ENS de Lyon

PLR 2

Rapport de stage

Cartographie des éléments boisés dans le Champsaur

Étudiant :	Sébastien Vivier
Structure d'accueil :	Laboratoire d'écologie alpine
Tuteur de stage :	Sandra Lavorel
Période :	du 02 mars 2026 au 03 juillet 2026

Année universitaire 2025–2026

Résumé

Les haies fournissent de nombreux services écosystémiques, notamment en lien avec la biodiversité, la régulation du microclimat, la séquestration du carbone et le fonctionnement hydrologique des sols. Pour étudier l'influence de la structuration du bocage et des occupations du sol actuelles et passées sur ces services dans le Champsaur, il est nécessaire de disposer d'une cartographie aussi fidèle que possible des éléments boisés du territoire.

Ce travail propose une méthode de cartographie diachronique du bocage champsaurien, à partir d'une référence actuelle construite avec des données d'occupation du sol, de hauteur de végétation et de parcelles agricoles, puis à partir d'orthophotographies anciennes et récentes. Les éléments boisés sont d'abord détectés, puis vectorisés et classés en haies, forêts et autres éléments boisés. Les résultats permettent de décrire la structure actuelle du bocage, de comparer son évolution entre plusieurs périodes et de mettre en évidence des secteurs présentant des densités de haies ou des trajectoires temporelles contrastées.

Cette approche montre que le bocage reste une composante importante du paysage champsaurien, mais que sa structure varie fortement selon les secteurs. Elle met également en évidence des dynamiques temporelles différenciées, notamment des suppressions de haies entre les périodes anciennes et un épaississement progressif de nombreux éléments boisés dans les périodes récentes. Les cartes produites permettent enfin de proposer plusieurs zones d'intérêt pour l'échantillonnage de terrain, représentatives de différents états et dynamiques du bocage.

Table des matières

Résumé **i**

0.1 Introduction 1
0.2 Méthodes 4
0.2.1 Zone d'étude 4
0.2.2 Jeux de données 5
0.2.3 Modélisation des éléments boisés à partir d'orthophotos 8
0.2.4 La structuration des éléments boisés et sa dynamique en fonction du temps 11
0.3 Résultats 14
0.3.1 Construction de la référence actuelle 14
0.3.2 Évaluation des modèles de segmentation 15
0.3.3 Cartographie des éléments boisés en fonction du temps 17
0.3.4 Vectorisation et classification des éléments boisés 19
0.3.5 Évaluation de la structuration des éléments boisés 20
0.3.6 Métriques paysagères 21
0.4 Discussion 28
0.4.1 Intérêts et limites de l'approche méthodologique 28
0.4.2 Le bocage champsaurien actuel 30
0.4.3 Dynamiques du bocage champsaurien 31
0.4.4 Suggestions de zones d'échantillonnage pour les mesures de terrain . 31
0.5 Conclusion 33

Table des figures

1 Bilan synthétique de la méthode de cartographie et d'analyse diachronique du bocage. 3
2 Localisation de la zone d'étude dans le Champsaur. 5
3 Référence actuelle d'occupation du sol construite à partir de COSIA, du MNH LiDAR, du RPG et de la BD TOPO. En vert foncé figurent les éléments boisés, en bleu les zones hydrologiques, en noir les routes et les zones urbaines ; les autres couleurs représentent différentes cultures. 15
4 Comparaison spatiale entre la prédiction DINOv2 2022 et la référence actuelle. En vert les zones COSIA/DINOv2 en accord boisé, en blanc les zones COSIA/DINOv2 en accord non boisé, en rouge les zones DINOv2 boisé/COSIA non boisé, en bleu les zones DINOv2 non boisé/COSIA boisé. 17
5 Exemple de cartographie diachronique des éléments boisés sur une même emprise locale. 18
6 Exemple de vectorisation et de classification des éléments boisés sur une même emprise locale pour quatre périodes (1950-1965 ; 2000-2005 ; 2015 ; 2022). En orange les éléments boisés classés comme haie, en violet les forêts et en vert les autres éléments boisés. 19
7 Évolution relative des métriques paysagères globales calculées à l'échelle de la zone d'étude, exprimées en indice base 100 en 1950–1965. 22
8 Évolution relative des métriques paysagères globales sans les périodes 2000–2005 et 2006–2010, exprimées en indice base 100 en 1950–1965. 23
9 Cartes des métriques locales liées aux haies pour chaque période : linéaire local, taux de recouvrement et largeur moyenne, calculés par fenêtre mobile de 250 m. 24
10 Cartes des surfaces locales de haies et de forêt pour chaque période. 25
11 Comparaisons temporelles des métriques locales pour trois trajectoires : 1950–1965 à 1965–1980, 1965–1980 à 2022 et gradient total 1950–1965 à 2022. Chaque ligne présente le taux de recouvrement des haies, la surface de haies et la surface de forêt. 27
12 Carte du grain bocager actuel dérivée de la référence `COSIA_MNH_RPG.tif`. Le bleu correspond au grain fin, le vert au grain fonctionnel, le jaune au grain potentiel et le blanc au grain ouvert. 28
13 Localisation des trois zones proposées pour l'échantillonnage de terrain. . . 32

14 Zoom sur la zone 1, représentative d'un secteur de faible densité de haies. Les haies de 2022 sont représentées en orange. 32
15 Zoom sur la zone 2, représentative d'un secteur de forte densité de haies. Les haies de 2022 sont représentées en orange. 33
16 Zoom sur la zone 3, où plusieurs haies disparaissent entre 1950–1965 et 1965–1980. Les haies de 2022 sont représentées en orange et les haies de 1950–1965 en rouge. 33

Liste des tableaux

1 Principaux jeux de données testés ou mobilisés pour construire la référence actuelle d'occupation du sol. 6
2 Principales corrections apportées lors de la construction de la référence actuelle. 14
3 Comparaison des performances du U-Net et de DINOv2 pour la segmentation boisée/non boisée. 16
4 Comparaison spatiale entre la prédiction DINOv2 2022 binarisée et la référence actuelle `COSIA_MNH_RPG.tif`. 16
5 Part de pixels boisés dans les prédictions retenues par période. 18
6 Nombre d'objets vectoriels produits par classe et par période après structuration des éléments boisés. 20
7 Correspondance entre la couche produite pour 2006–2010 et le référentiel IMEP 2011, basé sur une photographie aérienne de 2009. Les haies sont évaluées en longueur avec une tolérance spatiale de 6 m ; les bois sont évalués en surface d'intersection. 21
8 Métriques paysagères globales calculées à l'échelle de la zone d'étude. . . . 21
9 Répartition des classes de grain bocager sur l'emprise valide du raster. . . . 26

0.1 Introduction

La biodiversité et les écosystèmes en bonne santé jouent un rôle essentiel dans les services écosystémiques [1, 2] : régulation du climat, des nutriments et du cycle hydrologique, indispensables à la durabilité des systèmes alimentaires et à la santé. La perte de biodiversité et les changements climatiques s'aggravent mutuellement, affectant la résilience des écosystèmes et toutes les composantes du nexus biodiversité-climat-eau-alimentation-santé [3]. Pour répondre à ces crises, une approche intégrée est nécessaire, dépassant le fonctionnement en silos des institutions actuelles. Les Solutions fondées sur la Nature (SfN), actions de conservation, restauration et gestion durable des écosystèmes apportant des bénéfices face aux défis sociétaux [4], offrent une réponse intégrée, en traitant simultanément les crises globales [5, 3].

Le secteur agricole illustre particulièrement ces enjeux, étant à la fois une source de pressions environnementales et de solutions pour le nexus. Parmi les SfN applicables en contexte agricole, les réseaux de haies bocagères sont reconnus pour leurs bénéfices sur la biodiversité : amélioration des services de pollinisation et de régulation des ravageurs, bien documentés dans la littérature [6, 7], ce qui justifie les soutiens publics actuels (PAC 2023-2027, « Pacte en faveur de la haie »). Cependant, leurs effets potentiels sur le système climatique et hydrologique (régulation du microclimat, séquestration du carbone, régulation du cycle hydrologique) restent à ce jour très peu quantifiés, et sont quasi absents des politiques publiques actuelles. La littérature en agroforesterie suggère pourtant un fort potentiel : les structures ligneuses pourraient atténuer les températures extrêmes, enrichir les sols en carbone et réguler l'humidité [8, 9], des fonctions particulièrement précieuses face à la recrudescence des sécheresses liées au changement climatique.

À ces lacunes thématiques s'ajoutent deux angles morts méthodologiques qui compliquent la quantification de ces services à l'échelle du paysage. Les processus spatiaux sont peu intégrés dans les modèles existants, notamment les effets de bordure près des éléments boisés [10], qui modulent pourtant la fourniture de services à l'échelle paysagère [11]. De plus, les effets rémanents des usages passés des sols sur la capacité actuelle des haies à fournir ces services [12, 13, 14] n'ont jamais été pris en compte dans les analyses de scénarios futurs d'adaptation au changement climatique. Ces deux dimensions (effets spatiaux et héritage des usages) constituent des angles morts qui limitent la compréhension fondamentale des dynamiques écologiques ainsi que la robustesse des projections et des recommandations destinées aux gestionnaires de territoires.

Ce stage s'inscrit dans un projet plus large visant à quantifier les bénéfices multiples fournis par les réseaux de haies bocagères, en mettant l'accent sur la régulation du microclimat, la séquestration du carbone dans la végétation et les sols, ainsi que la régulation de l'humidité des sols. L'objectif général du projet est d'évaluer ces services écosystémiques à l'échelle du paysage, en intégrant leur dimension spatiale, les héritages des usages passés et les trajectoires futures sous différents scénarios de changement global. Dans ce cadre, la cartographie actuelle et passée des éléments boisés constitue une étape préalable essentielle : elle permet de décrire la structure du bocage, de documenter son évolution et de

fournir une base spatialisée aux analyses écologiques ultérieures.

Ce projet vise plus précisément à répondre aux questions de recherche suivantes :

— Comment la structure, la composition et le maillage spatial des haies influencent-ils la séquestration du carbone et la régulation de l'humidité des sols, via leurs effets sur le microclimat et la matière organique ?

— Comment l'histoire des usages des sols influence-t-elle la capacité actuelle des haies à fournir ces services ?

— Comment ces services évolueront-ils sous différents scénarios de changement d'usage des sols et de climat, et quelles configurations paysagères permettent de les optimiser ?

Ce rapport présente donc la construction d'une cartographie diachronique des éléments boisés du Champsaur, zone d'étude du projet. Les jeux de données produits doivent servir, d'une part, à la conception du dispositif d'échantillonnage de terrain, en permettant de stratifier les sites de mesure selon des gradients de complexité bocagère et d'histoire d'usage des sols. Ils doivent aussi fournir une cartographie fine pour la modélisation des services écosystémiques à l'échelle du territoire.

Le Champsaur a déjà fait l'objet de plusieurs travaux sur le bocage. À la fin des années 1990 et au début des années 2000, des études ont établi une première typologie des haies et analysé la structuration de la végétation ligneuse dans ce système bocager de montagne. Ces travaux reposaient principalement sur des relevés de terrain, accompagnés d'une localisation précise sur fond cadastral afin de permettre un traitement dans un système d'information géographique (SIG). Une autre approche a été menée en 2011 par des étudiants de master, à partir de photo-interprétation : les haies et les forêts ont été cartographiées manuellement à partir d'une photographie aérienne du Champsaur.

Ces approches produisent une cartographie fine des éléments boisés, mais elles demandent un temps de travail important lorsque l'emprise étudiée devient vaste. À titre d'exemple, la cartographie manuelle d'une surface d'environ 63 km^2, découpée en 28 mailles de 1,5 km par 1,5 km, a nécessité environ 5 h de vectorisation par maille. Les outils informatiques et les données aujourd'hui disponibles permettent d'envisager une approche complémentaire, plus rapide et potentiellement généralisable à d'autres territoires. L'objectif de ce travail est donc de tester une chaîne de traitement permettant de cartographier automatiquement les éléments boisés à partir d'orthophotographies anciennes et récentes, puis de structurer ces éléments en classes paysagères telles que les haies, les forêts et les autres éléments boisés, afin d'étudier le maillage et la structure du bocage champsaurien dans le temps.

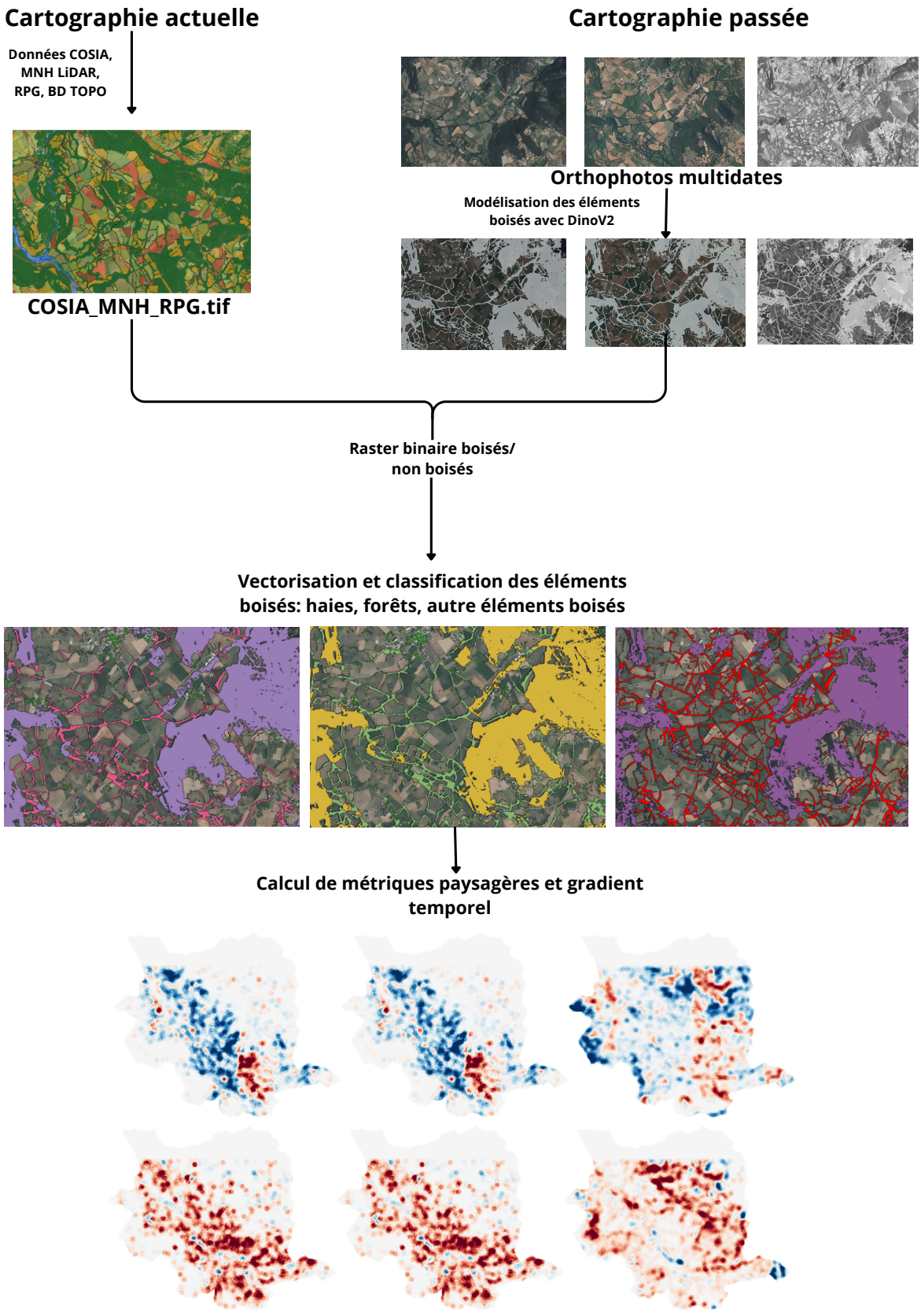


FIGURE 1 – Bilan synthétique de la méthode de cartographie et d'analyse diachronique du bocage.

