

STOCKS DE BOIS ET DE CARBONE DANS LES HAIES BOCAGÈRES FRANÇAISES

Une première évaluation
pour 31 départements bocagers

RAPPORT FINAL



EXPERTISES

Février
2022

CITATION DE CE RAPPORT

DASSOT Mathieu, COMMAGNAC Loïc, LETOUZE Frédéric, COLIN Antoine. 2022. **Stocks de bois et de carbone dans les haies bocagères françaises**. 66 pages.

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

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

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 2020MA000404

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : IGN - Institut national de l'information géographique et forestière

Coordination technique - ADEME : DEPARTE Alba, ingénieure

Direction/Service : Direction Bioéconomie et Energies Renouvelables

SOMMAIRE

RÉSUMÉ.....	5
ABSTRACT	6
1. CONTEXTE DU PROJET	7
2. OBJECTIFS.....	8
3. SOURCES DES DONNEES DE L'ETUDE	9
3.1. Le Dispositif de Suivi des Bocages (DSB).....	9
3.2. L'enquête d'inventaire forestier national (IFN) réalisée par l'IGN.....	10
4. METHODOLOGIE.....	11
4.1. Enrichissement du DSB par des métriques de hauteur/largeur de haie.....	11
4.1.1. Principe de calcul d'un modèle numérique de surface	12
4.1.2. Traitements du MNHC	14
4.1.3. Choix de l'approche pour le calcul des métriques	15
4.1.4. Principe de calcul des métriques de haie	17
4.1.5. Déplacements des linéaires de haies.....	20
4.1.6. Application aux segments prélevés	21
4.2. Méthodologie d'évaluation des prélèvements récents de biomasse	22
4.2.1. Identification des haies récemment prélevées	22
4.2.2. Evaluation des volumes récemment prélevés	24
4.3. Méthodologie de calcul des stocks sur pied et récemment prélevés	25
4.3.1. Tarif de cubage et calcul du volume aérien total des segments de haie IFN.....	25
4.3.1.1. L'étude IFN « Haies Biomasse Basse-Normandie » 2010	25
4.3.1.2. Échantillonnage et protocole HBBN.....	26
4.3.1.3. Construction du tarif de volume aérien total.....	27
4.3.1.4. Application du tarif de volume aérien total aux segments de haie IFN	30
4.3.2. Modèle de prédiction du volume sur pied par les métriques MNHC.....	31
4.3.2.1. Mise en commun des volumes estimés sur les points IFN et du DSB enrichi des métriques 3D.....	31
4.3.2.2. Construction du modèle de prédiction métriques-volume aérien total applicable au DSB enrichi en 3D	32
4.3.2.3. Application du modèle aux linéaires départementaux - calcul des stocks.....	34
5. RESULTATS	36
5.1. Ressource bocagère actuelle	36
5.1.1. Linéaire bocager	36
5.1.2. Stock sur pied en volume	36
5.1.3. Stock sur pied en volume par classe de hauteur ou de largeur	37
5.1.4. Stock sur pied en biomasse.....	40
5.1.5. Stock sur pied en carbone.....	41
5.2. Ressource bocagère prélevée.....	42
5.2.1. Linéaire prélevé.....	42
5.2.2. Stock prélevé en volume.....	42

5.2.3. Stock prélevé en volume par classe de hauteur et de largeur	43
5.2.4. Stock prélevé en biomasse	45
5.2.5. Stock prélevé en carbone	45
5.3. Synthèse des valeurs régionales	46
5.4. Cartes des volumes sur pied et prélevés	47
6. APPORTS DE L'ETUDE ET PISTES D'AMELIORATION	50
6.1. Apports majeurs de l'étude	50
6.2. Points de vigilance et pistes d'amélioration	50
6.3. Perspectives	51
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	54
INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES.....	55
ANNEXES	57

RÉSUMÉ

Il est aujourd'hui admis que les haies bocagères rendent de nombreux services, parmi lesquels la production de bois et le stockage de carbone. Le bocage subit néanmoins une pression intense depuis plusieurs décennies et les politiques nationales et régionales autour de la gestion durable des haies doivent pouvoir s'appuyer sur des données documentées et cohérentes entre les territoires.

L'objectif de cette étude, menée par l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), est de fournir une première évaluation quantitative des stocks sur pied actuels en volume de bois, en biomasse et en carbone dans les haies, ainsi que leurs prélèvements récents, pour 31 départements français particulièrement bocagers.

Une méthodologie innovante, générique et complètement reproductible a été développée. Dans une démarche multisource, elle exploite la couche géographique du linéaire de haies du Dispositif de Suivi des Bocages (DSB), des Modèles Numériques de Hauteur de Canopée (MNHC) calculés à partir des photographies aériennes collectées en continu par l'IGN, ainsi que les données de l'enquête d'Inventaire forestier national (IFN) sur les haies. Des métriques de hauteur et de largeur de haie ont été calculées le long du linéaire du DSB par traitement des MNHC. En parallèle, un modèle de prédiction du volume sur pied par les métriques de hauteur et de largeur a été développé sur les placettes « haie » de l'IFN. L'application de ce modèle aux linéaires DSB départementaux enrichis des métriques a permis de calculer les stocks sur pied actuels et les volumes disparus au cours des dernières années (sans qu'il soit possible de distinguer la part des coupes inscrites dans une démarche de gestion durable) aux niveaux départemental et régional. Des cartes de répartition spatiale des stocks dans les territoires ont pu être produites.

A l'échelle de la zone d'étude (38 % de la surface métropolitaine), qui totalise les deux tiers du linéaire de haie de la France, le stock sur pied actuel en volume s'élève à environ 240 millions de mètres cubes (7 % du stock forestier national) correspondant à environ 60 millions de tonnes de carbone. Les prélèvements récents s'élèvent quant à eux à plus de 4 millions de mètres cubes par an (1,8 % du stock bocager sur pied) et plus d'un million de tonnes de carbone par an.

La méthodologie développée et les pistes d'amélioration identifiées ont permis d'établir les bases pour étendre l'évaluation des stocks bocagers actuels et récemment prélevés à l'ensemble du territoire métropolitain et quantifier leur évolution (croissance et prélèvements) au cours du temps. Des perspectives liées à l'exploitation future de millésimes MNHC supplémentaires et de la couverture nationale LiDAR HD (en cours d'acquisition) ont été proposées.

ABSTRACT

Hedges offer multiple services, including wood production and carbon storage. However, they have been subjected to intense exploitation for several decades and the national and regional policies interested in the sustainable management of hedges require relevant and coherent data between territories.

The objective of this study, carried out by the National Institute of Geographic and Forest Information (IGN), is to provide a first quantitative assessment of the current standing stocks of wood, biomass and carbon in hedges, as well as their recent harvest, for 31 French departments where hedges are particularly important.

An innovative, generic and reproducible methodology has been developed. It combines the geographic layer of hedgerows of the Dispositif de Suivi des Bocages (DSB), Digital Canopy Height Models (DCHM) computed from aerial photographs continuously collected by IGN, as well as data from the French National Forest Inventory (NFI), which includes a sample of hedge. Height and width metrics were calculated along the hedgerow linear entities of the DSB geographic layer from DCHM processing. In parallel, a model to predict the aboveground wood volume from the height and width metrics was developed for the hedges of the French NFI. The application of this model to the whole hedge geographic layer of each department enriched with hedge metrics made it possible to calculate the current standing stocks and the stocks harvested in recent years (without being able to distinguish the part of the harvest included in a sustainable management approach) at the departmental and regional scales. Maps of spatial distribution of the stocks in the territories were produced.

At the scale of the study area (38 % of mainland France), which includes two-thirds of the hedges of the country, the current aboveground wood volume amounts to around 240 million cubic meters (7 % of the national forest stock) corresponding to around 60 million tons of carbon. The recently harvested stock amounts to more than 4 million cubic meters per year (1,8 % of the current aboveground stock) and more than one million tons of carbon per year.

The methodology developed and the points of improvement identified could make it possible to extend the assessment of the current stocks in hedges and their recent harvest to the whole mainland France and to quantify their evolution (growth and harvest) over time. The possibility to use future versions of DCHM and the national HD LiDAR coverage (under acquisition) has been discussed.

1. Contexte du projet

Le bocage rend de nombreux services lorsque la densité et la qualité des haies est suffisante : corridor écologique, refuge de biodiversité, lutte contre les ruissellements et les inondations, régulation climatique, lutte contre l'érosion des sols, protection intégrée des cultures, protection des troupeaux, rôle paysager, clôtures, production de bois pour différents usages, stockage de carbone, etc.

La récolte de bois permet de donner une valeur économique à la haie pour les exploitants agricoles, et elle contribue, si elle se réalise dans un cadre de gestion durable, au maintien d'un bocage fonctionnel. A ce titre, la biomasse issue du bocage est de plus en plus mobilisée pour approvisionner les chaufferies biomasse en milieu rural. C'est ainsi que dans les régions les moins forestières la biomasse bocagère occupe une part significative du mix des énergies renouvelables. Les PRFB et SRB intègrent déjà pleinement ces ressources dans leurs objectifs de mobilisation.

Plus récemment, les haies font l'objet d'une attention particulière pour leur rôle dans le stockage du carbone dans la biomasse et dans les sols, faisant d'elles un des leviers d'atténuation du changement climatique.

Pour autant, les pressions exercées sur les haies sont importantes. Le linéaire de haies a diminué d'environ 70 % depuis les années 1950 et les disparitions se poursuivent. En parallèle, la ressource en bois des haies subit ponctuellement des pressions non maîtrisées.

Afin d'accompagner la restauration et l'extension des haies, le plan de relance du gouvernement inclut le programme « Plantons des haies ! » dont l'objectif est d'aider les agriculteurs qui souhaitent favoriser la biodiversité autour et à l'intérieur de leurs cultures en reconstituant les haies bocagères qui les entourent et en implantant des alignements d'arbres (agroforesterie intraparcélaire). Ce plan vise en particulier la plantation de 7000 km de haies sur la période 2021-2022. D'autres dispositifs en faveur de l'extension du linéaire des haies et de leur gestion durable (ex : label Haie, <https://labelhaie.fr>) existent déjà aux niveaux national, régional et local.

