmosphériques (brumes, nuages résiduels) renforcent cette variabilité dans les zones de haute altitude.

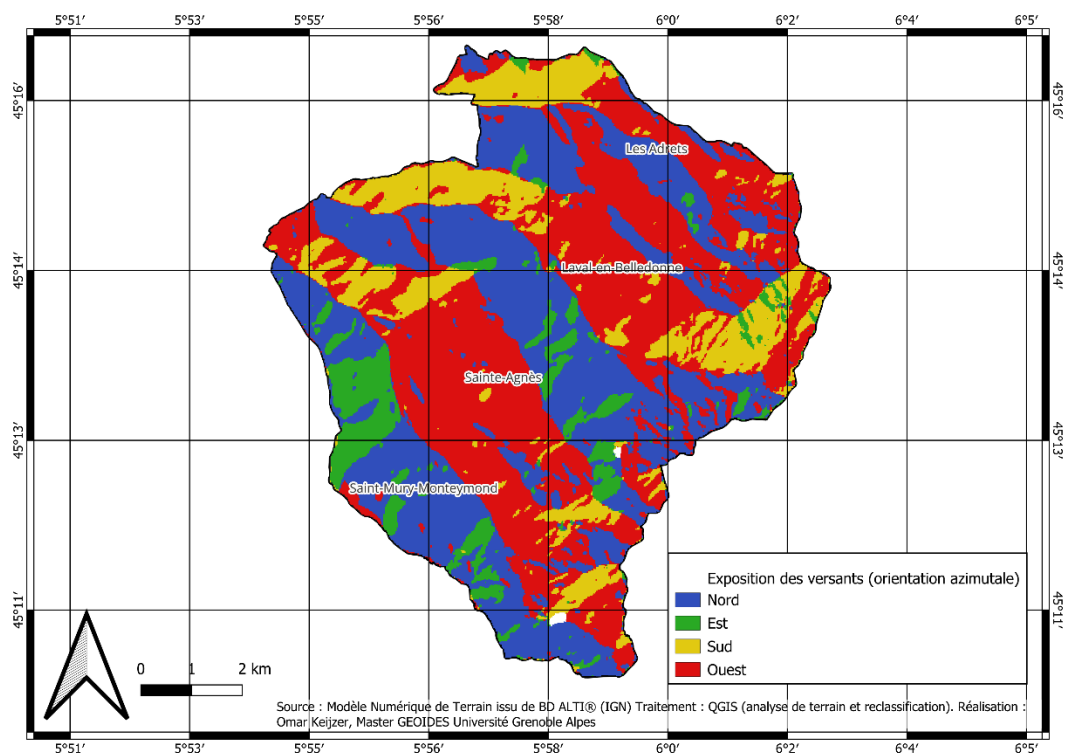
Annexe 2 :

## Carte de la répartition altitudinale recouvrant les 4 communes cibles



## Annexe 3 :

### Carte de l'exposition des versant recouvrant les 4 communes cibles



#### Annexe 4 :

#### Carte géologique des quatre communes cibles (données BRGM)