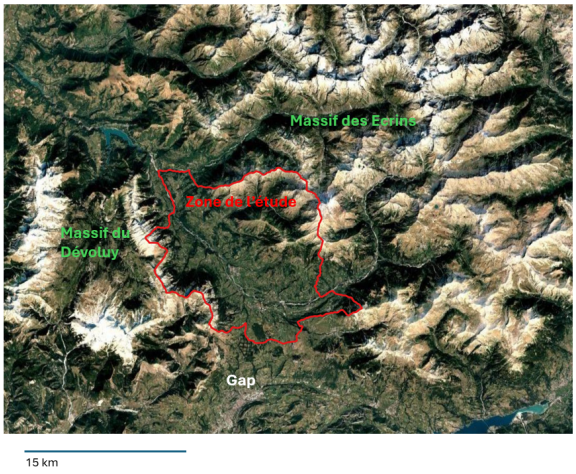
0.2 Méthodes

0.2.1 Zone d'étude

Le Champsaur est une petite région de montagne située dans le nord des Hautes-Alpes, à la frontière entre les Alpes du Nord et les Alpes du Sud. Cette vallée en forme de croissant, avec une altitude moyenne de 1 100 m, s'étend d'est en ouest dans sa partie haute, puis du sud vers le nord en longeant le massif du Vieux Chaillol. Elle est traversée par le Drac, un torrent formé par la réunion du Drac Blanc et du Drac Noir, qui prennent leur source dans le Haut Champsaur. Large et favorable à l'agriculture, la vallée est encadrée par plusieurs reliefs : le massif des Écrins au nord et à l'est (culminant à 3 163 m au Vieux Chaillol), les falaises du Dévoluy à l'ouest (2 140 m au Pic de l'Aiguille), et les cols de Manse et de Bayard au sud, qui forment une frontière climatique notable. Au nord, la vallée se resserre au niveau du lac artificiel du Sautet, construit en 1935, marquant la limite avec le département de l'Isère. Le Champsaur regroupe plusieurs hautes vallées (le Valgaudemar, Orcières, Champoléon et Molines-en-Champsaur) ainsi qu'une zone centrale appelée le moyen Champsaur, qui constitue le cœur de cette étude. La zone d'étude a été définie à partir de quatorze communes du Champsaur central : Aubessagne (05039), Buissard (05025), Chabottes (05029), La Fare-en-Champsaur (05054), Forest-Saint-Julien (05056), Laye (05072), La Motte-en-Champsaur (05090), Le Noyer (05095), Poligny (05104), Saint-Bonnet-en-Champsaur (05132), Saint-Julien-en-Champsaur (05147), Saint-Laurent-du-Cros (05148), Saint-Léger-les-Mélèzes (05149) et Saint-Michel-de-Chaillol (05153). Saint-Bonnet-en-Champsaur en constitue le principal bourg et fait office de capitale économique locale. L'habitat y est organisé en hameaux et villages. Les hautes vallées environnantes, bien que situées en dehors du périmètre d'étude, jouent un rôle important grâce à leurs alpages, essentiels pour l'agriculture locale. Le Champsaur fait par ailleurs partie des six vallées du Parc National des Écrins. Les photos aériennes de la zone d'étude sont présentées à la figure 2.



Localisation générale



Emprise de la zone d'étude

FIGURE 2 – Localisation de la zone d'étude dans le Champsaur.

0.2.2 Jeux de données

Données d'occupation du sol

Afin de disposer d'une référence actuelle pour la cartographie des éléments boisés, plusieurs sources d'occupation et de couverture du sol ont été comparées (tableau 1). Les jeux de données d'occupation du sol généralistes (COSIA, EUSALP, OSO Theia, Corine Land Cover et ESA WorldCover) ont d'abord été exam et leur capacité à représenter les structures fines du paysage. Des jeux de données décrivant plus directement le recouvrement vertical ou arboré, notamment le MNH issu du LiDAR et FORMS-H, ont ensuite été testés pour améliorer la détection des éléments boisés. Enfin, des données thématiques plus spécialisées, en particulier la BD TOPO et le Registre parcellaire graphique (RPG), ont été utilisées pour préciser certaines classes dont la représentation est importante pour l'analyse paysagère.

TABLE 1 – Principaux jeux de données testés ou mobilisés pour construire la référence actuelle d'occupation du sol.

Nom	Source	Description	Avantages	Limites pour cette étude
COSIA	IGN	Occupation du sol à grande échelle produite par intelligence artificielle à partir de données IGN. Donnée vectorielle disponible par millésime, utilisée ici pour 2022 puis rasterisée sur une grille de 2 m.	Très bonne résolution spatiale ; meilleure base disponible pour l'occupation du sol à l'échelle de la zone d'étude ; nomenclature plus adaptée aux objets fins que les produits satellitaires généralistes ; cohérence avec les autres référentiels IGN.	Les éléments boisés fins peuvent présenter des erreurs ; le jeu de données ne suffit pas seul pour cartographier précisément les éléments boisés. Les classes agricoles restent générales et nécessitent un affinement par le RPG.
EUSALP LULC 2020	EUSALP	Carte d'occupation du sol de l'arc alpin, disponible dans le projet sous forme raster à 5 m pour l'année 2020.	Résolution relativement fine et contexte géographique proche des milieux alpins.	Résolution moins intéressante que COSIA pour l'objectif de cartographie fine ; représentation moins précise des zones urbaines.
OSO Theia	Theia	Carte annuelle d'occupation des sols de la France métropolitaine, issue principalement de séries temporelles Sentinel-2, à résolution décamétrique.	Produit homogène à l'échelle nationale ; bonne fréquence temporelle ; utile pour comparer les grandes classes agricoles, forestières et urbaines.	Résolution moins intéressante que COSIA pour cette étude ; représentation moins précise des zones urbaines.
Corine Land Cover	Copernicus Land Monitoring Service	Inventaire européen d'occupation et d'usage du sol en 44 classes, mis à jour tous les six ans ; produit pensé pour une lecture continentale, avec une unité minimale de cartographie importante.	Très robuste pour replacer la zone d'étude dans un contexte européen et suivre les grandes tendances ; nomenclature stable.	Résolution spatiale trop faible pour une analyse paysagère fine ; les objets linéaires et les petites taches d'une classe sont généralisés ou absents.
ESA WorldCover	ESA	Carte mondiale d'occupation du sol à 10 m, produite à partir de données Sentinel-1 et Sentinel-2, avec des classes généralistes.	Couverture globale, résolution meilleure que Corine.	Nomenclature large ; résolution encore insuffisante pour cette étude.
FORMS-H / Global Canopy Height	ETH Zurich	Carte globale de hauteur de canopée 2020 à 10 m, estimée à partir de Sentinel-2 et de données GEDI. Dans le projet, elle est utilisée comme donnée de hauteur de végétation.	Apporte une information verticale directement liée au couvert arboré ; couverture continue et facilement comparable entre territoires.	Résolution de 10 m et estimation issue d'un modèle global ; moins fiable en contexte de forte topographie.
LiDAR-HD MNH	IGN	Modèle numérique de hauteur issu du programme LiDAR HD, acquis sur la zone en 2021. Les tuiles sources à 0,5 m ont été assemblées puis utilisées sur une grille de travail à 2 m.	Mesure fine de la hauteur au-dessus du sol, donc corrigée de la topographie ; très pertinente pour distinguer les éléments boisés.	Ne distingue pas directement arbres et bâtiments ; nécessite des règles de masquage et une combinaison avec l'occupation du sol.

Nom	Source	Description	Avantages	Limites pour cette étude
BD TOPO	IGN	Base vectorielle topographique de référence : routes, hydrographie, bâtiments, surfaces et objets thématiques.	Très utile pour stabiliser les routes et les éléments hydrographiques, et pour interpréter les discontinuités entre structures boisées.	Pas de limite majeure pour l'usage retenu ici, car seules les informations de routes et d'hydrographie sont mobilisées comme couches de correction.
RPG	IGN / Ministère de l'Agriculture	Registre parcellaire graphique : limites des parcelles agricoles déclarées à la PAC et codes de cultures associés, utilisé ici pour le millésime 2024.	Description fine des espaces agricoles ; plus précis que les classes agricoles généralistes de COSIA pour les cultures et prairies déclarées.	Ne couvre que les surfaces agricoles déclarées ; ne renseigne pas les autres occupations du sol ; décalage temporel possible avec COSIA 2022.

À l'issue de cette comparaison, le jeu de données final d'occupation du sol actuel a été construit à partir de COSIA, du MNH LiDAR, du RPG et de la BD TOPO. COSIA 2022 a été retenu comme base d'occupation du sol, car il constitue la donnée la plus précise et la plus complète disponible pour décrire les classes non boisées et l'organisation générale de la zone d'étude. La couverture boisée a été corrigée à partir du MNH LiDAR, qui apporte une information de hauteur des éléments boisés. Cette base a été rasterisée sur la grille du MNH LiDAR, afin de travailler à une résolution homogène de 2 m.

Les classes boisées de COSIA ont ensuite été corrigées à l'aide de la hauteur issue du MNH. Les pixels présentant une hauteur supérieure à 2 m ont été considérés comme compatibles avec un couvert arboré, tandis que les pixels classés comme boisés mais dont la hauteur était inférieure ou égale à ce seuil ont été réattribués à la classe non boisée voisine la plus proche. Ce seuil de 2 m a été retenu car il permet de conserver les éléments ligneux tout en limitant la confusion avec certaines cultures basses ou surfaces agricoles. À l'inverse, les pixels non boisés mais présentant une hauteur supérieure à 2 m ont été reclassés comme couvert arboré lorsque leur classe initiale ne correspondait pas à une surface bâtie, imperméable, en eau, enneigée ou à une serre. Cette étape est nécéssaire pour discrétiser les éléments boisés des batiments (le jeu de données LiDAR MNH cartographie tous les éléments qui dépassent de la surface du sol : éléments boisés et batiments).

Les espaces agricoles ont ensuite été affinés à partir du RPG, utilisé comme source prioritaire pour identifier les types de cultures et de parcelles agricoles. Cette correction permet de remplacer les classes agricoles plus générales de COSIA par une information plus précise lorsque les parcelles RPG sont disponibles, tout en conservant les classes boisées déjà corrigées. Enfin, certaines entités de la BD TOPO ont été appliquées en surcouche afin de stabiliser la représentation des éléments hydrologiques et des routes. Ces objets peuvent être partiellement recouverts par la végétation dans le MNH, mais leur présence reste nécessaire pour l'interprétation des structures boisées, par exemple pour distinguer deux haies séparées par une voie.

Le résultat de cette intégration est le raster `propre/data/processed/COSIA_MNH_RPG.tif`.

Il comporte une bande décrivant la classe d'occupation du sol finale et une bande indiquant la hauteur de canopée uniquement sur les pixels boisés. Ce jeu de données constitue la référence actuelle utilisée par la suite pour l'entraînement des modèles de segmentation et pour l'analyse de la structure paysagère actuelle.

Orthophotos

Les orthophotographies ont été utilisées comme source d'information principale pour cartographier les éléments boisés à différentes dates. Elles constituent le support des modèles de segmentation appliqués aux périodes passées.

Les images ont été récupérées à partir des services de l'IGN, notamment le produit *Remonter le temps*. Les périodes retenues sont : 1950–1965, 1965–1980, 2000–2005, 2006–2010, 2015, 2016–2020 et 2022. L'orthophotographie 2022 a été utilisée comme référence actuelle, car elle peut être comparée au jeu de données `COSIA_MNH_RPG.tif` construit précédemment.

Afin de rendre les différentes périodes comparables, les orthophotos ont été préparées sur une emprise commune correspondant à la zone d'étude. Elles ont été assemblées, reprojetées en Lambert-93, puis découpées selon le périmètre du Champsaur étudié.

La qualité des orthophotos varie toutefois fortement selon les périodes. Les images anciennes présentent une résolution plus faible, des contrastes différents, parfois une absence d'information couleur. Ces différences peuvent influencer la détection automatique des éléments boisés et justifient l'utilisation de traitements ou de modèles adaptés aux orthophotos anciennes.

0.2.3 Modélisation des éléments boisés à partir d'orthophotos

Afin de cartographier automatiquement les éléments boisés sur les différentes orthophotos, deux approches de segmentation ont été testées. La première repose sur l'entraînement supervisé d'un modèle U-Net à partir de l'orthophoto 2022 et du jeu de référence `COSIA_MNH_RPG.tif`. La seconde utilise le modèle High Resolution Canopy Height, fondé sur DINOv2, pour prédire une hauteur de canopée directement à partir des images aériennes. Dans les deux cas, l'objectif est de produire un raster binaire distinguant les pixels boisés des pixels non boisés.