Afin de promouvoir un développement durable de l'utilisation de la biomasse d'origine bocagère qui soit compatible avec le maintien des autres fonctions assurées par les haies et d'évaluer les dynamiques de stockage/déstockage de carbone dans les haies, les pouvoirs publics ont besoin d'informations nationales, régionales et territoriales cohérentes sur les stocks de biomasse/carbone actuels, mais également de disposer d'informations sur les possibilités de récolte supplémentaire à différents horizons de temps dans un cadre de gestion durable de ces milieux.

2. Objectifs

Cette étude fait suite à des premières analyses réalisées en 2009 par SOLAGRO et l'IFN (Inventaire Forestier National) avec le soutien de l'ADEME. Une méthode de calcul des disponibilités en biomasse d'origine bocagère avait été réalisée à partir d'une estimation statistique du linéaire par type de haie issu de l'enquête IFN et d'une étude donnant la productivité de quelques chantiers d'exploitation dans l'Ouest de la France (Bouvier 2008). Les résultats de cette étude de référence alimentent encore à ce jour la base de données MOFOB (Module Forêt Bois) utilisée par les cellules biomasse en région pour évaluer les plans d'approvisionnement des projets de chaufferies biomasse.

En 2017 et 2018, l'association AILE (Bretagne) et la DRAAF (Normandie) ont commandé à l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière) des mises à jour des chiffres de 2009 pour ces deux régions. L'objectif était d'éclairer les politiques publiques (PRFB, SRB, plan bocage...) et de contribuer aux réflexions locales autour de l'élaboration d'une stratégie pour la mobilisation durable des bois bocagers. La méthodologie mise au point en 2009 a été actualisée, notamment pour mieux intégrer les référentiels de productivité des professionnels locaux.

La méthode utilisée pour les études régionales de 2017 et 2018 restait cependant largement perfectible car elle utilisait de nombreuses hypothèses et coefficients techniques faiblement documentés (données de chantiers, identification des haies productives et exploitables, coefficients de conversion entre unités de mesure, etc.). De plus les résultats correspondent à des statistiques au mieux régionales, non cartographiables et dont la précision n'est pas estimable. En outre la méthodologie ne permettait pas d'estimer des stocks de bois sur pied mais uniquement d'évaluer les volumes récoltables si toutes les haies non discontinues du territoire étaient prélevées comme sur les chantiers actuels. Enfin, la méthode ne permettait pas de projeter les stocks et les prélèvements futurs, en l'absence de scénarios de développement explicites et de modèles de croissance et de gestion des haies.

Ces études ont néanmoins apporté des informations de cadrage général aux décideurs régionaux, là où il n'existait aucun chiffre auparavant. Toutefois leurs limitations méthodologiques rendent de facto impossible la déclinaison des résultats en actions véritablement opérationnelles sur le terrain.

Des travaux conduits récemment à l'IGN ont rendu possibles certaines évolutions méthodologiques indispensables pour évaluer les stocks sur pied de bois et de carbone, donner une première estimation des récoltes actuelles, améliorer la précision et la résolution spatiale de ces estimations et, à plus moyen terme, réaliser des prospectives basées sur des scénarios explicites de développement du bocage.

Ces évolutions ont été permises par la production à l'IGN et l'OFB d'une couche d'information géographique sur les haies bocagères de France (le Dispositif de Suivi des Bocages - DSB) et par la mise à disposition par l'IGN de Modèles Numériques de Surface (MNS photogrammétriques) qui donnent la hauteur de la végétation à différentes dates. Ces nouvelles données spatiales, directement utilisables à l'échelle des territoires, peuvent être combinées avec le dispositif statistique de l'IFN qui mesure des haies bocagères depuis 2005 sur tout le territoire métropolitain selon un échantillonnage statistique, pour produire une estimation multisource inédite sur les volumes de bois dans les haies bocagères.

L'objectif de l'étude est de réaliser une première estimation quantitative des stocks actuels de bois/biomasse/carbone sur pied qui tienne compte de l'état de maturité des haies, aux niveaux régional et départemental. Il s'agit également d'estimer les volumes prélevés récemment dans les haies bocagères (coupes et arrachages). Les résultats de l'étude correspondent à des premières évaluations qui devront être validées et consolidées ultérieurement avec des données de terrain complémentaires. A cette fin, la méthode générique et répétable développée par l'IGN dans le cadre de l'étude fait l'objet d'une description détaillée. Ses limites sont précisées et les perspectives d'amélioration sont explicitées.

3. Sources des données de l'étude

La méthodologie multisource développée dans l'étude mobilise quatre sources de données, à savoir le DSB (voir chapitre 3.1), le dispositif IFN sur les haies (voir chapitre 3.2), l'étude Haie Biomasse Basse Normandie réalisée en 2010 (voir chapitre 4.3.1) et les MNHC calculés à partir des MNS photogrammétriques et des MNT de l'IGN (voir chapitre 4.1.1).

3.1. Le Dispositif de Suivi des Bocages (DSB)

Le Dispositif de Suivi des Bocages (DSB) est un projet réalisé en coproduction IGN-OFB dont les objectifs sont de cartographier les haies bocagères de France, de caractériser les territoires bocagers et de suivre leurs évolutions quantitatives et qualitatives dans une optique de protection et de restauration des trames bocagères et de leur biodiversité associée. Il est co-financé par le MAA, le MTE, l'OFB et l'IGN.

Trois phases distinctes sont identifiées dans la construction de ce dispositif :

- Phase 1 : production des couches d'information géographique de référence des haies et identification des territoires bocagers à l'échelle de la France métropolitaine. Cette phase a été finalisée mi-2020 avec la mise en ligne et la diffusion sur le site des géoservices IGN d'une couche sur les haies linéaires. L'identification des territoires bocagers se poursuit avec le comité scientifique du projet et vise notamment à créer une carte de France des territoires « bocagers » avec une approche scientifique. La production de cette carte est envisagée à la fin de la phase 2 ;
- Phase 2 : caractérisation des territoires bocagers afin de créer un plan d'échantillonnage stratifié pour la phase 3, à travers le calcul d'indicateurs par maille kilométrique (orientation des haies par rapport à la pente, taille des parcelles agricoles, diversité des cultures, quantité d'éléments hydrographiques, etc.). Cette phase, qui ne concerne que les 27 départements les plus bocagers, est réalisée au deux-tiers au moment de la finalisation de cette étude. Elle prendra fin en juin 2022 ;
- Phase 3 : mise en place et développement d'un protocole de suivi qualitatif sur le terrain avec un plan d'échantillonnage (actuellement en test). L'inventaire des haies (flore, espèces arborées, types de strates) est réalisé sur des mailles kilométriques. A partir de 2023, ce suivi qualitatif utilisera l'échantillonnage statistique stratifié (phase 2) afin de calculer des indicateurs sur la qualité des haies et du réseau de haies. Les relevés pourront être réalisés par des agents de l'Etat, des structures associatives et fédérales, des citoyens, des collectivités, etc. Le suivi qualitatif sera développé en lien avec des réseaux existants. A terme, un protocole de sciences participatives sera envisagé.

Pour chaque maille INPN (grille nationale 1km x 1km, Métropole, 2015 : <https://bit.ly/2SeoXZY>), la somme des longueurs de haies de la couche des haies linéaires a été calculée et a permis de mesurer la densité moyenne de haies par hectare par maille kilométrique sur l'ensemble du territoire national (annexe 1).

La couche des haies linéaires est majoritairement issue de la combinaison des haies surfaciques de la couche « Zone de végétation » de la BDTopo® (informations issues des prises de vue aériennes 2004 à 2015) et des haies surfaciques issues du Registre Parcellaire Graphique (RPG, informations issues des prises de vue aériennes 2011 à 2014), combinaison suivie d'une squelettisation. Des éléments complémentaires issus de la couche Zone de végétation de la BDTopo® (bosquets) et du RPG (arbres alignés, haies non arborées) ont également pu être retenus s'ils répondaient aux spécifications de largeur (moins de 20 m de large). De même d'autres objets ou parties d'objets de ces deux couches ont pu être éliminés s'ils ne correspondaient pas aux spécifications de largeur.

- Haies issues du thème végétation (BDTopo®) : une haie est une formation linéaire comportant des arbres, arbustes ou arbrisseaux sur au moins 25 m de long, sans interruption de plus de 20 m, sur une largeur inférieure à 20 m, et sa hauteur potentielle est supérieure à 1,30 m.

- Haies issues des surfaces non agricoles (RPG - SNA avant reprise par les agriculteurs) : une haie comporte des arbres, arbustes ou arbrisseaux, sans interruption supérieure ou égale à 5 mètres, sur une largeur inférieure à 20 mètres. On définit une haie comme un élément de végétation de moins de 20 m de large et de forme longiligne. Un élément dont la longueur est deux fois supérieure à la largeur est considéré comme longiligne.

Les haies issues de la fusion de ces deux sources disposent d'un seuil de largeur maximal de 20 m, homogène quelle que soit la source : les objets plus larges ne sont pas des haies. En cas de superpositions entre les deux sources de données, la géométrie de la haie issue du RPG est conservée. Des traitements ont permis de limiter les doublons d'une même haie dus aux différences entre les deux sources de

données. Les haies des zones urbaines denses, définies à partir d'une combinaison des zones d'habitation et des zones d'activités de la BDTopo®, ont été retirées du DSB car elles ne sont pas représentées de manière exhaustive dans la BDTopo®. Finalement, une squelettisation de l'information a permis de générer des objets linéaires à partir des surfaces.