Préparation des données d'entraînement

Le jeu `COSIA_MNH_RPG.tif` a été utilisé comme référence actuelle pour construire les masques d'entraînement. Les pixels ont été considérés comme boisés lorsqu'ils appartenaient aux classes boisées retenues et lorsque la hauteur de canopée issue du MNH était supérieure à 2 m. Les autres pixels situés dans l'emprise valide ont été classés comme non boisés.

Ce masque binaire a été aligné spatialement sur l'orthophoto 2022, puis l'image et le masque ont été découpés en tuiles. Les tuiles contenant une proportion trop faible de pixels

valides ont été écartées. Le jeu de tuiles restant a ensuite été séparé en sous-ensembles d'entraînement, de validation et de test. Cette séparation a été réalisée par blocs spatiaux, et non par tirage aléatoire pixel à pixel, afin de limiter la fuite spatiale entre les zones utilisées pour apprendre le modèle et celles utilisées pour l'évaluer.

Modèle U-Net

L'architecture U-Net est un réseau de neurones convolutifs conçu pour la segmentation sémantique, c'est-à-dire pour prédire une classe pour chaque pixel d'une image. Le modèle utilisé reçoit en entrée des tuiles orthophotographiques à trois bandes et produit en sortie une carte de logits à une bande correspondant à la probabilité d'appartenance à la classe boisée.

Un premier modèle a été entraîné sur les tuiles issues de l'orthophoto 2022 et du masque binaire dérivé de `COSIA_MNH_RPG.tif`. Afin de mieux prendre en compte les différences visuelles entre les orthophotos récentes et les orthophotos anciennes, des variantes d'entraînement ont également été testées sur des images de l'orthophoto 2022 dégradées. Ces variantes simulent la perte d'information couleur, la diminution de netteté et les contrastes plus faibles observés sur les périodes 1950–1965 et 1965–1980.

L'entraînement repose sur une fonction de perte définie comme la moyenne entre la Binary Cross-Entropy with Logits et la Dice Loss :

$$\mathcal{L} = \frac{\mathcal{L}_{BCE} + \mathcal{L}_{Dice}}{2}$$

Cette combinaison permet de tirer parti des avantages complémentaires des deux termes. La Binary Cross-Entropy stabilise l'apprentissage à l'échelle du pixel, tandis que la Dice Loss favorise le recouvrement entre les prédictions et les masques de référence, ce qui est utile lorsque les éléments boisés sont fragmentés ou minoritaires dans certaines tuiles.

Après entraînement, le modèle a été appliqué aux orthophotos préparées pour chaque période. L'inférence produit d'abord une carte continue de probabilité d'appartenance à la classe boisée, puis une carte binaire obtenue par seuillage. Cette distinction permet de conserver une information sur l'incertitude du modèle et de tester plusieurs seuils de décision selon les périodes.

Modèle High Resolution Canopy Height fondé sur DINOv2

Une seconde approche a été testée à partir du modèle High Resolution Canopy Height. Ce modèle s'appuie sur DINOv2, un modèle de vision par ordinateur fondé sur une architecture de type Vision Transformer et entraîné en auto-supervision sur un vaste ensemble d'images. Contrairement au U-Net, cette approche ne cherche pas directement à prédire une classe boisée/non boisée : elle estime d'abord une hauteur de canopée à partir de l'orthophotographie RGB.

La carte de hauteur obtenue a ensuite été convertie en carte binaire par seuillage. Les

pixels dont la hauteur prédite dépasse un seuil donné sont considérés comme boisés, tandis que les autres sont classés comme non boisés. Plusieurs seuils ont été testés pour chaque période, car la distribution des hauteurs prédites varie selon la qualité des orthophotos. Cette méthode permet donc de comparer une approche supervisée, entraînée sur la zone d'étude, avec une approche fondée sur un modèle pré-entraîné de hauteur de canopée.

Évaluation des prédictions

Les prédictions produites par les deux approches ont été évaluées à l'aide d'un jeu de points de contrôle interprétés manuellement. Pour chaque période, 500 points ont été sélectionnés par échantillonnage stratifié dans les classes boisée et non boisée, avec une distance minimale entre points afin de limiter la redondance spatiale. Chaque point a ensuite été interprété visuellement sur l'orthophoto correspondante. Les points jugés trop ambigus ont été exclus de l'évaluation.

Pour l'année 2022, cette évaluation ponctuelle a été complétée par une comparaison raster entre la sortie du modèle High Resolution Canopy Height fondé sur DINOv2 et le jeu de référence actuel `COSIA_MNH_RPG.tif`. Cette comparaison permet d'évaluer la cohérence spatiale entre la hauteur de canopée prédite à partir de l'orthophoto récente et les pixels boisés définis à partir de COSIA et du MNH LiDAR. Elle constitue ainsi une évaluation complémentaire à l'interprétation manuelle, car elle porte sur l'ensemble de la zone d'étude et non uniquement sur un échantillon de points.

Les performances ont été évaluées à partir de plusieurs indicateurs complémentaires : La précision, le rappel, le score F1, l'intersection over Union et la spécificité. La précision mesure, parmi les pixels prédits comme boisés, la part qui correspond effectivement à du boisé dans la référence ; elle renseigne donc sur les erreurs de commission, c'est-à-dire les faux boisements prédits par le modèle. Le rappel mesure, parmi les pixels réellement boisés dans la référence, la part qui est retrouvée par le modèle ; il renseigne donc sur les erreurs d'omission, c'est-à-dire les éléments boisés non détectés. Le score F1 combine précision et rappel en une seule valeur, afin d'évaluer le compromis entre ces deux types d'erreurs. L'Intersection over Union (IoU) compare la surface commune entre prédiction boisée et référence boisée à leur surface totale réunie ; elle est plus stricte que le F1 lorsque les erreurs spatiales sont nombreuses. Enfin, la spécificité mesure la capacité du modèle à reconnaître correctement les pixels non boisés, ce qui permet de vérifier que la bonne détection des éléments boisés ne se fait pas au prix d'une trop forte confusion avec les surfaces ouvertes, agricoles ou urbaines. Les seuils de binarisation du U-Net et du modèle High Resolution Canopy Height ont ensuite été comparés afin de retenir, pour chaque période, les prédictions les plus cohérentes avec l'interprétation manuelle.

0.2.4 La structuration des éléments boisés et sa dynamique en fonction du temps

Post-traitement pour l'évaluation de la structure des éléments boisés

Les cartes produites précédemment, qu'elles proviennent de la référence actuelle ou des modèles appliqués aux orthophotos, sont des rasters binaires indiquant uniquement la présence ou l'absence de pixels boisés. Ce format ne permet pas directement de décrire la structure paysagère. Le post-traitement a donc pour objectif de transformer ces pixels en objets spatiaux cohérents, puis de distinguer les haies des forêts, bosquets et autres éléments boisés. Il permet ainsi de produire une couche vectorielle classée, exploitable pour le calcul de métriques paysagères et comparable entre périodes afin que les changements observés reflètent autant que possible des évolutions du paysage, et non des différences de traitement.

La première étape consiste à identifier les objets boisés continus à partir du raster binaire. Les petits trous internes sont temporairement comblés afin d'éviter qu'une canopée localement discontinue soit artificiellement fragmentée. Les objets sont ensuite séparés selon leur morphologie. Les zones dont les bords opposés sont éloignés les uns des autres, et qui possèdent donc un cœur large, sont considérées comme des forêts. Les parties plus étroites, où la distance bord à bord reste faible, sont extraites comme des corridors boisés potentiels. Cette distinction repose sur l'idée qu'une haie se caractérise par une faible largeur relative et une extension linéaire, alors qu'un bois ou une forêt possède une surface plus compacte.

Une première classification permet ensuite de regrouper les corridors boisés potentiels en grandes catégories : corridors assimilables à des haies, corridors rattachés à des masses boisées, autres éléments boisés et objets restant ambigus. Certains corridors étroits peuvent être rattachés à une masse boisée lorsqu'ils correspondent davantage à une lisière ou à une excroissance de forêt qu'à une haie indépendante. À l'inverse, les objets fins, allongés ou isolés sont conservés comme candidats à la classe haie.

Les objets les plus complexes nécessitent un traitement spécifique, car une même composante boisée peut contenir plusieurs haies connectées entre elles ou connectées à un bois. Une partie de ces objets ambigus a donc été classée à l'aide d'un modèle supervisé entraîné sur des annotations manuelles réalisées sur la période 2022. Le modèle distingue les complexes de haies des complexes non assimilables à des haies à partir de métriques morphologiques et contextuelles. Les métriques morphologiques décrivent notamment la surface, le périmètre, la longueur dominante, la largeur moyenne, l'allongement, la compacité et la forme générale de l'objet. Les métriques contextuelles décrivent l'environnement immédiat de l'objet. Les objets situés majoritairement dans des contextes non agricoles ou fortement anthropisés sont écartés de la classe haie lorsque leur environnement rend cette interprétation peu pertinente, notamment au contact de zones urbaines ou de surfaces imperméables. Cette étape permet de traiter de façon plus systématique les objets qui n'appartiennent pas à des éléments boisés dans un contexte agricole.

La chaîne de post-traitement produit ainsi, pour chaque période, une couche vectorielle

structurée en trois classes principales : *haie*, *forêt* et *autre élément boisé*. Elle a été appliquée de manière homogène aux périodes 1950–1965, 1965–1980, 2000–2005, 2006–2010, 2015, 2016–2020 et 2022.

Une étape complémentaire a ensuite été mise en place pour comparer plus directement les objets entre dates. La période 2022 a été utilisée comme référence géométrique. Les objets des autres périodes sont appariés aux objets de référence lorsqu'ils présentent un recouvrement spatial suffisant. Les limites sont ensuite ajustées afin de représenter, pour chaque objet de référence, son état aux différentes dates dans une géométrie comparable. Cette harmonisation permet de suivre les changements de classe ou de présence d'un même élément boisé, plutôt que de comparer uniquement des objets indépendants produits séparément à chaque date.

Enfin, une étape de correction topologique a été appliquée aux entités harmonisées afin de corriger certains artefacts produits par la chaîne automatique de vectorisation. Elle concerne notamment les petits appendices de haies accolés à une forêt, les haies résiduelles très petites ou presque enclavées dans une masse forestière, ainsi que certains objets *autres éléments boisés* connectés à un réseau de haies.

Évaluation de la segmentation des objets boisés

La dernière étape de segmentation et de classification des objets boisés a été évaluée par comparaison avec une référence bocagère externe. La couche produite pour la période 2006–2010 a été comparée au référentiel IMEP 2009, qui distingue notamment les haies et les bois sur une emprise commune. Ce jeu de données a été construit par photo-interprétation manuelle par des étudiants de master et constitue donc une référence indépendante de bonne qualité pour évaluer la cohérence des objets produits. La période 2006–2010 a été retenue car elle est temporellement la plus proche du référentiel IMEP parmi les orthophotos anciennes exploitées dans ce travail.

L'évaluation ne correspond pas à une simple matrice de confusion pixel à pixel, car les deux sources n'ont ni la même géométrie ni la même logique de représentation. Les haies IMEP sont représentées sous forme linéaire, alors que les résultats produits ici sont des polygones classés en *haie*, *forêt* ou *autre élément boisé*. Pour les haies, la correspondance a donc été mesurée en longueur, en tenant compte d'une tolérance spatiale de 6 m autour des objets produits. Cette tolérance permet de limiter l'effet des décalages géométriques entre sources et des différences de tracé entre une ligne de référence et un polygone issu de segmentation.

Pour les bois IMEP, la comparaison a été réalisée en surface, par intersection avec les classes produites. L'objectif de cette évaluation est donc de vérifier si les linéaires de haies et les surfaces boisées de la référence externe sont principalement associés aux classes morphologiques attendues dans la couche produite, tout en identifiant les confusions entre haies, forêts, autres éléments boisés et zones non boisées.

Les métriques paysagères

À partir des couches vectorielles structurées, plusieurs métriques paysagères ont été calculées afin de décrire le maillage bocager et son organisation spatiale. Ces métriques ont d'abord été synthétisées à l'échelle de l'ensemble de la zone d'étude, afin de comparer les périodes entre elles. Elles ont ensuite été déclinées sous forme de cartes locales, calculées dans une fenêtre glissante circulaire de 250 m de rayon et rasterisées à 10 m de résolution, afin de localiser les secteurs où la structure bocagère est la plus dense, la plus ouverte ou la plus fragmentée.

Les métriques retenues décrivent à la fois les haies et les masses boisées. Pour les haies, le linéaire local est approché par la somme des périmètres des polygones classés en *haie*. Le taux de recouvrement correspond à la part de la surface de la fenêtre occupée par les haies et sert de proxy du maillage bocager. Une largeur moyenne locale est également estimée par le rapport entre la surface de haies et leur périmètre. Enfin, les surfaces de haies et de forêts sont calculées en hectares, à la fois localement et à l'échelle de l'ensemble de la zone d'étude.

En complément de ces métriques, un indicateur de grain bocager actuel a été calculé à partir de la référence `COSIA_MNH_RPG.tif`. Il vise à représenter l'intensité locale de l'influence des éléments boisés sur le paysage, et non uniquement leur présence ou leur surface. Les pixels boisés sont d'abord identifiés à partir de la hauteur de canopée, puis une proportion boisée locale est calculée avec une pondération gaussienne dans un rayon de 50 m. Cette proportion permet de distinguer trois types de boisements : arbres isolés lorsque la proportion locale est inférieure à 0,20, massifs lorsqu'elle est supérieure à 0,75, et haies ou structures intermédiaires entre ces deux seuils.

Une influence spatiale décroissante est ensuite calculée à partir de la distance à chaque type de boisement. Sa portée dépend de la hauteur médiane du type considéré, multipliée par un facteur de 1 pour les arbres isolés, 5 pour les massifs et 10 pour les haies. L'influence maximale est conservée pour chaque pixel, puis transformée en gradient : une valeur proche de 0 indique un espace situé dans ou à proximité de l'influence des éléments boisés, tandis qu'une valeur proche de 1 correspond à un espace plus ouvert. La carte finale du grain bocager est obtenue par moyenne glissante de ce gradient dans une fenêtre circulaire de 250 m de rayon, puis classée en quatre catégories : *grain fin*, *grain fonctionnel*, *grain potentiel* et *grain ouvert*.

L'évolution des éléments boisés

L'évolution temporelle a été étudiée en comparant ces métriques sur l'ensemble des périodes disponibles. Les cartes produites pour chaque date permettent d'identifier les zones où le maillage de haies est dense, les secteurs dominés par les masses forestières et les espaces où les éléments boisés sont plus rares. Des cartes de gradient temporel ont également été produites pour chaque métrique. Elles correspondent, pour chaque pixel, à la pente linéaire de la métrique au cours du temps et permettent de repérer les secteurs où la structure bocagère augmente ou diminue de manière persistante.

Des comparaisons temporelles complémentaires ont été produites pour isoler certaines phases de changement. La comparaison entre 1950–1965 et 1965–1980 permet d'observer les évolutions anciennes, tandis que la différence entre 1965–1980 et 2022 donne une lecture plus directe de l'évolution entre la période ancienne la plus complète et l'état actuel. Ces résultats servent de base à l'analyse diachronique du maillage et de la structure du bocage.

0.3 Résultats

0.3.1 Construction de la référence actuelle

L'intégration de COSIA, du MNH LiDAR, du RPG et de la BD TOPO a permis de produire une référence actuelle d'occupation du sol adaptée à l'analyse des éléments boisés. Le raster final contient une classe d'occupation du sol et une information de hauteur de canopée limitée aux pixels boisés. Au total, 8999,73 ha de pixels boisés sont associés à une hauteur de canopée dans le jeu `COSIA_MNH_RPG.tif`.

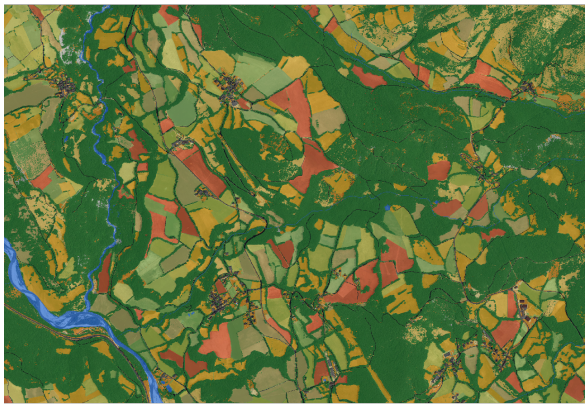
La correction par le MNH a modifié de manière importante la représentation initiale des éléments boisés. D'une part, 1462,38 ha ont été ajoutés à la classe de couvert arboré lorsque la hauteur dépassait 2 m alors que la classe initiale n'était pas boisée. D'autre part, 1425,65 ha initialement classés comme boisés ont été réattribués à une classe non boisée lorsque la hauteur était inférieure ou égale à 2 m, ou lorsqu'aucune hauteur MNH exploitable n'était disponible sur le pixel. Le RPG a également apporté une correction importante des espaces agricoles, avec 7645,13 ha de pixels remplacés par des classes de cultures ou de prairies issues du registre parcellaire.

TABLE 2 – Principales corrections apportées lors de la construction de la référence actuelle.

Correction ou information produite	Surface (ha)
Pixels boisés avec hauteur de canopée	8999,73
Pixels promus en couvert arboré par le MNH	1462,38
Pixels retirés des classes boisées par le MNH	1425,65
Pixels agricoles affinés par le RPG	7645,13
Surface hydrographique ajoutée par la BD TOPO	294,64
Routes ajoutées par la BD TOPO	284,40



Zoom sur l'orthophoto



Référence d'occupation du sol



Zoom sur l'orthophoto



Référence d'occupation du sol

FIGURE 3 – Référence actuelle d'occupation du sol construite à partir de COSIA, du MNH LiDAR, du RPG et de la BD TOPO. En vert foncé figurent les éléments boisés, en bleu les zones hydrologiques, en noir les routes et les zones urbaines ; les autres couleurs représentent différentes cultures.

0.3.2 Évaluation des modèles de segmentation

L'évaluation par points manuels montre que les performances varient selon les périodes et selon le modèle utilisé. Le U-Net donne de bons résultats sur plusieurs dates, mais les sorties du modèle High Resolution Canopy Height fondé sur DINOv2 se révèlent globalement plus régulières et fine pour la cartographie finale des éléments boisés. Ce modèle a donc été utilisé en sortie binaire, après seuillage de la hauteur de canopée prédite. Les seuils retenus sont de 0,015 m pour 1950–1965, de 0,02 m pour 1965–1980 et de 0,25 m pour les périodes postérieures.

Table 3 – Comparaison des performances du U-Net et de DINOv2 pour la segmentation boisée/non boisée.

Période	Modèle	Seuil	Accuracy	IoU boisé	F1 boisé
1950–1965	U-Net	0,35	0,896	0,719	0,836
1950–1965	DINOv2	0,015 m	0,805	0,569	0,725
1965–1980	U-Net	0,30	0,793	0,598	0,749
1965–1980	DINOv2	0,02 m	0,881	0,755	0,860
2000–2005	U-Net	0,50	0,916	0,842	0,914
2000–2005	DINOv2	0,25 m	0,929	0,863	0,927
2006–2010	U-Net	0,50	0,921	0,852	0,920
2006–2010	DINOv2	0,25 m	0,928	0,870	0,930
2015	U-Net	0,35	0,912	0,842	0,915
2015	DINOv2	0,25 m	0,920	0,843	0,915
2016–2020	U-Net	0,65	0,891	0,810	0,895
2016–2020	DINOv2	0,25 m	0,925	0,856	0,922

Le modèle High Resolution Canopy Height fondé sur DINOv2 a fourni l'estimation retenue pour la cartographie finale des éléments boisés. Pour 2022, la comparaison avec `COSIA_MNH_RPG.tif` permet d'évaluer la cohérence spatiale du modèle sur une période pour laquelle une référence actuelle est disponible. Avant cette comparaison, les pixels prédits comme boisés par DINOv2 et correspondant à des routes, à des surfaces en eau ou à des classes urbaines dans `COSIA_MNH_RPG.tif` ont été réattribués à la classe non boisée. Ce filtrage retire 353,68 ha de faux boisements potentiels. À l'échelle de la zone comparée, l'accord global atteint alors 92,7 %. Pour la classe boisée, la précision est de 0,805, le rappel de 0,890, le score F1 de 0,845 et l'IoU de 0,732.

Table 4 – Comparaison spatiale entre la prédiction DINOv2 2022 binarisée et la référence actuelle `COSIA_MNH_RPG.tif`.

Classe de comparaison	Surface (ha)
Accord non boisé	29050,21
Accord boisé	8012,79
DINOv2 boisé / COSIA non boisé	1946,28
COSIA boisé / DINOv2 non boisé	986,94
DINOv2 boisé retiré par le masque COSIA	353,68

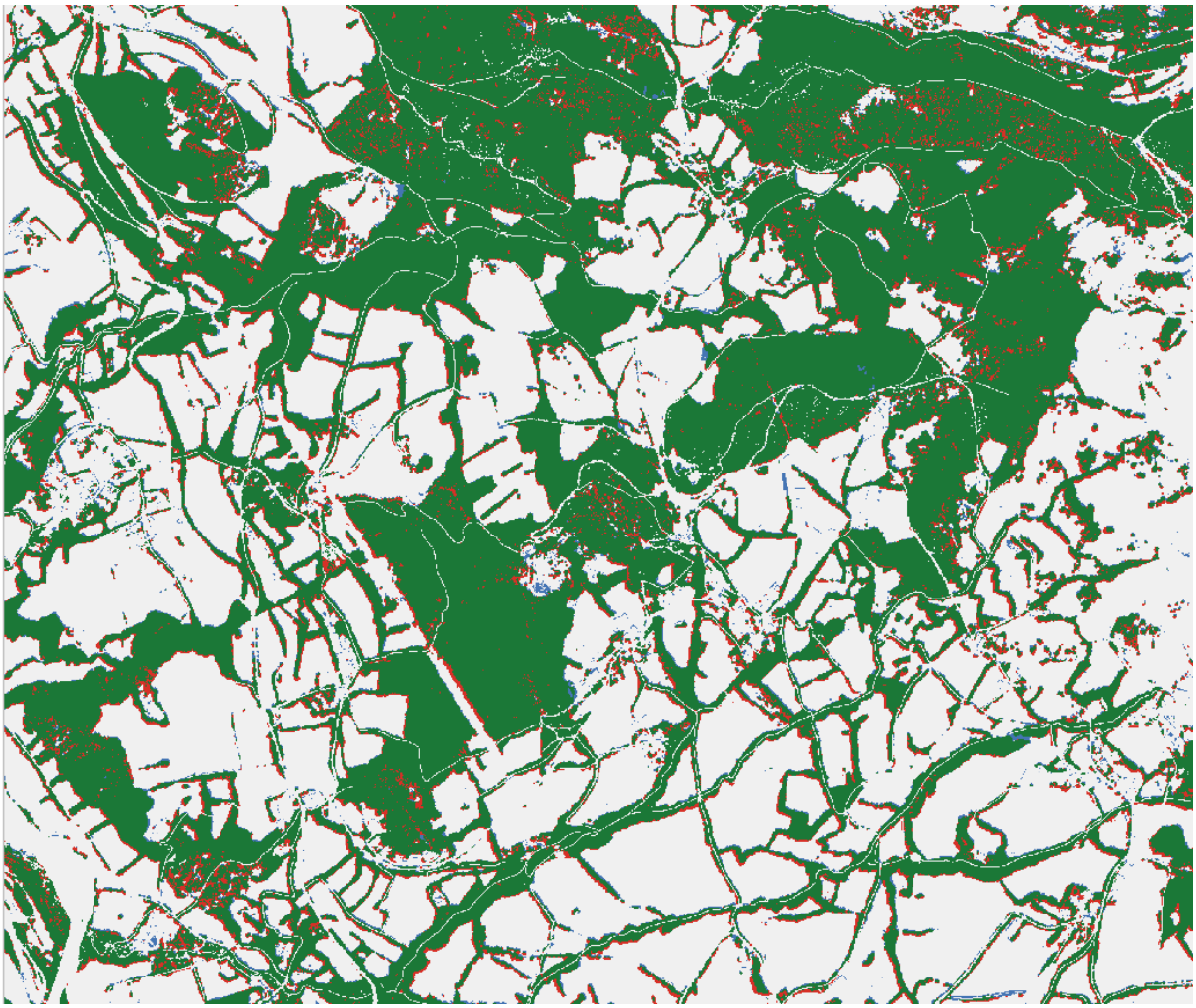


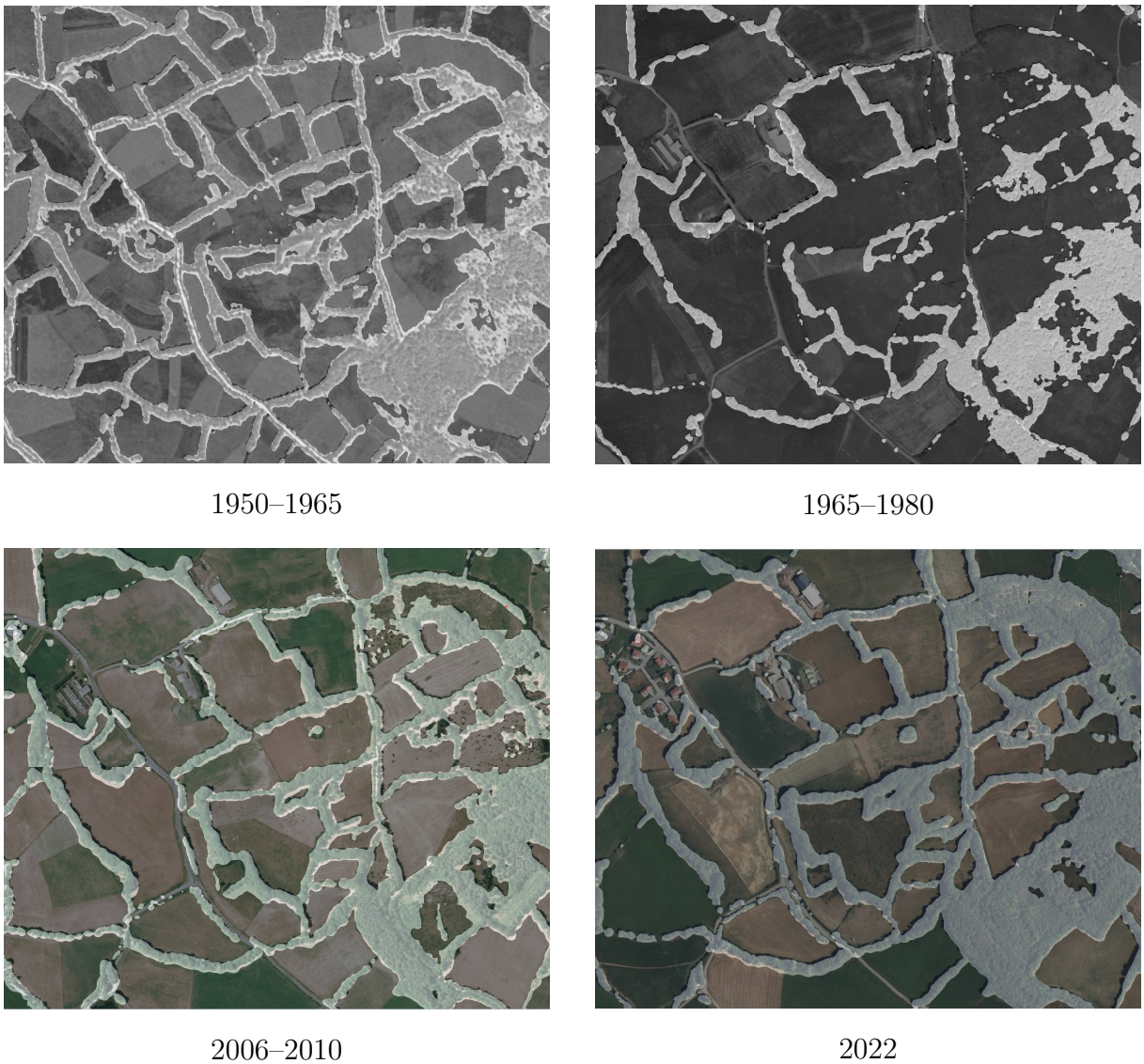
FIGURE 4 – Comparaison spatiale entre la prédiction DINOv2 2022 et la référence actuelle. En vert les zones COSIA/DINOv2 en accord boisé, en blanc les zones COSIA/DINOv2 en accord non boisé, en rouge les zones DINOv2 boisé/COSIA non boisé, en bleu les zones DINOv2 non boisé/COSIA boisé.