Les données produites dans le cadre du Dispositif de Suivi des Bocages présentent plusieurs biais à ce stade : les données d'entrée utilisées proviennent de deux sources de données différentes constituées pour des besoins différents et n'ont pas la même définition de la haie ; les données ne sont pas cohérentes d'un point de vue temporel, elles n'ont pas la même date de référence pour un département donné ; l'exhaustivité des données en entrée n'est pas garantie. Toutefois, cette base de données de haies linéaires à grande échelle constitue un socle.

Compte tenu des moyens disponibles pour l'évaluation de la biomasse, les calculs ont été réalisés sur 31 départements métropolitains, dont 27 sont communs aux travaux en cours pour la production de la phase 2 du DSB. La sélection de ces 27 départements est décrite en annexe 2. Quatre départements ont été ajoutés spécifiquement pour l'évaluation de la biomasse (03, 18, 24 et 86) afin de couvrir un plus grand nombre de régions et de mieux représenter le vaste bassin bocager du centre de la France. Ces 31 départements comptent parmi les plus bocagers de France et représentent les 2/3 du linéaire national.

Les haies prises en compte pour les calculs de biomasse correspondent à l'ensemble des éléments inclus dans le DSB. Les alignements d'arbres sont donc inclus tandis que les haies des zones urbaines denses, les arbres épars, les bosquets et les vergers sont exclus.

3.2. L'enquête d'inventaire forestier national (IFN) réalisée par l'IGN

En France, l'IGN est l'établissement chargé de produire des informations de référence sur l'état des forêts, leur diversité et les volumes de bois qu'elles renferment (Hervé 2016 ; Hervé, Wurrpillot, Vidal & Roman-Amat 2014). Ces informations sont nécessaires à la définition et à l'évaluation des stratégies des organismes privés et des politiques internationales, nationales et locales du secteur forêt-bois.

L'IGN réalise l'inventaire forestier national (IFN), qui est l'enquête statistique permanente de la forêt française (IGN 2014a). Elle permet de mesurer, suivant des protocoles et des définitions publiques et normées, les états et les évolutions de la forêt en surface et en volume ainsi que les flux (production biologique, prélèvements, mortalité) à des échelles nationale, régionale ou territoriale (Hervé 2016 ; Hervé et al. 2014 ; IGN 2011 ; IGN 2016a). Depuis 2005, l'ensemble des forêts métropolitaines publiques et privées est inventorié tous les ans selon un échantillonnage systématique du territoire. Les objets inventoriés par l'IGN concernent les forêts, les peupleraies, les landes et les haies bocagères.

La haie bocagère est définie dans l'enquête IFN comme une formation linéaire arborée comportant des arbres sur au moins 25 mètres de long, sans interruption de plus de 20 mètres, sur une largeur inférieure à 20 mètres et d'une hauteur potentielle supérieure à 1,30 m. On parle aussi de « ligneux hors forêt ».

La méthode d'évaluation de la ressource bocagère de l'IFN se déroule en deux phases :

- en phase 1, un vaste échantillon de points répartis de manière aléatoire selon une grille systématique est photo-interprété afin d'identifier les éventuels segments de haie qui intersectent un transect d'azimut aléatoire à moins de 25 mètres de part et d'autre du point IFN.
- La deuxième phase consiste à se rendre sur un petit échantillon des points sur lesquels des haies ont été identifiées. Les haies en limite de champs et de jardins ou de zones artificialisées (routes à grande circulation, voies ferrées ou terrains bâtis) ne sont pas inventoriées. Cette phase de terrain vise à confirmer si les intersections identifiées par photo-interprétation sont bien des haies, et le cas échéant à collecter différents types de données sur la haie, son environnement et les arbres qui la composent (largeur et longueur de la haie, type de haie, essence principale de l'étage supérieur, hauteur moyenne de la haie, circonférence et hauteur d'un échantillon d'arbres, etc.).

Parmi les haies bocagères, l'IFN distingue les haies boisées (haies arborées et haies arbustives) et les cordons boisés. Les cordons boisés désignent des entités linéaires de moins de 20 mètres de largeur dont la concentration de la biomasse, estimée dans les tiges et implantée sur une bande de 2 mètres de large centrée sur l'axe du segment, doit être inférieure à 80 % de la biomasse totale. Autrement dit, la particularité des cordons boisés réside dans le fait que la biomasse n'est pas concentrée sur l'axe de la formation linéaire, mais plutôt répartie sur sa largeur. Chaque année l'IGN inventorie environ 400 haies.

4. Méthodologie

La méthodologie générique permettant d'évaluer les stocks sur pied et récemment prélevés dans les 31 départements de la zone d'étude est composée de plusieurs tâches complémentaires (figure 1) :

- i) Enrichissement du linéaire DSB avec des métriques de hauteur et de largeur de haie calculées à partir de photographies aériennes récentes ;
- ii) Identification du linéaire DSB ayant subi un prélèvement sur une période récente par analyse du différentiel entre deux millésimes de photographies aériennes ;
- iii) Elaboration de modèles permettant de calculer les stocks sur pied et récemment prélevés à partir des métriques de hauteur/largeur de haie du linéaire DSB enrichi ;
- iv) Calcul des stocks actuels et récemment prélevés en appliquant les modèles de volume aux linéaires DSB départementaux ;
- v) Identification de perspectives pour éprouver et renforcer notre méthode générique par des données issues de chantiers.

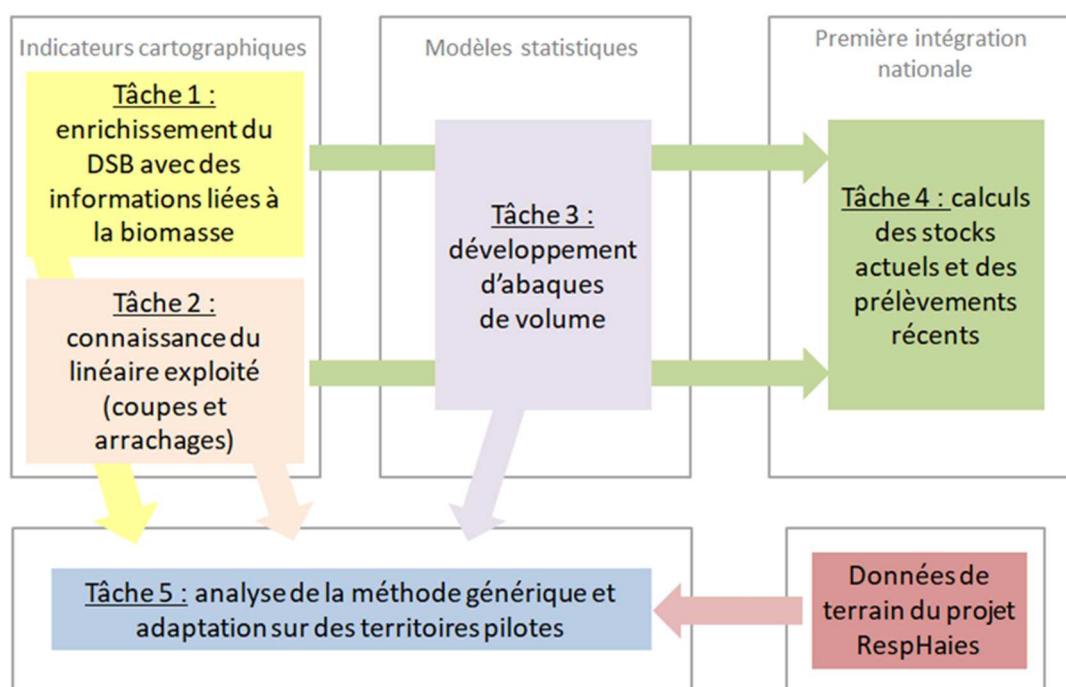


Figure 1 : schéma général de la méthodologie générique développée dans l'étude

4.1. Enrichissement du DSB par des métriques de hauteur/largeur de haie

L'objectif de la tâche 1 était d'ajouter des informations corrélées à la quantité théorique de biomasse sur pied aux linéaires de haie issus du Dispositif de Suivi des Bocages (DSB).

Parmi toutes les données candidates, la hauteur et la largeur de la haie sont des informations pertinentes pour cet objectif car elles renseignent l'espace occupé par la végétation ligneuse en fournissant une vision « 3D » des segments de haie. A cette fin, des métriques ont été conçues à partir des Modèles Numériques de Surface (MNS) disponibles à l'IGN et calculées sur chacun des segments de haies du DSB.

4.1.1. Principe de calcul d'un modèle numérique de surface

Ce paragraphe est en partie extrait du cours de Laure Chandelier, Département Imagerie Aérienne et Spatiale, École Nationale des Sciences Géographiques, 2011 (<http://cours-fad-public.ensg.eu/mod/scorm/view.php?id=865>).

La photogrammétrie est une technique qui permet de reconstituer une copie 3D de la réalité à partir de l'acquisition d'images, telles que des prises de vue aériennes, et la modélisation rigoureuse de la géométrie des objets physiques.

Une image constitue un enregistrement plan et déformé de l'environnement. Seule, elle ne permet pas d'obtenir les trois dimensions de l'espace. Pour reconstruire un environnement en 3D, il faut deux images (au minimum) prises de deux points de vue différents, et procéder par intersection. Ce principe est analogue au fonctionnement de notre système visuel qui nous permet d'appréhender notre environnement en relief, par nos deux yeux : c'est la stéréovision (figure 2 et figure 3). Deux images prises dans des conditions semblables à celles de la vision humaine (dont les points de vue sont parallèles mais décalés dans l'espace) forment un couple stéréoscopique qui permet de retrouver la sensation de relief par stéréoscopie (figure 4).

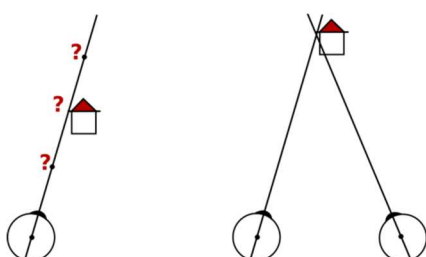


Figure 2 : un œil seul ne peut déterminer où se trouve la maison. Avec deux yeux, les rayons s'intersectent et la position de la maison est connue

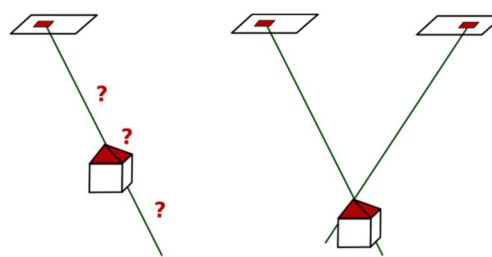


Figure 3 : avec une seule image, on ne peut déterminer à quelle distance se trouve la maison. Avec deux images (= un couple), les rayons s'intersectent et la position de la maison est connue

Ce principe est appliqué aux prises de vues aériennes comme illustré à la figure 4.

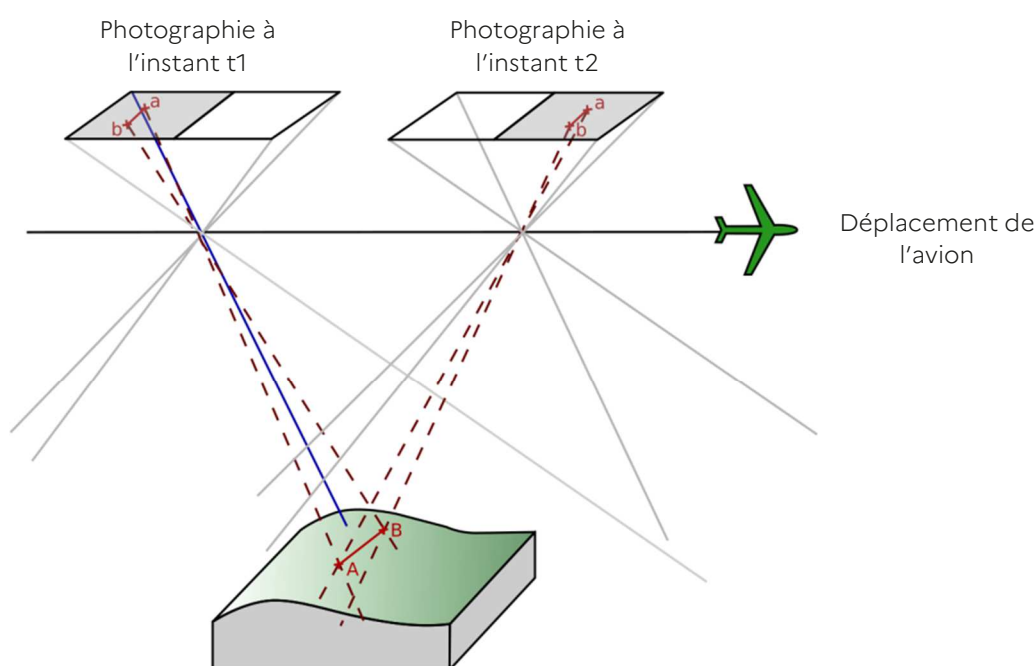


Figure 4 : principe du couple stéréoscopique lors d'une prise de vue aérienne

Une altitude est ainsi affectée à chaque pixel des prises de vues aériennes de l'IGN par la mise en corrélation des images qui représentent les mêmes zones au sol. La donnée résultante est un « modèle

numérique de surface » (MNS), couche d'information géographique qui fournit une description continue de l'altitude du « sur-sol », c'est-à-dire, pour les espaces naturels, du sommet de la végétation.

Compte tenu des spécifications des prises de vue aériennes, les MNS produits par l'IGN ont une précision théorique de ± 2 mètres en altitude.

Les MNS sont calculés à partir des prises de vues aériennes départementales. L'IGN photographie 1/3 du territoire métropolitain tous les ans, en moyenne, un département donné est ainsi photographié tous les 3 ans environ. C'est seulement depuis 2015 qu'un MNS photogrammétrique est systématiquement calculé à la suite des prises de vues aériennes (avant 2015 les calculs de MNS n'étaient pas automatisables à l'échelle d'un département).

Un modèle numérique de hauteur de canopée (MNHC) est ensuite calculé (figure 5) en soustrayant au MNS un modèle numérique de terrain (MNT) qui représente l'altitude du sol. Ce MNT, de résolution métrique en X et en Y, peut être obtenu soit par l'utilisation d'un Lidar aérien, soit par le même principe photogrammétrique que le MNS. Le MNT utilisé dans le cadre de ce travail est le RGE Alti® de l'IGN qui compile à ce jour des dalles (images de 1x1 km ou chaque pixel de 1x1 mètre porte une information d'altitude) obtenues avec des données Lidar et des dalles obtenues avec des données issues de photographies aériennes. Lorsque les dalles du RGE Alti® proviennent d'une acquisition Lidar, l'exactitude altimétrique est comprise entre 0,2 m et 0,5 m, et lorsqu'elles ont été obtenues par corrélation d'images aériennes, elle est comprise entre 0,5 m et 0,7 m, selon la documentation IGN. A noter qu'une petite zone au Nord-Ouest du Morbihan ne disposait pas du RGE Alti® lors de la réalisation de ce projet, et que ce sont les données de la BD Alti® V1 qui ont été utilisées pour cette zone. Ces données ont une exactitude altimétrique comprise entre 2 et 8 mètres. La figure 6 donne pour les 31 départements les sources de données utilisées pour le MNT.

Le MNHC est une représentation continue de la hauteur des objets. Il s'agit d'une donnée complexe qui témoigne de toute l'irrégularité de la canopée. Sa résolution est fine : issu de prises de vues aériennes à 25 cm de résolution, il est constitué de pixels élémentaires de 50 cm de côté portant une information de hauteur. La version manipulée est une version départementale constituée d'environ 6 000 à 11 000 dalles kilométriques en fonction des départements.

Pour le calcul du stock sur pied, ce sont les derniers MNS disponibles dans chacun des 31 départements qui ont été utilisés. La figure 7 donne les dates des MNS utilisés par département pour la tâche 1.



Figure 5 : la différence entre le modèle numérique de surface obtenu par corrélation d'images et le modèle numérique de terrain permet d'obtenir le modèle numérique de hauteur de canopée (MNHC) qui décrit la hauteur des arbres

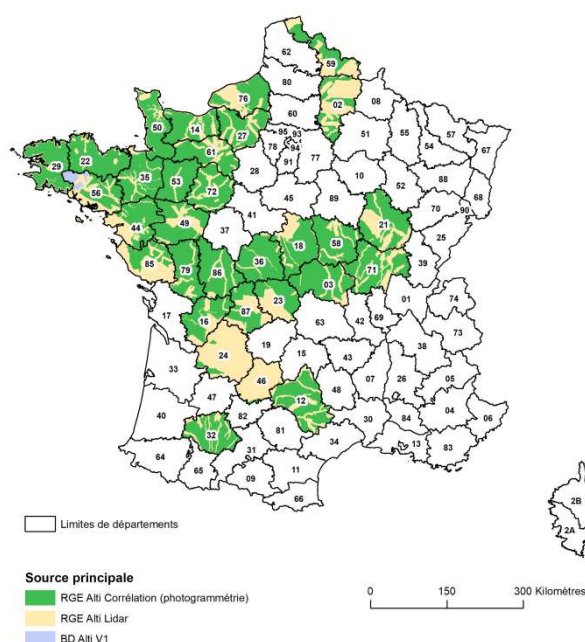


Figure 6 : source des données utilisées pour les données altimétriques

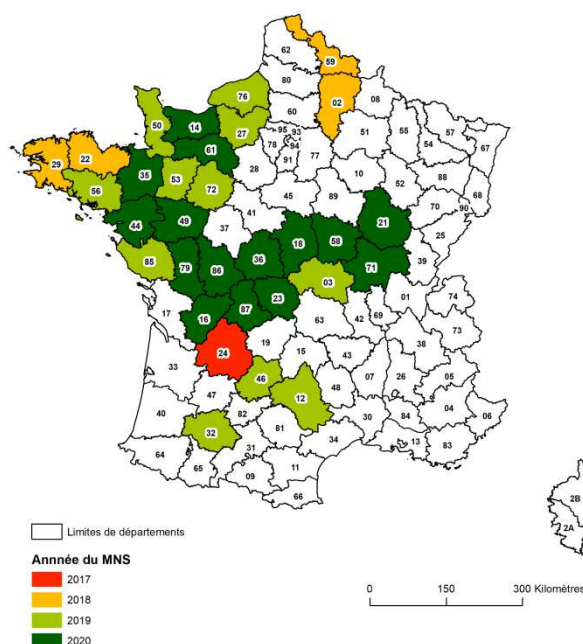


Figure 7 : années des modèles numériques de surface utilisés pour prédire les stocks sur pied

4.1.2. Traitements du MNHC

Le MNHC calculé sur l’emprise des segments du DSB a été seuillé pour ne garder que les valeurs de hauteur strictement supérieures à 3 mètres afin de limiter les erreurs liées à l’imprécision du MNS, d’écartier les éventuelles confusions avec des cultures de maïs dans le cas de haies qui auraient été coupées entre la date de la donnée ayant servi à produire le DSB et la date du MNS, et pour ne retenir que les haies susceptibles de stocker un volume de bois mesurable sur les points IFN (données de calibration des modèles de volume). Un seuil maximal de hauteur de 45 mètres a également été appliqué car au-delà les valeurs sont jugées aberrantes (figure 8).

Ce seuillage permet, dans une certaine mesure, de corriger l’ancienneté du DSB puisque les haies qui ont disparues depuis la date de sa production seront exclues des calculs de stock. En revanche aucun processus n’a été appliqué pour ajouter les haies omises du DSB initial ou les plantations récentes.