0.3.3 Cartographie des éléments boisés en fonction du temps

Les prédictions retenues produisent une série de cartes binaires boisées/non boisées couvrant les périodes 1950–1965, 1965–1980, 2000–2005, 2006–2010, 2015, 2016–2020 et 2022. Les ratios de pixels boisés estimés varient entre les dates, avec une valeur faible pour 1950–1965 (18,6 %) et des valeurs plus élevées autour de 2015 et 2016–2020 (environ 28 %). Ces variations doivent être interprétées avec prudence, car elles reflètent à la fois des évolutions réelles du couvert boisé et des erreurs possibles liées à la segmentation automatique, notamment au seuillage et aux confusions entre végétation, ombres et textures non boisées. On observe notamment une légère surestimation des éléments boisés sur les orthophotographies 2000–2005 et 2006–2010, visible par exemple dans l'estimation d'une largeur de haies supérieure à la largeur réellement observée. À l'inverse, les orthophotographies anciennes présentent davantage d'omissions, avec en particulier une grande zone mal détectée sur la période 1950–1965.

TABLE 5 – Part de pixels boisés dans les prédictions retenues par période.

Période	Pixels boisés prédits (%)
1950–1965	18,6
1965–1980	26,6
2000–2005	26,1
2006–2010	24,3
2015	28,4
2016–2020	28,0
2022	25,3



1950–1965 1965–1980

2006–2010 2022

FIGURE 5 – Exemple de cartographie diachronique des éléments boisés sur une même emprise locale.

0.3.4 Vectorisation et classification des éléments boisés

À partir des cartes binaires boisées/non boisées décrites précédemment, les éléments boisés ont été vectorisés puis classés en trois catégories principales : *haie*, *forêt* et *autre élément boisé*. Cette étape permet de passer d'une information pixel à une information par objet, plus adaptée à l'analyse paysagère. Elle permet notamment de distinguer les structures linéaires assimilables à des haies, les forêts et les autres éléments boisés.

La figure 6 présente un exemple de ces sorties sur une même zone pour quatre périodes différentes. On remarque bien que les limites forêts haie sont les même année après année, ce qui est nécessaire pour ensuite suivre l'évolution de ces éléments dans le temps.

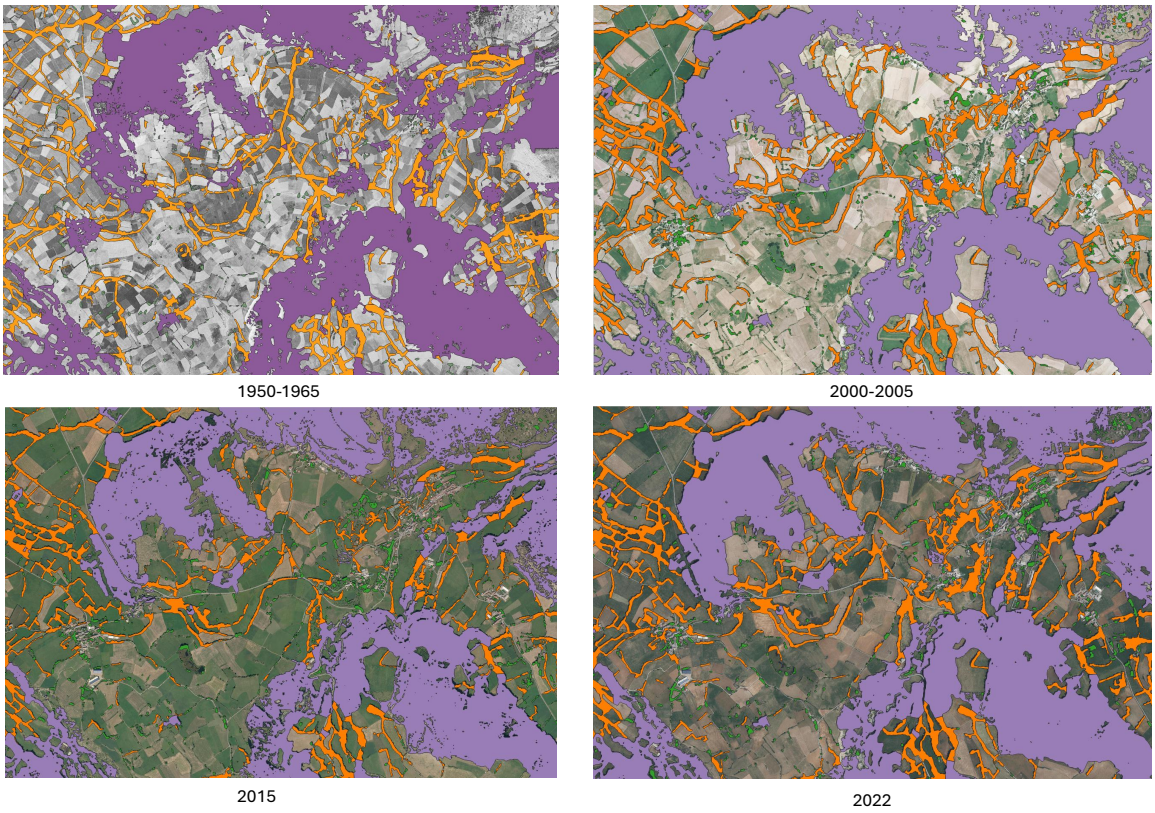


FIGURE 6 – Exemple de vectorisation et de classification des éléments boisés sur une même emprise locale pour quatre périodes (1950-1965 ; 2000-2005 ; 2015 ; 2022). En orange les éléments boisés classés comme haie, en violet les forêts et en vert les autres éléments boisés.

Le nombre d'objets obtenus varie fortement selon les périodes (tableau 6). Cette variabilité traduit en partie des changements réels du paysage, mais elle dépend aussi de la qualité des orthophotographies et de la manière dont la segmentation initiale fragmente ou agrège les objets boisés.

TABLE 6 – Nombre d'objets vectoriels produits par classe et par période après structuration des éléments boisés.

Période	Haies	Forêts	Autres éléments boisés
1950–1965	1600	630	19903
1965–1980	1824	514	20543
2000–2005	3806	530	13887
2006–2010	3672	544	13047
2015	4009	568	24683
2016–2020	3835	554	23913
2022	3873	532	15967

0.3.5 Évaluation de la structuration des éléments boisés

La qualité de cette structuration a été évaluée en comparant la couche vectorielle produite pour la période 2006–2010 au référentiel IMEP 2011, construit à partir d'une photographie aérienne de 2009. Cette référence, issue d'une photo-interprétation manuelle, est considérée comme le jeu de données d'évaluation le plus fiable disponible sur la zone. La période 2006–2010 a été retenue car elle encadre la date de la photographie utilisée par IMEP et permet donc d'évaluer la classification morphologique dans des conditions temporelles proches. Sur l'emprise commune, la référence contient 397,33 km de haies et 1696,36 ha de bois. La comparaison permet d'évaluer séparément la restitution des haies, représentées par des linéaires dans IMEP, et celle des bois, représentés par des surfaces.

Pour les haies, 284,12 km de linéaire IMEP sont associés à la classe *haie* produite, soit 71,5 % du linéaire de référence avec une tolérance spatiale de 6 m. Une partie des linéaires IMEP se situe au contact d'objets classés comme *forêt* (65,06 km, soit 16,4 %) ou comme *autre élément boisé* (32,84 km, soit 8,3 %). Ces cas correspondent principalement à des haies connectées à des masses boisées ou à des structures dont la morphologie polygonale est plus difficile à séparer automatiquement. Enfin, 72,50 km de haies IMEP ne sont pas associés à un objet boisé produit, soit 18,3 % du linéaire de référence.

Pour les bois, la correspondance est plus nette : 1415,93 ha de bois IMEP sont classés comme *forêt*, soit 83,5 % de la surface de référence. Les surfaces restantes se répartissent entre la classe *haie* (79,91 ha, soit 4,7 %), la classe *autre élément boisé* (5,47 ha, soit 0,3 %) et les zones non boisées (195,05 ha, soit 11,5 %). Cette évaluation indique que les grandes masses boisées sont globalement bien restituées, tandis que les principales incertitudes concernent la limite entre haies connectées, lisières forestières et petits objets boisés.

Table 7 – Correspondance entre la couche produite pour 2006–2010 et le référentiel IMEP 2011, basé sur une photographie aérienne de 2009. Les haies sont évaluées en longueur avec une tolérance spatiale de 6 m ; les bois sont évalués en surface d'intersection.

Référence IMEP	Classe produite	Quantité	Part
Haies	Haie	284,12 km	71,5 %
Haies	Forêt	65,06 km	16,4 %
Haies	Autre élément boisé	32,84 km	8,3 %
Haies	Non boisé	72,50 km	18,3 %
Bois	Forêt	1415,93 ha	83,5 %
Bois	Haie	79,91 ha	4,7 %
Bois	Autre élément boisé	5,47 ha	0,3 %
Bois	Non boisé	195,05 ha	11,5 %

0.3.6 Métriques paysagères

Les couches vectorielles classées constituent ensuite le support du calcul des métriques paysagères. Cette dernière étape ne décrit plus seulement la présence ou l'absence de pixels boisés, mais la structure du bocage à travers les surfaces, les linéaires, le recouvrement et la largeur moyenne des haies.

Les métriques globales calculées à l'échelle de la zone d'étude montrent une évolution contrastée du maillage de haies et des surfaces forestières (tableau 8). La surface de haies estimée est de 1173,8 ha en 1950–1965, diminue à 861,7 ha en 1965–1980, puis atteint 1338,1 ha en 2022. Les surfaces forestières suivent une dynamique comparable, avec 6674,6 ha en 1950–1965, 5868,0 ha en 1965–1980 et 7339,7 ha en 2022. Le linéaire de haies estimé est particulièrement élevé sur les deux périodes anciennes, tandis que la largeur moyenne y est plus faible. Cette différence doit être interprétée avec prudence, car elle peut refléter à la fois une structure bocagère plus fragmentée, la résolution des images anciennes et les choix de structuration adaptés à ces orthophotographies.

Table 8 – Métriques paysagères globales calculées à l'échelle de la zone d'étude.

Période	Linéaire haies (km)	Recouvrement haies (%)	Largeur moyenne (m)	Surface haies (ha)	Surface forêt (ha)
1950–1965	3552,8	4,85	3,30	1173,8	6674,6
1965–1980	2776,2	3,56	3,10	861,7	5868,0
2000–2005	1437,6	4,92	8,28	1190,6	7232,1
2006–2010	1532,3	5,59	8,82	1351,4	7336,7
2015	1421,0	4,27	7,26	1031,9	6270,5
2016–2020	1425,7	4,38	7,43	1059,3	6396,1
2022	1438,8	5,53	9,30	1338,1	7339,7

La dynamique globale est également représentée sous forme graphique afin de faciliter la comparaison entre les périodes (figure 7). Pour rendre ces trajectoires directement comparables malgré leurs unités différentes, les cinq métriques globales ont été exprimées en indice base 100 en 1950–1965. Le graphe met d'abord en évidence une baisse nette entre

les deux périodes anciennes : entre 1950–1965 et 1965–1980, le linéaire de haies passe de 3552,8 km à 2776,2 km (-21,9 %), le recouvrement des haies de 4,85 % à 3,56 % (-26,6 %), la surface de haies de 1173,8 ha à 861,7 ha (-26,6 %) et la surface forestière de 6674,6 ha à 5868,0 ha (-12,1 %). La largeur moyenne des haies diminue plus faiblement, de 3,30 m à 3,10 m (-6,1 %).

Les valeurs des périodes 2000–2005 et 2006–2010 doivent toutefois être interprétées avec précaution. Elles présentent des niveaux élevés pour plusieurs métriques, notamment la surface de haies (1190,6 ha puis 1351,4 ha), la surface forestière (7232,1 ha puis 7336,7 ha) et la largeur moyenne des haies (8,28 m puis 8,82 m). Or l'analyse des sorties de segmentation indique une légère surestimation du couvert boisé sur ces orthophotographies, ce qui peut amplifier artificiellement les surfaces et les largeurs estimées.

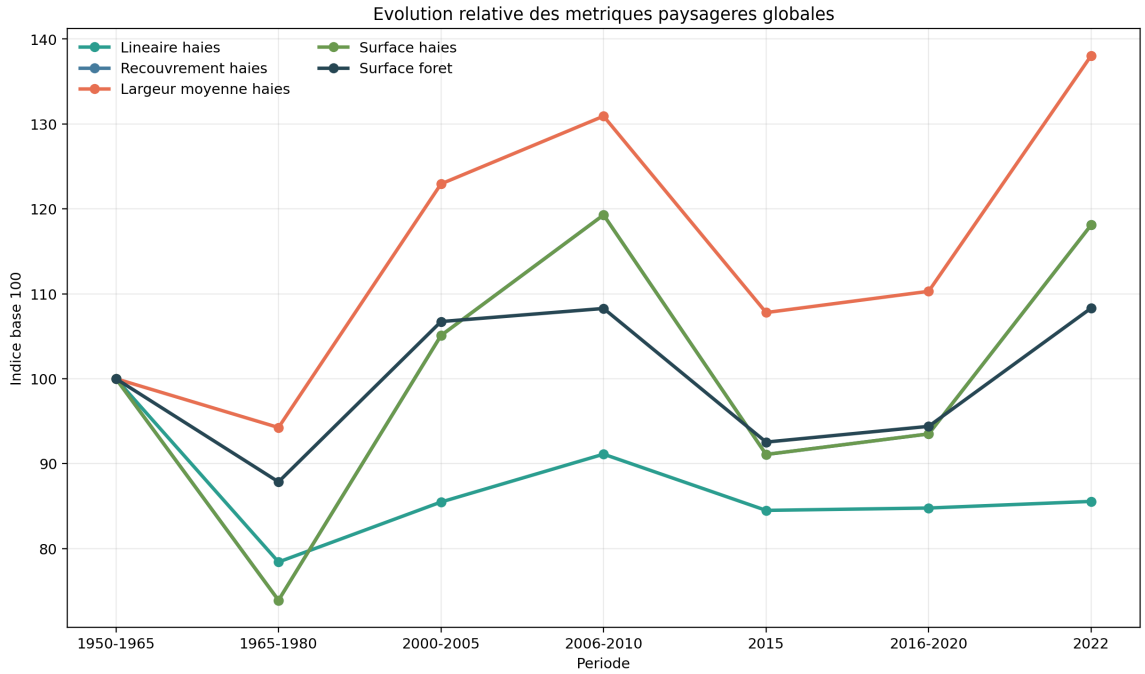


FIGURE 7 – Évolution relative des métriques paysagères globales calculées à l'échelle de la zone d'étude, exprimées en indice base 100 en 1950–1965.

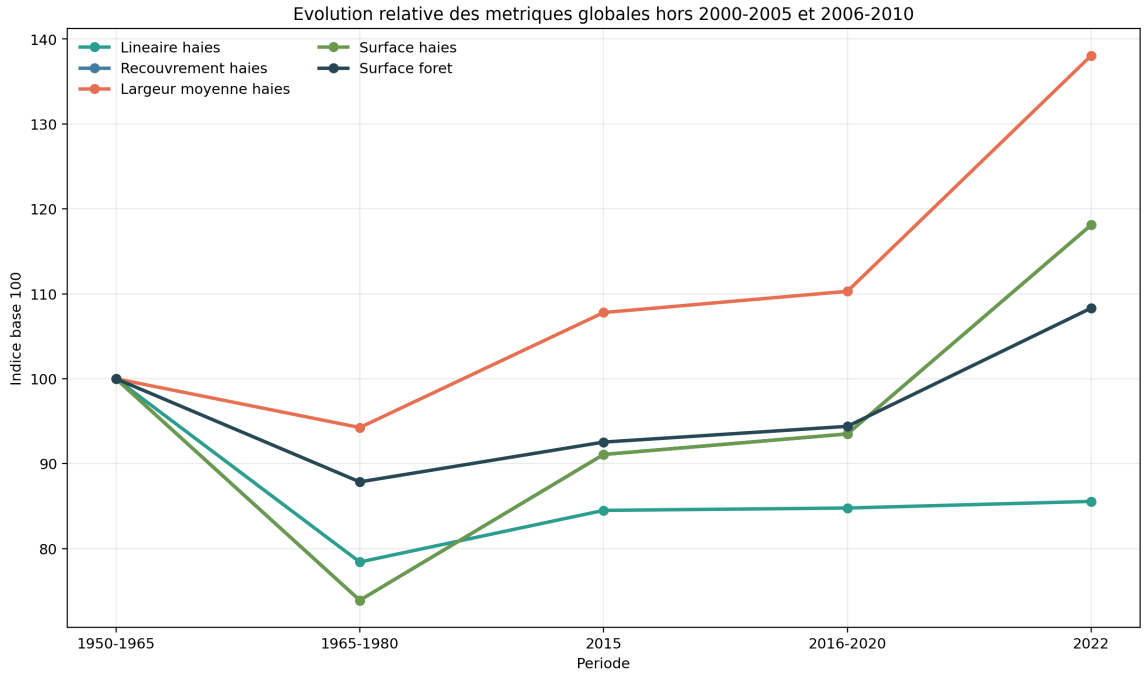


FIGURE 8 – Évolution relative des métriques paysagères globales sans les périodes 2000–2005 et 2006–2010, exprimées en indice base 100 en 1950–1965.

La figure 8, qui exclut les périodes 2000–2005 et 2006–2010, rend plus lisible la trajectoire générale. Après la baisse observée entre les deux périodes anciennes, les métriques de surface et de largeur augmentent dans les périodes récentes. Entre 2015 et 2022, la surface de haies passe de 1031,9 ha à 1338,1 ha (+29,7 %), la surface forestière de 6270,5 ha à 7339,7 ha (+17,1 %), le recouvrement des haies de 4,27 % à 5,53 % (+29,5 %) et la largeur moyenne de 7,26 m à 9,30 m (+28,1 %). En revanche, le linéaire de haies reste relativement stable sur les périodes récentes : 1421,0 km en 2015, 1425,7 km en 2016–2020 et 1438,8 km en 2022. Cette stabilité du linéaire, combinée à l'augmentation de la largeur et de la surface, suggère davantage un épaississement ou une consolidation des haies existantes qu'une forte augmentation du nombre de haies, tandis que la diminution de ces mètriques entre 1950 et 1980 suggère plutôt une diminution du nombre de haie qu'un amincissement des haies.

Les cartes de métriques locales complètent ces résultats globaux en montrant que les changements ne sont pas homogènes sur l'ensemble du Champsaur. Les figures 9 et 10 présentent respectivement les métriques liées au maillage de haies et les métriques de surface boisée.

Les gradients temporels permettent ensuite de synthétiser les changements entre périodes. La comparaison entre 1950–1965 et 1965–1980 décrit l'évolution entre les deux états anciens. La comparaison entre 1965–1980 et 2022 met en évidence la trajectoire de long terme depuis la seconde période ancienne jusqu'à l'état actuel. Enfin, le gradient total entre 1950–1965 et 2022 résume les secteurs de renforcement ou de simplification du maillage sur l'ensemble de la période étudiée. Ces trois comparaisons sont regroupées dans la figure 11.

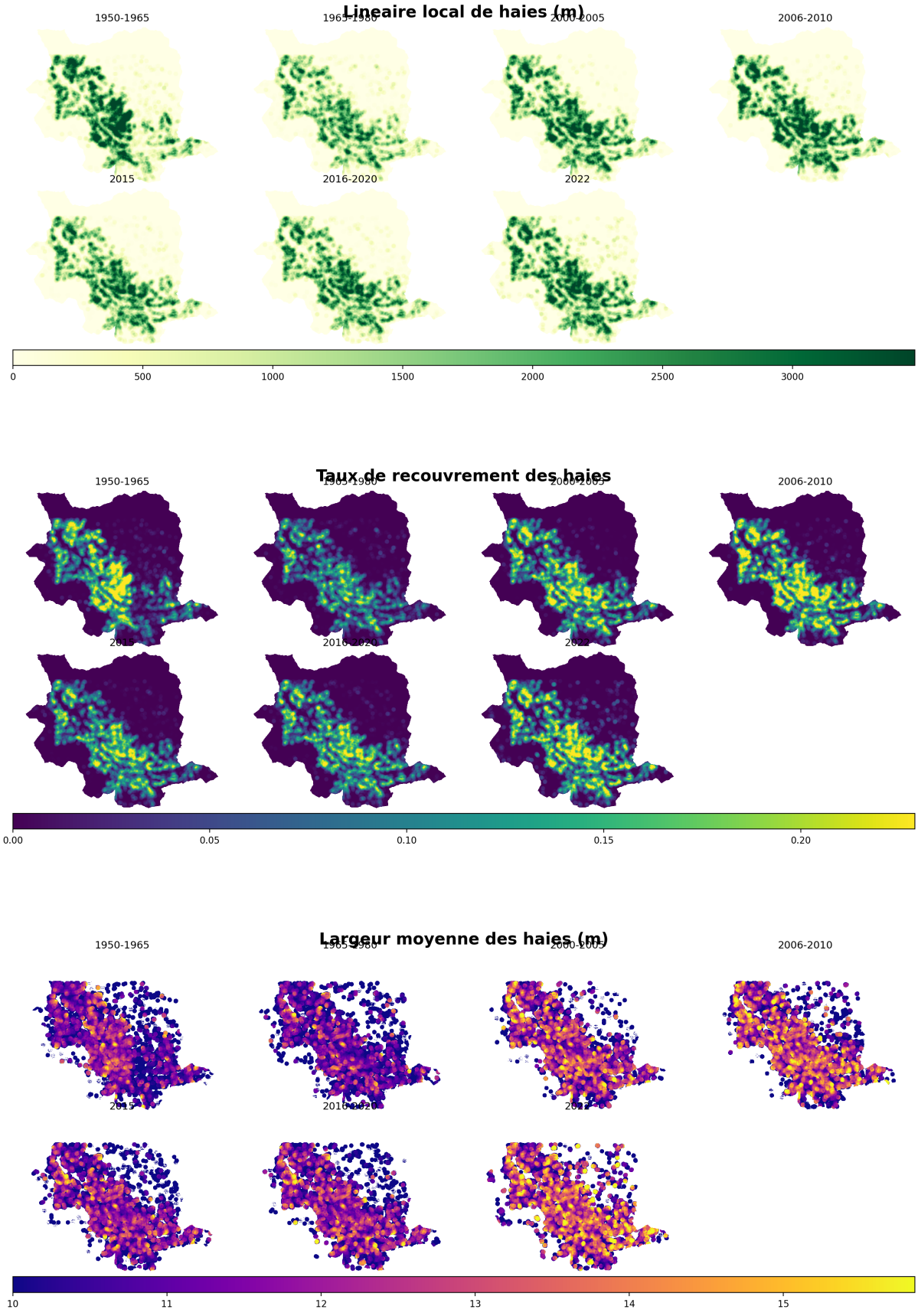


FIGURE 9 – Cartes des métriques locales liées aux haies pour chaque période : linéaire local, taux de recouvrement et largeur moyenne, calculés par fenêtre mobile de 250 m.

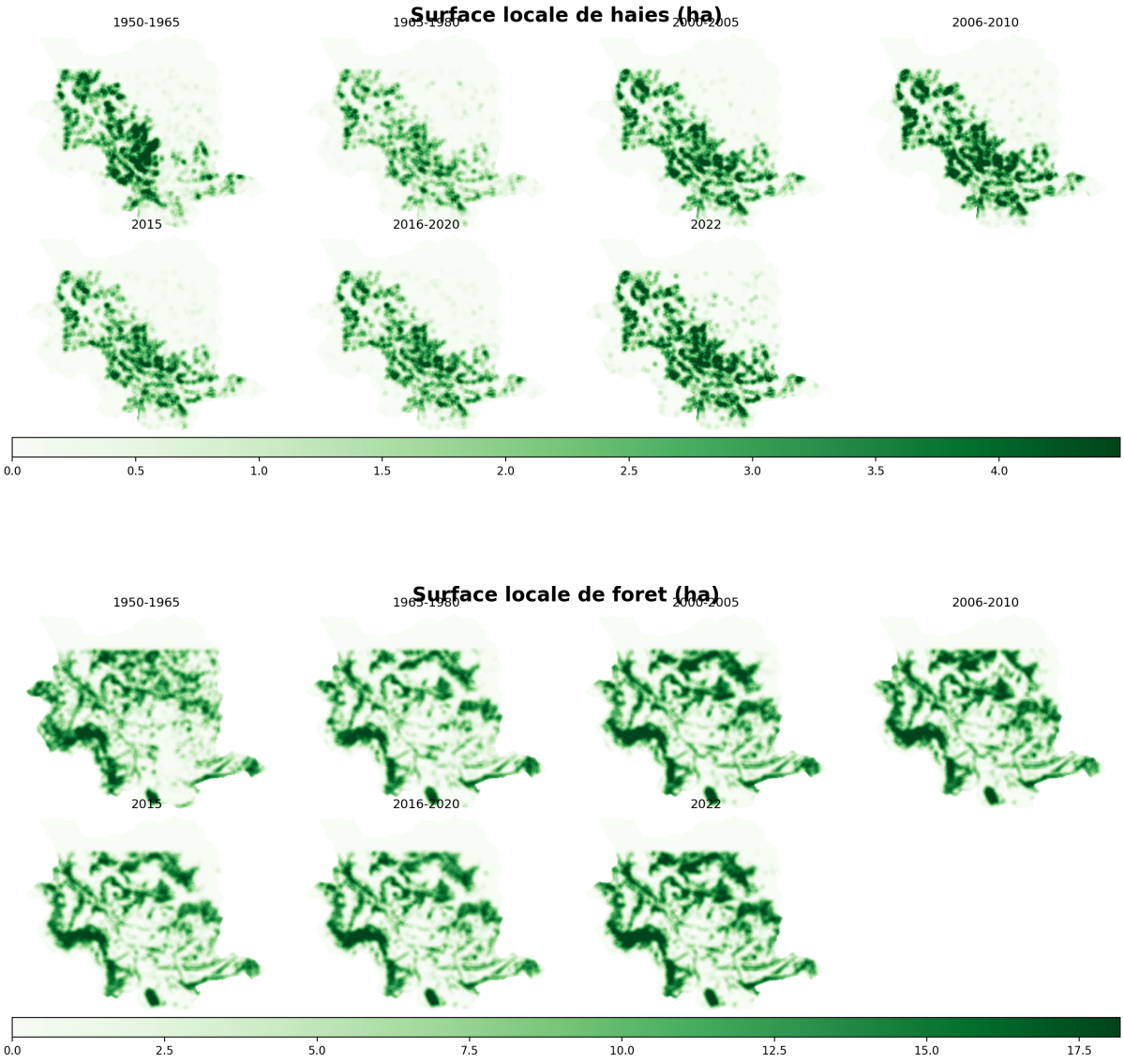


FIGURE 10 – Cartes des surfaces locales de haies et de forêt pour chaque période.

Ces gradients doivent être interprétés conjointement plutôt que comme une seule trajectoire continue. En effet, certaines différences peuvent provenir des limites de la chaîne de traitement : les rasters boisés des années 2000–2010 tendent localement à surestimer le couvert boisé, et une zone particulière est mal modélisée en 1950–1965, ce qui crée une anomalie positive dans le gradient total. Les gradients intermédiaires permettent donc de distinguer les tendances robustes des artefacts liés à une période donnée. Malgré ces limites, plusieurs motifs spatiaux restent lisibles, notamment des secteurs de remembrement, de perte de continuité du maillage et, inversement, des secteurs d'épaississement ou de consolidation des haies.