Les emprises suivantes sont ensuite déduites du MNHC à l’aide des données issues de la BD Topo® :

- Surfaces en eau avec une zone tampon¹ de -1 mètre (ces surfaces entraînent des erreurs de corrélation lors de la production du MNS et donc des hauteurs aberrantes sur le MNHC) ;
- Surfaces de forêts fermées avec une zone tampon de -2 mètres ;
- Surfaces de bâtiments avec une zone tampon de +3 mètres ;
- Tronçons de route (linéaires) avec une zone tampon de +1 mètre ;
- Tronçons de voies ferrées (linéaires) avec une zone tampon de +1 mètre.

Le résultat de ce processus est un MNHC dit « seuillé et filtré » qui limite les risques de confusion avec des éléments linéaires non arborés ou non bocagers. Ce processus est réalisé pour chaque dalle kilométrique du MNS.

¹ Une zone tampon ou « buffer » définit une surface située à une certaine distance autour d’un objet géographique. Si la valeur utilisée pour définir la zone tampon est positive, il s’agit d’une dilatation de l’objet, sinon il s’agit d’une érosion.

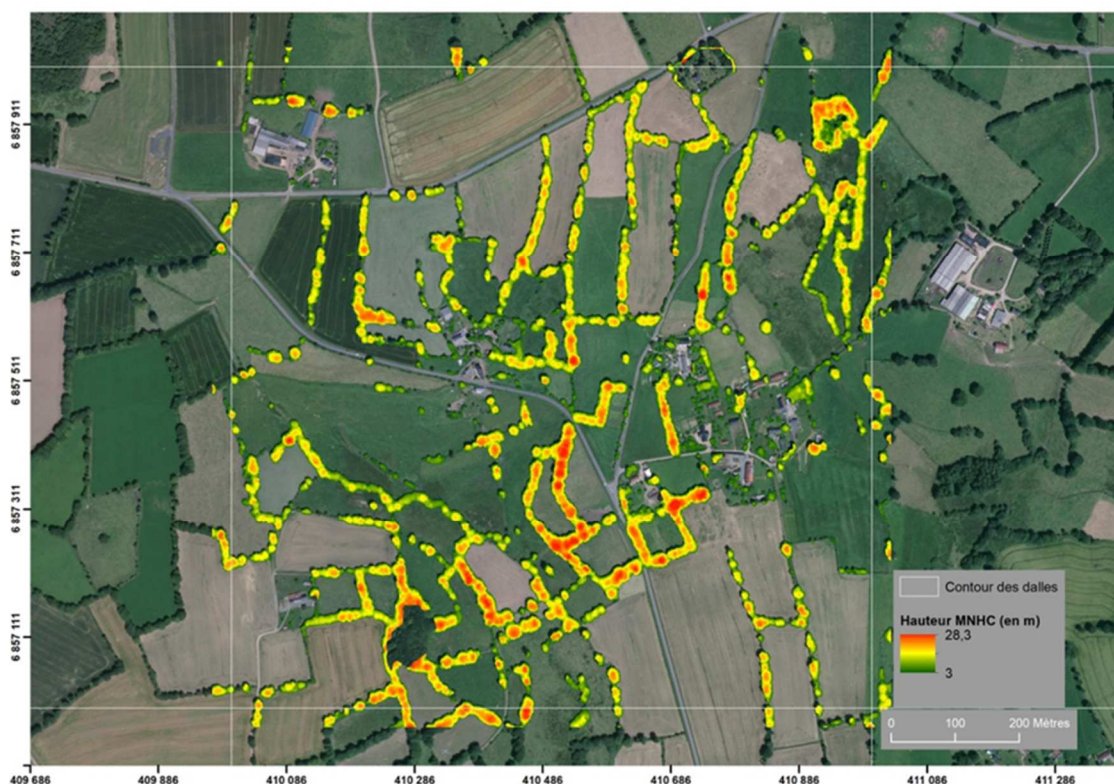


Figure 8 : dalle kilométrique du MNHC, seuillée et filtrée, sur une zone de la Manche (50)

4.1.3. Choix de l'approche pour le calcul des métriques

Deux approches ont été explorées pour l'attribution de données 3D aux haies du DSB :

- Une approche par perpendiculaire : des perpendiculaires de 10 mètres de longueur sont tracées, tous les 5 mètres au plus, de chaque côté de l'axe des haies, soit une longueur totale de 20 m. Le long de ces perpendiculaires les valeurs de hauteur supérieures à 3 mètres sont lues sur le MNHC. La valeur maximum de la hauteur donne la hauteur de la végétation attribuée au segment de haie (voir figure 9). La longueur de la perpendiculaire située au-dessus du seuil de 3 mètres de hauteur donne la largeur locale de la végétation du segment de haie.
- Une approche par segmentation de type « bassins versants » : le MNHC est inversé, les maximums locaux (sommets des arbres) deviennent les hauteurs les plus basses (considérées comme des exutoires pour la segmentation). Une segmentation par bassins versants est alors possible (figure 10). Cette technique est fréquemment mise en œuvre pour le détournement des houppiers sur les modèles numériques de hauteur de canopée (Panagiotidis, 2017).

L'approche par bassins versants permet de calculer des statistiques « zonales » (moyenne, écart-type, quantile) pour chaque bassin. Ces statistiques permettent théoriquement de mieux décrire la canopée de la haie que les simples valeurs de largeur et de hauteur obtenues par la technique des perpendiculaires. Bien que théoriquement prometteuse pour approcher la densité de la végétation au sein des haies, cette approche souffre d'un inconvénient majeur : il est nécessaire que les linéaires des haies du DSB soient correctement positionnés sur l'axe des haies afin de réattribuer correctement les informations des bassins versants aux linéaires correspondants. Malheureusement cela n'est pas toujours le cas dans la version actuelle du DSB.

Pour procéder au recalage des linéaires, une technique a été imaginée et mise en œuvre pour les haies de plus de 3 mètres de hauteur. Elle consiste à déplacer le linéaire de haie sur les coordonnées X-Y du point le plus haut identifié par la technique des perpendiculaires. Cependant, l'approche par bassins versants n'a pas été retenue car elle aurait nécessité un premier calcul par la technique des perpendiculaires pour recalibrer les haies, puis de faire les calculs par bassins versants. Or, cela ajoutait des temps de traitement et une complexité qui n'ont pas été jugés compatibles avec les délais du projet. Cette technique constitue en revanche une perspective d'amélioration de la méthode.

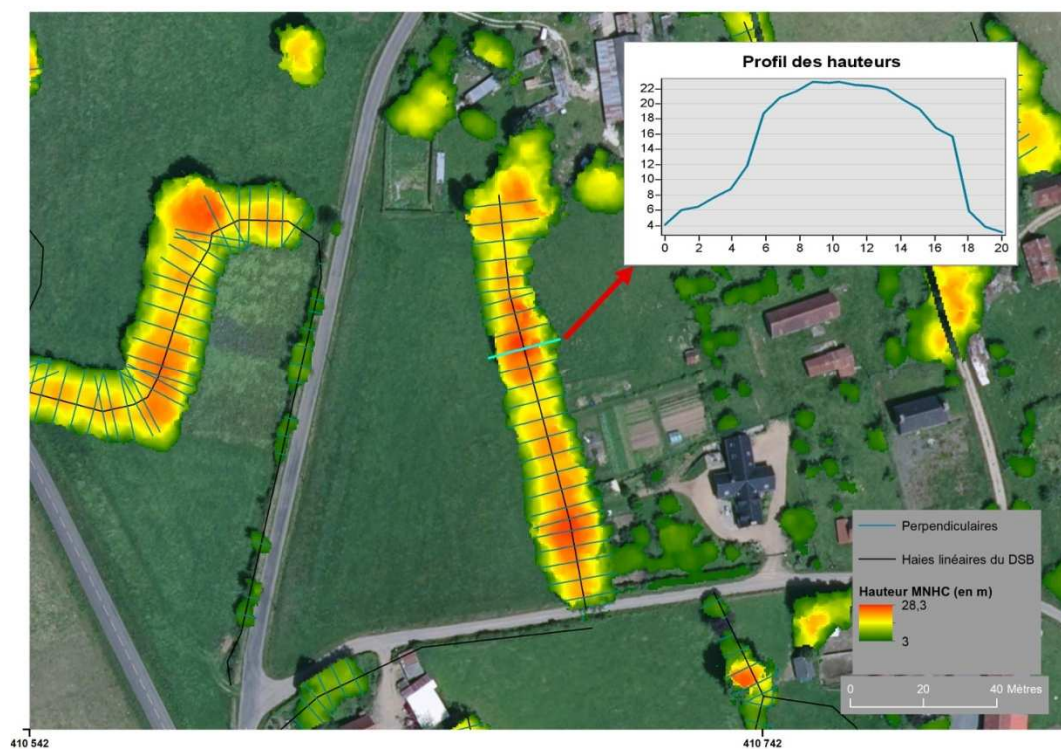


Figure 9 : des perpendiculaires sont créées le long de l'axe de la haie pour extraire une information d'altitude à partir du MNHC seuillé et filtré. Des perpendiculaires « 3D » sont ainsi générées. Lorsque le MNHC présente une absence de données (la photo aérienne est visible, par exemple à l'extrémité de la perpendiculaire), les perpendiculaires 3D sont rognées. Ainsi la longueur de la perpendiculaire 3D correspond à la largeur de la haie et la lecture du profil des hauteurs (exemple en haut à droite pour la perpendiculaire en bleu ciel) permet de connaître la hauteur maximum de la haie



Figure 10 : exemple de résultat d'une segmentation du MNHC seuillé et filtré par un algorithme de bassin versant. Les différentes couleurs représentent des bassins versants différents

4.1.4.Principe de calcul des métriques de haie

Le calcul est effectué par département. Le long des haies linéaires du DSB des points sont générés tous les 10 mètres (figure 11).



Figure 11 : exemple de haies linéaires du DSB sur le département de la Manche (50) et points tous les 10 mètres associés

Chaque dalle du modèle numérique de hauteur de canopée est ensuite traitée de la façon suivante :

- Extraction des haies du dispositif de suivi des bocages qui intersectent la dalle du MNHC (ces haies peuvent dépasser la dalle de plusieurs mètres) ;
- Une première découpe des haies est réalisée à l'aide des points créés tous les 10 mètres. A noter que la longueur des haies n'étant généralement pas un multiple de 10 mètres, des segments de moins de 10 mètres sont aussi créés par ce processus, voir figure 12. Néanmoins, les segments issus de cette étape seront nommés pour simplifier « les segments de 10 mètres » dans la suite de ce document ;

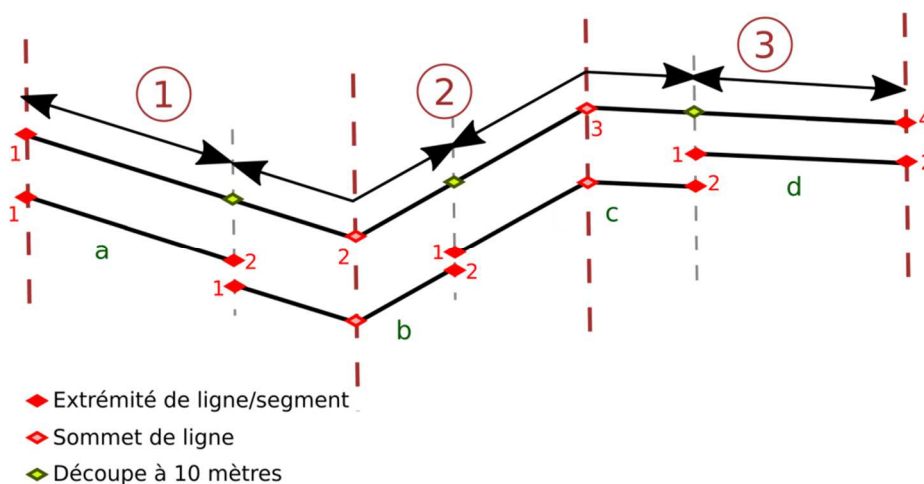


Figure 12 : principe de la découpe des haies en segments de 10 mètres. Une haie de 38 mètres constituée de 3 segments de droite ①, ②, ③ (2 sommets de ligne intermédiaires) est découpée en 4 segments a, b, c et d. La longueur des segments a, b, c est de 10 mètres et celle du segment d est de 8 mètres dans ce cas

- Seuls les segments de 10 mètres qui intersectent la dalle kilométrique du MNHC sont conservés pour la suite de l'analyse. Ces segments de 10 mètres seront le support élémentaire des informations de largeur et hauteur ;
- La dalle kilométrique du MNHC est agrandie de 30 mètres dans toutes les directions (à l'aide des dalles adjacentes), ainsi, même les segments de 10 mètres qui sont situés au bord de la dalle kilométrique pourront se voir attribuer des informations de hauteur/largeur ;
- Si les segments de 10 mètres conservés sont constitués de plus de deux points (le segment présente un virage), une deuxième découpe est effectuée aux points intermédiaires (sommets de ligne, voir figure 12). Enfin, à l'issue de cette éventuelle deuxième découpe, les segments résultant sont redécoupés tous les 5 mètres (troisième découpe). Chaque segment de 10 mètres est ainsi redécoupé en deux sous-segments au minimum ;
- Création de perpendiculaires de 20 mètres (largeur théorique maximum d'une haie dans le DSB) de long au centre de chaque sous-segment issu de la troisième découpe ;
- Les valeurs de largeur/hauteur sont calculées pour chaque sous segment comme indiqué sur la figure 9, puis ces valeurs sont agrégées pour restituer des résultats par segment de 10 mètres de longueur. Pour chaque segment de 10 mètres, l'agrégation est réalisée par le calcul d'une moyenne des valeurs de hauteur et largeur des sous-segments qui le composent pondérée par leur longueur respective. Pour un segment de 10 mètres composé de 3 sous-segments a, b, c de longueur L_a , L_b , L_c et de hauteur H_a , H_b , H_c la formule suivante donne la hauteur attribuée au segment de 10 mètres :

$$\frac{L_a \times H_a + L_b \times H_b + L_c \times H_c}{L_a + L_b + L_c} \quad (1)$$

Le même type de calcul est réalisé pour la largeur.

Un certain nombre de techniques ont été mises en œuvre pour limiter les erreurs de calcul de l'attribut « largeur ». En effet dans le cas de haies dont les houppiers se touchent (haies doubles dont les canopées surplombent ou non un réseau routier, ferré ou hydrographique) les largeurs peuvent être surestimées par la méthode retenue. Pour limiter ces problèmes, un système de découpe des perpendiculaires par les réseaux et les linéaires de haie a été implémenté. Ainsi une perpendiculaire ne peut se prolonger au-delà d'une route, d'un cours d'eau, d'une voie ferrée ou d'une haie, autre que celle dont elle est issue, voir figure 13.

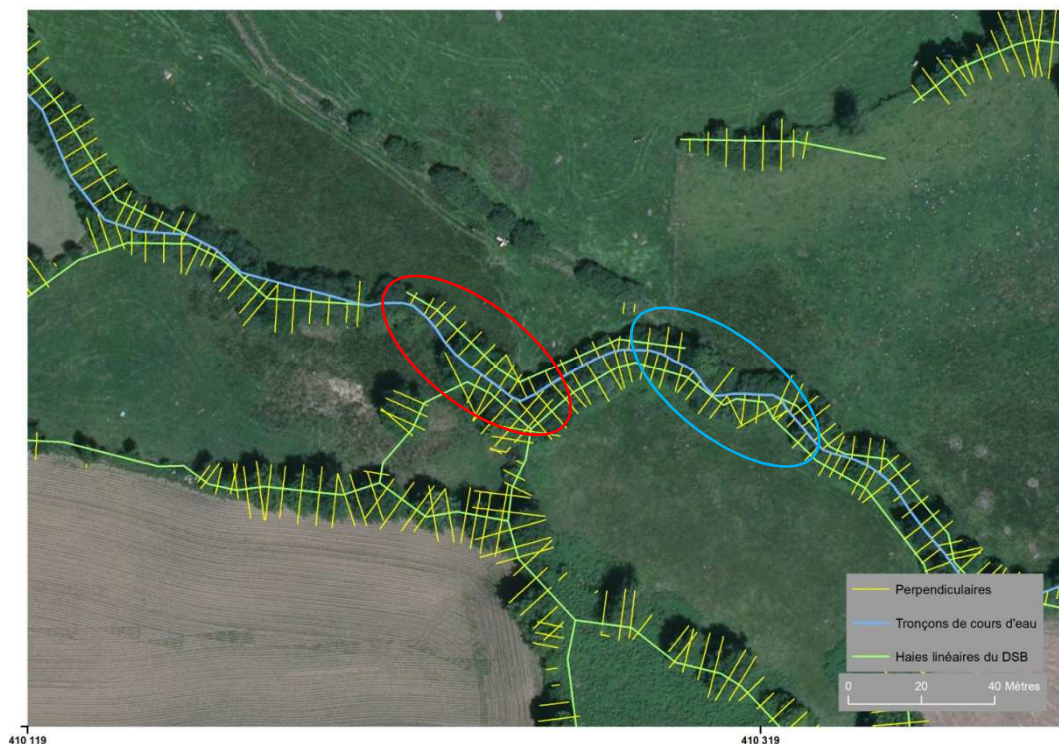


Figure 13 : La zone d'intérêt est matérialisée par l'ellipse rouge : les perpendiculaires des haies situées de part et d'autres du cours d'eau ne traversent pas le tronçon de cours d'eau. Du fait de la technique employée, quelques erreurs subsistent lorsque les linéaires de réseau et de haie sont extrêmement proches, moins de 30 cm, ellipse bleue

- De même les perpendiculaires de grande longueur (plus de 18 mètres) situées à moins de 5 mètres d'un « virage », d'un angle inférieur à 120°, ou d'une intersection de haie ne sont pas prises en compte dans les calculs afin d'éviter les doubles comptes. En effet ces perpendiculaires sont susceptibles de présenter des largeurs de haies qui ne reflètent pas la réalité du terrain car elles sont parallèles à l'axe d'une autre haie, voir figure 14. Si suite à ce processus des segments de 10 mètres ne possèdent plus aucune perpendiculaire (cela est possible si le segment qui résulte de la première découpe fait moins de 10 mètres en réalité), sa hauteur et sa largeur seront mis à 0 et le segment ne portera pas de volume. Dans le cas contraire les moyennes de hauteur et de largeur du segment sont calculées avec les perpendiculaires restantes. Pour un segment de 10 mètres composé de 3 sous-segments a, b, c de longueur La, Lb, Lc, de hauteur Ha, Hb, Hc et dont le sous-segment a est situé près d'une intersection ou d'un « virage » et présente une largeur supérieur à 18 mètres, la formule suivante donne la hauteur du segment de 10 mètres :

$$\frac{La \times 0 + Lb \times Hb + Lc \times Hc}{Lb + Lc} \quad (2)$$

Un calcul similaire est appliqué pour calculer la largeur.



Figure 14 : les perpendiculaires situées au niveau des angles <= 120° ou au niveau des intersections des haies indiquent des largeurs de haies aberrantes. Les valeurs de largeur et de hauteur correspondantes ne sont pas retenues pour les calculs

Une couche départementale complète est ensuite reconstituée à partir des segments de 10 mètres. Les segments situés en bord de maille subissent un traitement particulier pour éviter les doublons.