Le grain bocager actuel complète ces métriques en décrivant l'influence spatiale potentielle des structures ligneuses. Sur l'emprise valide du raster, 21 474 800 pixels boisés ont été identifiés. La carte utilise la hauteur de canopée disponible dans la référence actuelle pour identifier les pixels boisés, puis une hauteur représentative par type d'élément boisé pour paramétrer la distance d'influence. Les hauteurs médianes utilisées pour cette portée sont de 5,52 m pour les arbres isolés, 15,42 m pour les massifs et 9,57 m pour les haies ou structures intermédiaires.

La carte obtenue distingue quatre niveaux de grain bocager (figure 12). Les zones de *grain fin*, correspondant aux secteurs les plus fortement influencés par les éléments boisés, représentent 16863,4 ha, soit 58,5 % de l'emprise valide. Les zones de *grain fonctionnel* couvrent 3678,1 ha (12,8 %), les zones de *grain potentiel* 1701,6 ha (5,9 %) et les zones de *grain ouvert* 6578,5 ha (22,8 %). Cette répartition montre que la structure boisée actuelle exerce une influence spatiale importante sur une grande partie de l'emprise analysée. Les secteurs de *grain ouvert* ne doivent toutefois pas être interprétés uniquement comme des espaces agricoles dépourvus de haies : ils correspondent aussi, pour une part importante, à des milieux montagnards naturellement peu ou non arborés.

TABLE 9 – Répartition des classes de grain bocager sur l'emprise valide du raster.

Classe de grain bocager	Surface (ha)	Part (%)
Grain fin	16863,4	58,5
Grain fonctionnel	3678,1	12,8
Grain potentiel	1701,6	5,9
Grain ouvert	6578,5	22,8

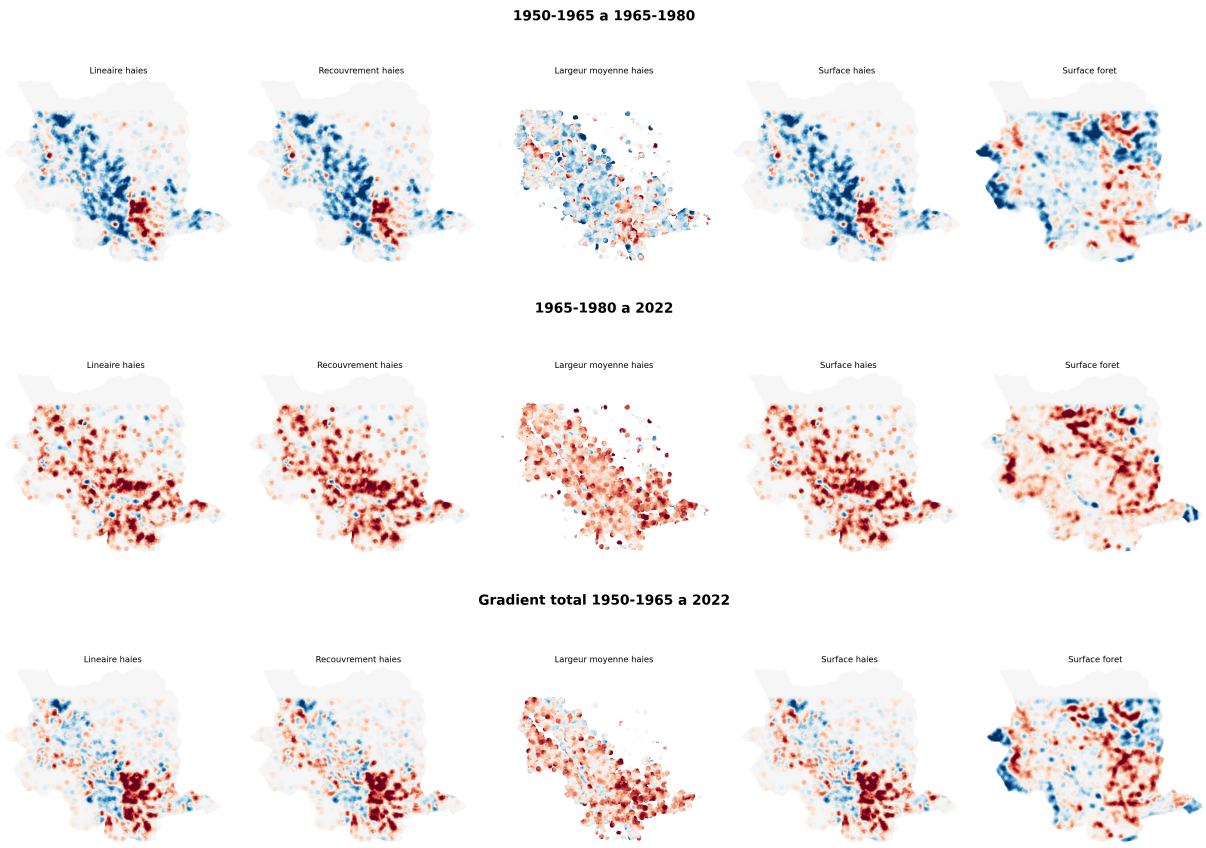


FIGURE 11 – Comparaisons temporelles des métriques locales pour trois trajectoires : 1950–1965 à 1965–1980, 1965–1980 à 2022 et gradient total 1950–1965 à 2022. Chaque ligne présente le taux de recouvrement des haies, la surface de haies et la surface de forêt.

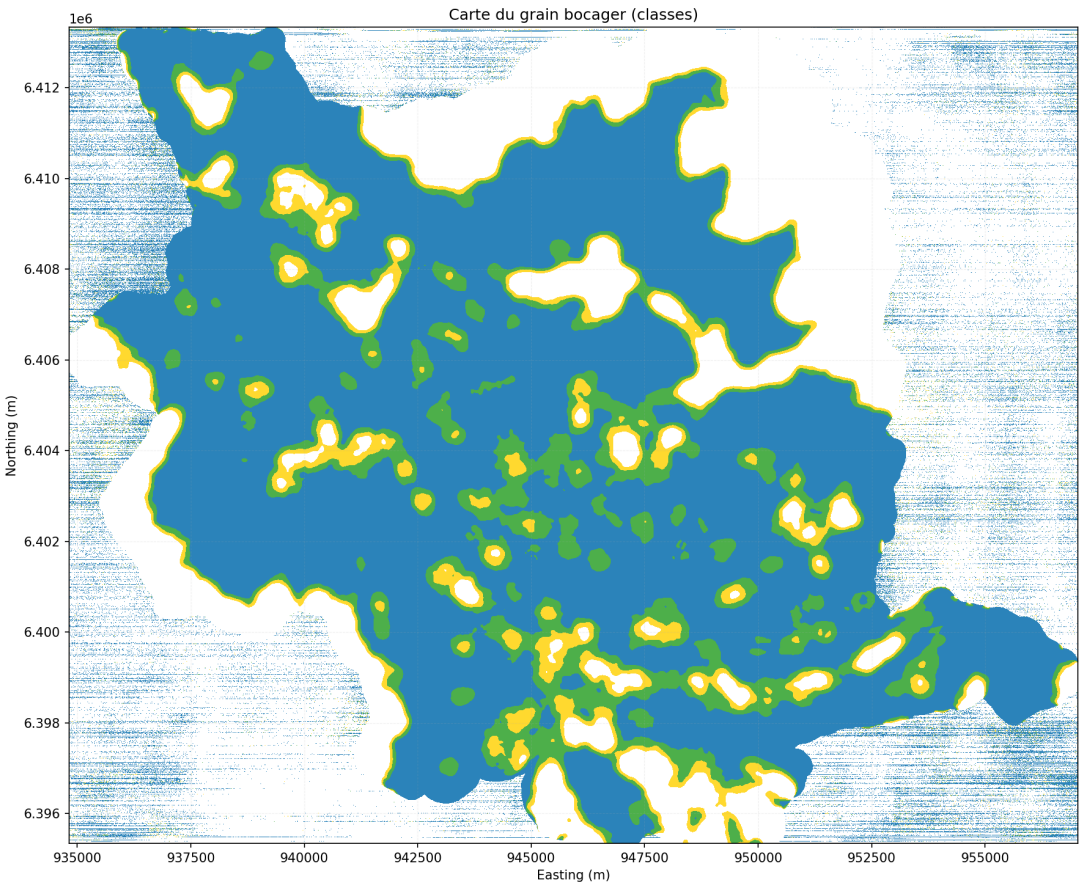


FIGURE 12 – Carte du grain bocager actuel dérivée de la référence `COSIA_MNH_RPG.tif`. Le bleu correspond au grain fin, le vert au grain fonctionnel, le jaune au grain potentiel et le blanc au grain ouvert.

Ces cartes constituent le support principal pour interpréter la dynamique spatiale du bocage et préparer les analyses ultérieures sur les liens entre structure paysagère, histoire d'usage des sols et services écosystémiques.

0.4 Discussion

0.4.1 Intérêts et limites de l'approche méthodologique

Cartographie actuelle du Champsaur

La cartographie actuelle constitue une représentation aussi complète que possible de l'occupation du sol du Champsaur en 2022, compte tenu des données disponibles. La qualité des données mobilisées sur cette zone est un point fort de l'approche. Le MNH issu du LiDAR permet de représenter finement les éléments boisés en distinguant les objets présentant une hauteur de végétation significative. Les données RPG sont également bien renseignées sur la zone d'étude et permettent de préciser les types de cultures et de prairies au sein des espaces agricoles. La combinaison de COSIA, du MNH, du RPG et de la BD TOPO permet donc de construire une référence actuelle cohérente pour la suite

de l'analyse.

La principale limite de cette étape tient à la disponibilité spatiale des données d'entrée. En particulier, l'emprise de COSIA ne couvre pas entièrement le nord de la zone d'étude, ce qui limite la continuité spatiale de la référence actuelle sur ce secteur. Plus généralement, cette cartographie reste dépendante de la qualité des référentiels disponibles : elle représente la meilleure base mobilisable dans le cadre de ce travail, mais elle ne constitue pas une vérité terrain exhaustive.

Modélisation des éléments boisés à partir d'orthophotos

La modélisation des éléments boisés à partir d'orthophotographies permet de produire une cartographie diachronique sur des périodes pour lesquelles il n'existe pas de référence d'occupation du sol comparable à celle de 2022. Les résultats d'évaluation montrent que le modèle DINOv2 fournit des prédictions globalement satisfaisantes pour ce type de segmentation, y compris sur des orthophotographies anciennes en noir et blanc. Il s'est révélé plus adapté aux sorties retenues que le modèle U-Net testé dans ce travail.

L'évaluation mise en place présente toutefois des limites. Elle repose sur 500 points interprétés manuellement par période, ce qui permet une comparaison quantitative des modèles, mais ne décrit pas finement la forme, la localisation et le type des erreurs. Une approche complémentaire aurait consisté à cartographier manuellement plusieurs petites zones réparties sur le territoire, afin d'évaluer plus précisément les erreurs de commission et d'omission selon les contextes paysagers et selon les orthophotographies. Cette stratégie aurait aussi permis d'associer une incertitude spatialisée aux résultats.

Les erreurs ne sont pas homogènes entre les dates ni à l'intérieur d'une même orthophotographie. Par exemple, une grande zone est mal segmentée sur la période 1950–1965, alors que d'autres secteurs de cette même période sont mieux représentés. À l'inverse, les périodes 2000–2005 et 2006–2010 montrent localement une surestimation du couvert boisé, notamment sur les haies dont la largeur est parfois supérieure à celle observée visuellement. Ces limites rendent difficile une évaluation parfaitement homogène des modèles et doivent être prises en compte dans l'interprétation des dynamiques temporelles.

Vectorisation et classification des éléments boisés

La vectorisation et la classification des éléments boisés sont nécessaires pour passer d'une carte de présence/absence de pixels boisés à une description de la structure paysagère. Cette étape permet de distinguer les haies, les forêts et les autres éléments boisés, puis de calculer des métriques adaptées à l'analyse du bocage. L'évaluation réalisée avec le référentiel IMEP 2011, construit manuellement à partir d'une photographie aérienne de 2009, montre que la classification restitue correctement une grande partie des haies et des bois de référence.

Cette approche automatique reste cependant moins fine qu'une cartographie manuelle. Son intérêt principal réside dans le gain de temps et dans sa capacité à être appliquée à de grandes emprises ou à plusieurs dates. À titre de comparaison, la cartographie manuelle

utilisée comme référence demandait environ cinq heures pour une maille de 1,5 km par 1,5 km. La méthode développée ici peut donc être réutilisée sur d'autres territoires lorsque des données de couvert boisé ou des orthophotographies adaptées sont disponibles.

Une limite importante concerne la représentation des haies. Dans certains cas, plusieurs haies connectées ou proches peuvent être regroupées dans un même polygone, alors qu'une définition plus fine considère une haie comme un élément linéaire distinct, généralement de plus de 20 m de longueur et de moins de 20 m de largeur. Deux alignements connectés peuvent aussi devoir être séparés selon leur angle ou leur organisation spatiale. Une représentation plus détaillée, par exemple sous forme de graphe, permettrait de mieux décrire le nombre de haies, leur longueur individuelle et leur connectivité. Des essais de squelettisation ont été réalisés, mais les résultats n'étaient pas suffisamment satisfaisants pour être retenus dans cette étude.

Métriques paysagères

Les métriques paysagères permettent de résumer la structure du bocage à partir des couches vectorielles produites. Elles mettent cependant aussi en évidence les limites des étapes précédentes. La surestimation du couvert boisé sur les périodes 2000–2005 et 2006–2010 se retrouve dans les graphiques d'évolution temporelle, notamment sur les surfaces et les largeurs estimées. De même, la zone mal modélisée en 1950–1965 apparaît dans certaines cartes de gradients temporels.

Ces métriques doivent donc être interprétées comme des indicateurs de structure paysagère, et non comme une mesure parfaite de l'évolution du bocage. Comme les haies ne sont pas représentées sous forme de graphe, certaines métriques telles que le nombre exact de haies, la longueur individuelle des haies ou leur connectivité ne peuvent pas être quantifiées directement. Les indicateurs retenus, comme le linéaire approché par le périmètre, le recouvrement, la surface et la largeur moyenne, permettent néanmoins de comparer les périodes et d'identifier des zones où la structure bocagère évolue. Les dynamiques spatiales observées seront donc discutées en tenant compte de ces incertitudes.