4.1.5. Déplacements des linéaires de haies

Comme cela a été évoqué précédemment, lors de l'ajout des informations de hauteur et de largeur sur les linéaires de haies du DSB, un processus de recalage sur le haut des haies du MNHC seuilé et filtré a été mis en place. L'objectif de ce recalage est d'améliorer la détection des linéaires prélevés (tâche 2) dont le principe repose sur le calcul d'une différence de hauteur entre deux millésimes de MNS le long des linéaires de haie.

Pour chaque sous-segment de la troisième découpe, si le segment n'est pas situé sur une haie, mais à moins de 3 mètres d'une haie de plus de 2 mètres de large, le centre du segment est déplacé sur les coordonnées X, Y du point de hauteur maximum sur la perpendiculaire qui lui est associée. Si plusieurs sous-segments déplaçables sont en continuité, ils sont groupés et un déplacement moyen est appliqué au groupe pour éviter les effets de zigzag. De même si un ou plusieurs sous-segments non déplaçables totalisent une longueur inférieure à 5 mètres et sont en continuité, de part et d'autre, avec des sous-segments déplaçables, ils seront groupés avec ces derniers. Dans certains cas, le déplacement ne s'effectue pas sur le point de hauteur maximum mais sur le point médian de la perpendiculaire interpolée, car le point de hauteur maximum peut être situé sur le bord de la haie. La figure 15 présente les linéaires issus du recalage et la comparaison avec les linéaires d'origine.

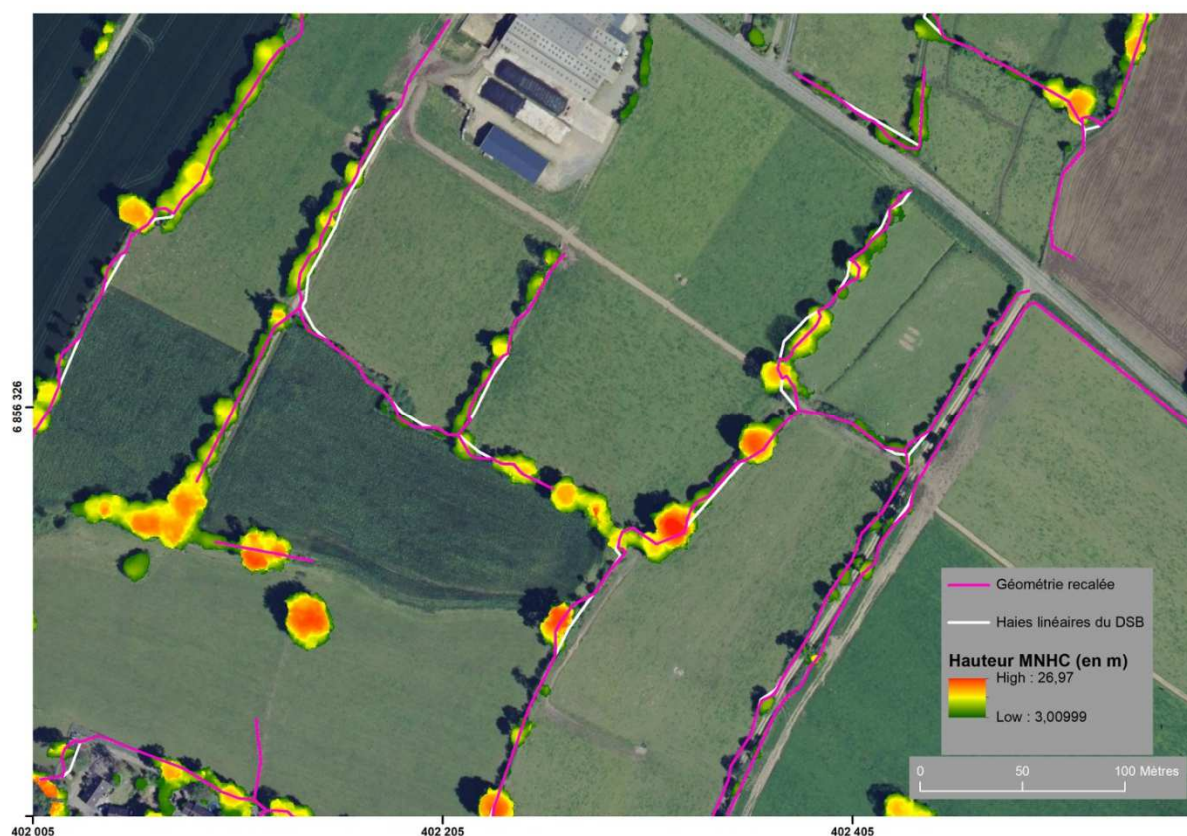


Figure 15 : comparaison des linéaires du DSB (en blanc) avec les linéaires recalés sur le MNHC (en rose)

La géométrie des linéaires issus du recalage est très anguleuse, l'objectif de recalcr la haie sur le MNHC est toutefois atteint.

C'est toujours la longueur initiale des sous-segments, avant modification de la géométrie, qui sert de base aux calculs des moyennes pondérées de hauteur et de largeur. De même les stocks de bois sont calculés en utilisant les longueurs initiales des segments du DSB, et pas les longueurs issues du recalage.

4.1.6. Application aux segments prélevés

Afin d'affecter un volume de bois aux segments prélevés identifiés par la tâche 2, les calculs de largeur et de hauteur ont également été appliqués aux anciens millésimes de MNS. Ces millésimes sont ceux qui précèdent immédiatement ceux utilisés pour la tâche 1.

Comme expliqué précédemment, c'est seulement depuis 2015 qu'un MNS photogrammétrique est systématiquement calculé à la suite des prises de vues aérienne. C'est pourquoi tous les départements métropolitains ne disposent pas encore de deux millésimes de MNS fin 2021. Parmi les départements concernés par cette étude, seul l'Aisne (02), pour lequel le premier MNS date de 2018, ne dispose pas d'un deuxième millésime. La figure 16 donne les dates des MNS dits « anciens » utilisés pour la tâche 2.

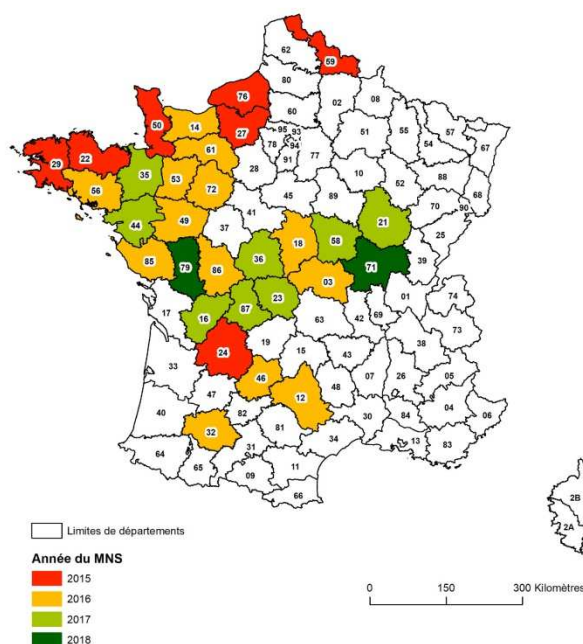


Figure 16 : années des anciens modèles numériques de surface utilisées pour la tâche 2

La tâche 2 identifie les segments prélevés à partir de la différence de hauteur entre les anciens MNS et ceux utilisés pour la tâche 1 le long des linéaires recalés, soit environ 3 ans en moyenne. L'utilisation des linéaires recalés à cette étape permet de mieux identifier les haies prélevées car la différence de hauteur est calculée le long de l'axe des haies recalées. Le processus décrit au paragraphe 3.1.4 est réappliqué aux MNS anciens pour calculer une hauteur et une largeur avant prélèvement sur les seuls segments identifiés comme ayant subi une perte de hauteur entre les deux millésimes de MNS. Par contre, le linéaire utilisé pour les calculs des métriques issues du MNS est toujours celui du DSB original, le linéaire recalé étant trop anguleux pour servir de base à la génération des perpendiculaires. Chaque segment prélevé se voit ainsi doté d'une largeur et d'une hauteur avant et après exploitation. Ces calculs n'ont pas pu être réalisés sur les segments non prélevés dans le cadre de l'étude.

Les modèles numériques de surface (MNS) sont calculés par l'IGN à partir des prises de vues aériennes départementales. Ces modèles fournissent une description continue du « sur-sol », c'est-à-dire, pour les espaces naturels, du sommet de la végétation. Il est possible de soustraire à ces MNS l'altitude du sol donné par un modèle numérique de terrain (MNT) pour obtenir un modèle numérique de hauteur de canopée (MNHC), représentation continue de la hauteur de la végétation. Cette donnée est mobilisée pour attribuer une hauteur et une largeur aux linéaires de haies du dispositif de suivi des bocages. Pour réaliser ce travail une méthode basée sur la génération de lignes perpendiculaires à l'axe des haies a été élaborée. Ces données permettront d'évaluer le stock de bois sur pied dans les haies bocagères, en servant de prédicteurs aux modèles de volume calibrés sur des données de terrain. Ce travail est réalisé sur deux éditions de MNS successives afin d'évaluer les volumes prélevés.

4.2. Méthodologie d'évaluation des prélèvements récents de biomasse

4.2.1. Identification des haies récemment prélevées

Cette tâche vise à développer une méthode d'évaluation des niveaux de prélèvement du bocage impactant la hauteur de la végétation (donc hors élagages). Pour cela, la donnée MNS et le linéaire DSB recalé issu de la tâche 1 ont été utilisés.