0.4.2 Le bocage champsaurien actuel

Le bocage champsaurien actuel présente une structure encore bien représentée sur le territoire. Pour 2022, le linéaire estimé de haies atteint 1438,8 km, avec un recouvrement de 5,53 %. La surface de haies est estimée à 1338,1 ha, la surface forestière à 7339,7 ha et la largeur moyenne des haies à 9,30 m. Ces valeurs montrent que les éléments boisés restent une composante importante du paysage champsaurien.

Cette structure n'est toutefois pas homogène spatialement. Les cartes de métriques locales montrent des secteurs où le maillage de haies est dense et d'autres où les éléments boisés sont plus rares ou plus discontinus. Les classes de grain bocager traduisent cette variabilité : certains espaces présentent un grain fin, fortement influencé par les structures ligneuses, tandis que d'autres relèvent davantage d'un grain ouvert. Cette ouverture ne

correspond pas toujours à une absence de haies dans les espaces agricoles ; elle peut aussi concerner des secteurs de montagne naturellement moins arborés.

0.4.3 Dynamiques du bocage champsaurien

Les résultats mettent en évidence deux grandes phases d'évolution. La première concerne le passage de 1950–1965 à 1965–1980. Sur cette période, les métriques globales indiquent une baisse du linéaire estimé de haies, du recouvrement des haies et des surfaces boisées. L'observation des orthophotographies confirme cette dynamique : plusieurs haies présentes sur les images anciennes disparaissent ou sont fortement discontinues sur la période suivante. Il s'agit donc d'une phase de simplification du maillage bocager dans une partie du territoire.

La seconde phase concerne l'évolution depuis 1965–1980 jusqu'à 2022. Sur cette période longue, les surfaces de haies et de forêts, le recouvrement des haies et la largeur moyenne des haies augmentent. L'analyse visuelle des photographies aériennes montre également un épaississement progressif de nombreuses haies et une fermeture de certains secteurs boisés. Dans les périodes récentes, le linéaire estimé de haies varie beaucoup moins fortement que les surfaces et les largeurs : l'évolution porte donc surtout sur la croissance et l'élargissement des éléments boisés déjà présents, plutôt que sur la création massive de nouvelles haies. Les incertitudes de segmentation invitent à rester prudent sur les valeurs exactes, mais la tendance générale d'épaississement est bien visible dans les orthophotographies.

0.4.4 Suggestions de zones d'échantillonnage pour les mesures de terrain

L'un des objectifs de ce travail était d'identifier des structures et des dynamiques bocagères pouvant aider au choix de zones d'intérêt pour les mesures de terrain. Les propositions d'échantillonnage s'appuient donc sur les cartes de métriques locales et sur les gradients temporels. Elles visent à couvrir des situations contrastées, à la fois en termes de densité actuelle de haies et de trajectoire temporelle du bocage.

Trois zones d'intérêt sont proposées (figure 13). La zone 1 correspond à un secteur de faible densité de haies, représentatif d'un paysage plus ouvert. La zone 2 correspond au contraire à un secteur de forte densité de haies, où le maillage bocager est plus marqué. La zone 3 correspond à un secteur où plusieurs haies disparaissent entre 1950–1965 et 1965–1980. Ces trois zones permettraient donc de comparer des contextes actuels différents, mais aussi des trajectoires paysagères différentes.

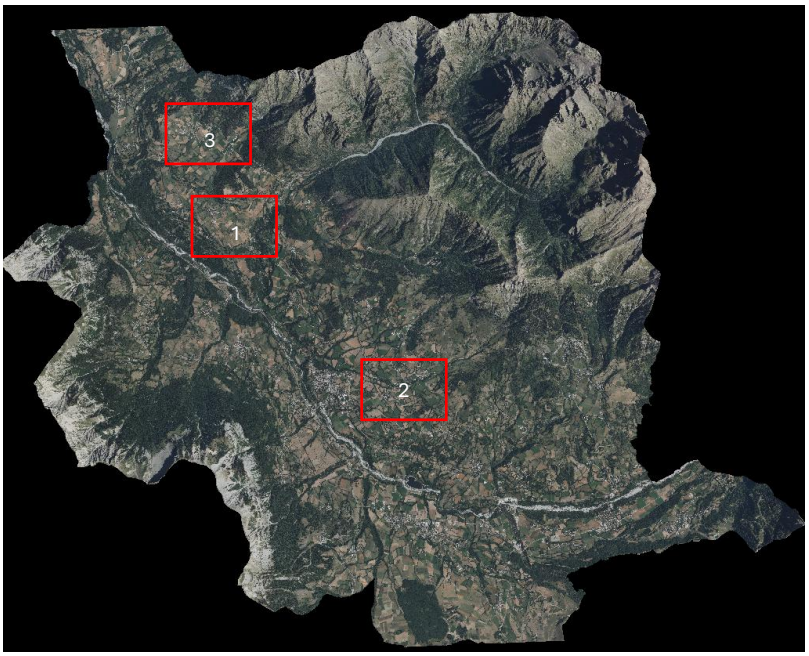


FIGURE 13 – Localisation des trois zones proposées pour l'échantillonnage de terrain.



FIGURE 14 – Zoom sur la zone 1, représentative d'un secteur de faible densité de haies. Les haies de 2022 sont représentées en orange.

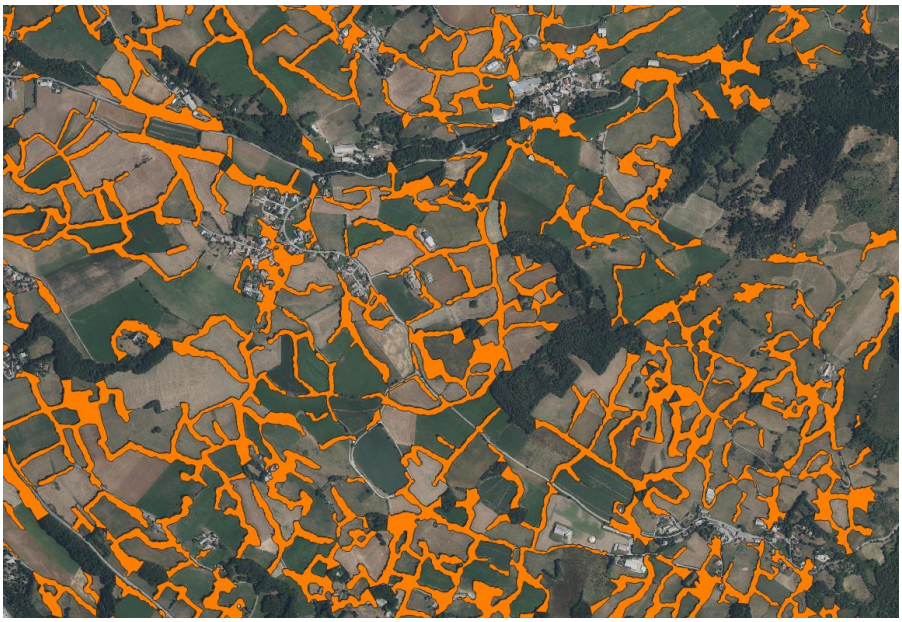


FIGURE 15 – Zoom sur la zone 2, représentative d'un secteur de forte densité de haies. Les haies de 2022 sont représentées en orange.

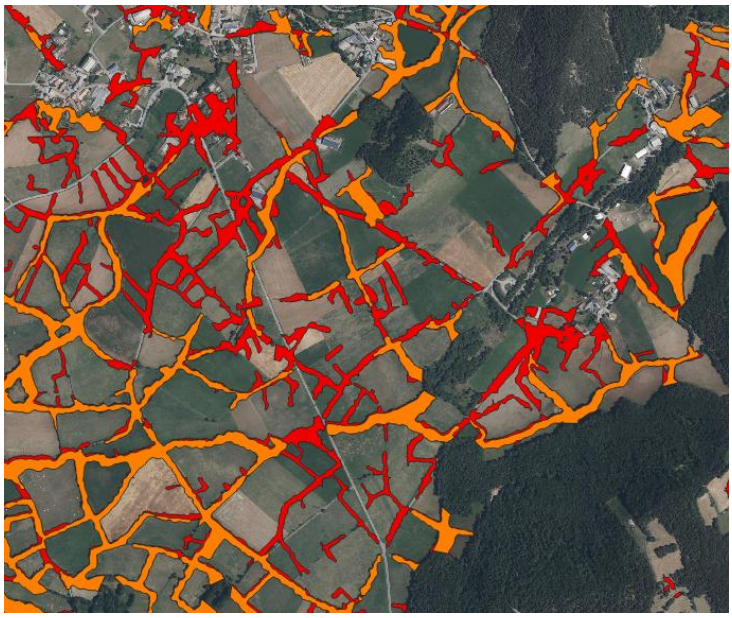


FIGURE 16 – Zoom sur la zone 3, où plusieurs haies disparaissent entre 1950–1965 et 1965–1980. Les haies de 2022 sont représentées en orange et les haies de 1950–1965 en rouge.

0.5 Conclusion

Ce stage a permis de construire une cartographie diachronique des éléments boisés du Champsaur et de proposer une méthode reproductible pour décrire la structure du bocage dans le temps. La référence actuelle, fondée sur la combinaison de COSIA, du MNH LiDAR, du RPG et de la BD TOPO, fournit une base détaillée de l'occupation du

sol et du couvert boisé en 2022. Les orthophotographies anciennes et récentes ont ensuite permis d'étendre cette cartographie à plusieurs périodes, afin d'analyser les évolutions du bocage sur le long terme.

Les résultats montrent que le bocage champsaurien reste fortement présent dans le paysage actuel, mais avec une organisation spatiale contrastée. Les cartes de métriques locales et de grain bocager mettent en évidence des secteurs densément structurés par les haies et les boisements, ainsi que des espaces plus ouverts. L'analyse diachronique révèle également deux dynamiques principales : une phase de simplification du maillage entre 1950–1965 et 1965–1980, marquée par la disparition de plusieurs haies, puis une tendance plus récente à l'épaississement et à l'augmentation des surfaces boisées.

La méthode présente toutefois plusieurs limites. Elle reste moins précise qu'une cartographie manuelle ou qu'un relevé de terrain, qui permettent une interprétation plus fine des objets et des situations ambiguës. Les erreurs de segmentation ne sont pas homogènes entre les orthophotographies, certaines périodes présentant des omissions ou des surestimations locales du couvert boisé. De plus, les haies ne sont pas individualisées sous forme de graphe, ce qui limite l'analyse fine de leur nombre, de leur connectivité et de leur longueur individuelle. En revanche, cette approche offre un gain de temps important et peut être généralisée à d'autres territoires lorsque des orthophotographies et des données de référence adaptées sont disponibles. Malgré ces limites, les couches produites constituent un support utile pour comparer les structures paysagères entre périodes et pour orienter les futures mesures de terrain.

Les zones d'échantillonnage proposées illustrent cette utilisation opérationnelle des résultats. Elles permettent de cibler des situations contrastées, depuis des secteurs de faible densité de haies jusqu'à des zones de maillage bocager plus dense ou ayant connu des suppressions de haies anciennes. Ces données pourront ainsi servir de base aux travaux ultérieurs visant à relier la structure du bocage, l'histoire des usages du sol et les services écosystémiques associés aux haies.

Références

[1] IPBES. *IPBES (2018) : Summary for policymakers of the assessment report on land degradation and restoration of the Intergovernmental Science- Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. English. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity et Ecosystem Services, 2018. ISBN : 978-3-947851-04-1.

[2] IPBES. *Global assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. Sous la dir. d'E. Brondizio et al. Bonn, Germany : IPBES Secretariat, mai 2019.

[3] IPBES. "Summary for Policymakers of the Thematic Assessment Report on the Underlying Causes of Biodiversity Loss and the Determinants of Transformative Change and Options for Achieving the 2050 Vision for Biodiversity". In : sous la dir. de K. O'Brien et al. Bonn, Germany : IPBES Secretariat, 2024.

[4] E. Cohen-Shacham et al. *Nature-based solutions to address global societal challenges*. 2016. ISBN : 978-2-8317-1812-5.

[5] Yvonne M. Buckley et al. "The plant ecology of nature-based solutions for people, biodiversity and climate". en. In : *Journal of Ecology* 112.11 (2024). _eprint : https ://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/1365-2745.14441, p. 2424-2431. ISSN : 1365-2745.

[6] David García de León, José M. Rey Benayas et Enrique Andivia. "Contributions of Hedgerows to People : A Global Meta-Analysis". English. In : *Frontiers in Conservation Science* 2 (déc. 2021). ISSN : 2673-611X.

[7] Matteo Dainese et al. "High cover of hedgerows in the landscape supports multiple ecosystem services in Mediterranean cereal fields". en. In : *Journal of Applied Ecology* 54.2 (2017). _eprint : https ://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/1365-2664.12747, p. 380-388. ISSN : 1365-2664.

[8] Camille Meeussen et al. "Drivers of carbon stocks in forest edges across Europe". In : *Science of The Total Environment* 759 (mars 2021), p. 143497. ISSN : 0048-9697.

[9] Pieter De Frenne et al. "Forest microclimates and climate change : Importance, drivers and future research agenda". en. In : *Global Change Biology* 27.11 (2021). _eprint : https ://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/gcb.15569, p. 2279-2297. ISSN : 1365-2486.

[10] Thomas Vanneste et al. “Trade-offs in biodiversity and ecosystem services between edges and interiors in European forests”. en. In : *Nature Ecology & Evolution* 8.5 (mai 2024), p. 880-887. issn : 2397-334X.

[11] Jean Paul Metzger et al. “Considering landscape-level processes in ecosystem service assessments”. In : *Science of The Total Environment* 796 (nov. 2021), p. 149028. issn : 0048-9697.

[12] Gaëtane Le Provost et al. “Land-use history impacts functional diversity across multiple trophic groups”. In : *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117.3 (jan. 2020), p. 1573-1579.

[13] Susan E. Ward et al. “Legacy effects of grassland management on soil carbon to depth”. en. In : *Global Change Biology* 22.8 (2016). _eprint : https ://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/gcb.13246, p. 2929-2938. issn : 1365-2486.

[14] Sherry L. Martin et al. “The land-use legacy effect : Towards a mechanistic understanding of time-lagged water quality responses to land use/cover”. In : *Science of The Total Environment* 579 (fév. 2017), p. 1794-1803. issn : 0048-9697.