Réaliser un différentiel pixel à pixel entre deux MNS correspondants à deux millésimes de BD Ortho © revient à mesurer les évolutions du sursol entre ces deux millésimes. Dans le cas d'une coupe d'arbre (arbre isolé, de forêt ou d'une haie) le différentiel MNS1-MNS2 sera positif et correspondra à la hauteur de l'arbre coupé. Les millésimes disponibles sur les départements de l'étude sont présentés en annexe 3. Afin d'optimiser les temps de calcul, le différentiel de MNS a été réalisé sur des MNS ré-échantillonnés à 50 cm, c'est-à-dire présentant une valeur de hauteur tous les 50 cm « terrain » sur les axes Nord-Sud et Est-Ouest obtenue en moyennant les valeurs du MNS source de 20 ou 25 cm de résolution. Les figures 17 et 18 présentent deux MNS calculés sur la même zone mais séparés de plusieurs années. Le résultat du différentiel de hauteur a été seuillé à 5 m. Il en résulte une image binaire de 50 cm de résolution dont les pixels de valeur 1, représentés en rouge à la figure 19, correspondent aux endroits où le sur-sol a perdu au moins 5 m de hauteur entre les deux dates.

En plus des linéaires prélevés de manière complète, la méthode permet de détecter les arbres prélevés de manière isolée au sein d'une haie. Il en est de même pour les arbres têtards si la perte de végétation en hauteur est supérieure à 5 m. Les prélèvements non détectés par cette méthode sont ceux n'impactant pas l'axe de la haie (élagages) et ceux impactant l'axe de la haie avec un différentiel de hauteur de végétation de moins de 5 m (coupe d'arbres de moins de 5 m ou étêtage de grands arbres).

Sur la figure 20, le croisement entre les zones rouges et le linéaire DSB (jaune) permet d'isoler les parties du linéaire DSB qui correspondent à des arbres enlevés (linéaires prélevés). Ceci fait l'hypothèse qu'une perte de hauteur de 5 m du MNS le long de l'axe de la haie (linéaire DSB) correspond à une coupe d'arbre de bocage. Le cumul par département de ces linéaires permet d'estimer leur importance brute (en km) et relative (en %) ramenée au linéaire total du département.

MNS date 1 (vue ombrée) :



Figure 17 : MNS date 1 (vue ombrée)

MNS date 2 (vue ombrée) :



Figure 18 : MNS date 2 (vue ombrée)

Différentiel MNS date 1 – MNS date 2 seuillé à 5 m de hauteur (en rouge), sur MNS date 2 :

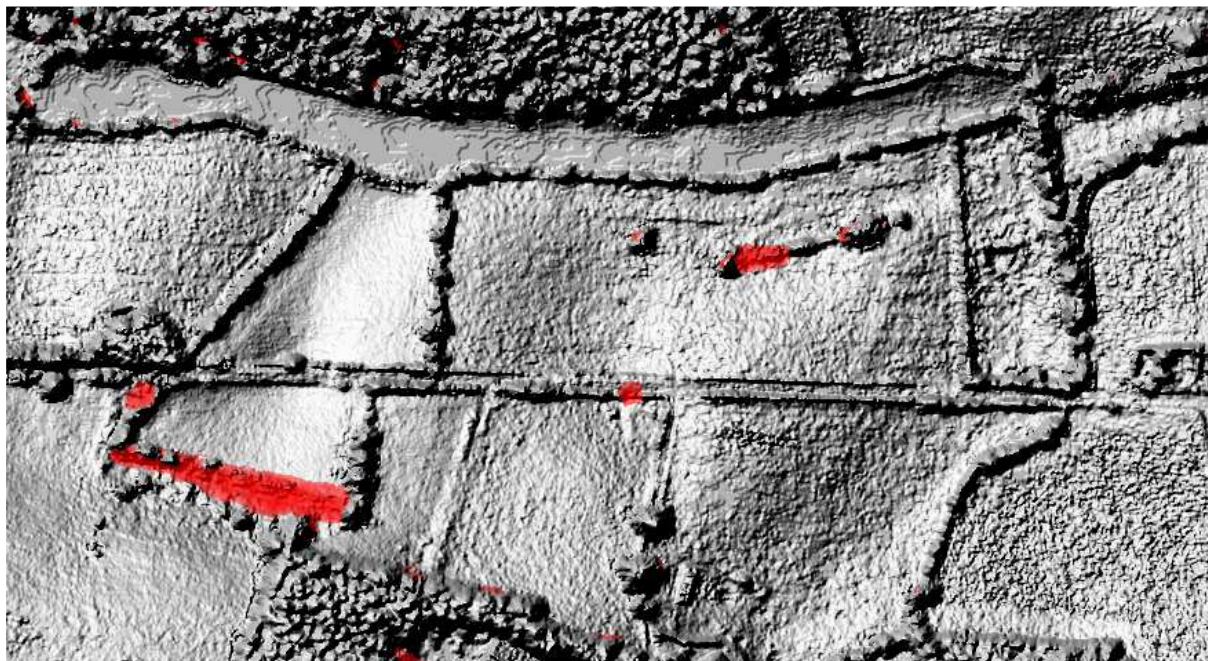


Figure 19 : Différentiel MNS1 – MNS2 > 5m (en rouge, sur vue ombrée MNS2)

Différentiel MNS date 1 - MNS date 2 seuillé à 5 m de hauteur (en rouge), sur MNS date 2 et linéaire DSB en jaune :

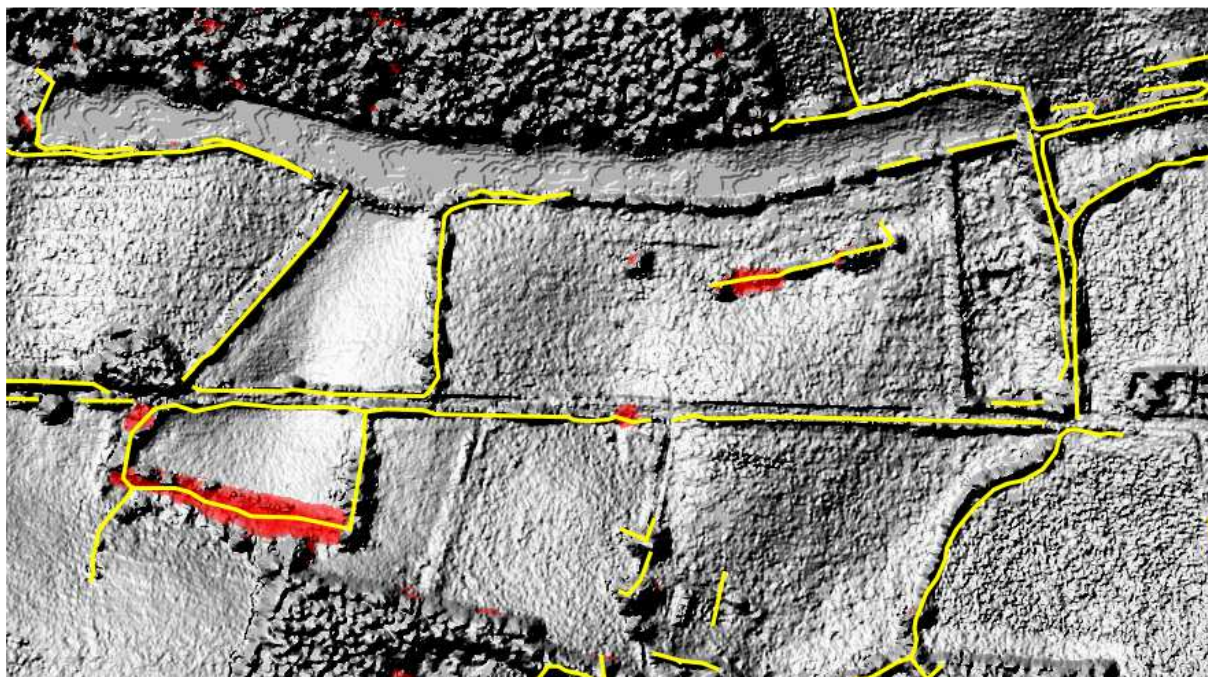


Figure 20 : Différentiel MNS1 –MNS2>5m (rouge, sur vue ombrée MNS2 et linéaire DSB en jaune)

4.2.2. Evaluation des volumes récemment prélevés

L'étape précédente isole une partie des sous-tronçons de 10 m concernés par une coupe de l'étage dominant (perte de hauteur de végétation d'au moins 5 m). Sur ce sous-ensemble de segments de bocage, on calcule à nouveau les métriques de largeur/hauteur relatifs au millésime le plus ancien de MNS. Ainsi on peut en déduire un volume de biomasse sur pied avant la coupe. Ces tronçons disposent aussi d'un volume associé au millésime 2. La différence entre ces deux volumes permet d'aboutir à une estimation des volumes prélevés par département au cours de la période séparant les deux photos.

4.3. Méthodologie de calcul des stocks sur pied et récemment prélevés

Pour pouvoir attribuer un volume de bois sur pied aux tronçons du linéaire DSB, il est indispensable, au préalable, d'élaborer un modèle permettant de prédire le stock de bois sur pied des segments de haie à partir des métriques MNHC de hauteur/largeur correspondantes. Ce modèle ne peut être établi que sur des haies où les deux informations (métriques et volume) sont disponibles. Il a donc été élaboré sur les haies inventoriées par l'IFN (dites « haies IFN » dans le reste du document) et incluses dans le périmètre de l'étude, seules zones pouvant disposer à la fois d'un volume de bois aérien total (issu d'un tarif de cubage spécifiquement développé dans cette étude et applicable aux données de l'IFN) et des métriques MNHC de hauteur/largeur de haie (calculées grâce à la méthode développée à la tâche 1). Tous les volumes (en mètres cubes de bois, notés m³), biomasses (en tonnes de matière sèche, notées tMS) et équivalents carbone (en tonnes de carbone, notées tC) estimés dans l'étude incluent la tige, les branches et les brindilles.

La méthode de calcul des stocks sur pied est constituée de plusieurs étapes (figure 21) :

1. Élaboration d'un tarif de cubage du volume aérien total des segments de haie IFN ;
2. Mise en relation du volume aérien total (issu du tarif) des segments de haie inventoriés par l'IFN dans la zone d'étude avec les métriques MNHC calculées sur ces mêmes segments : élaboration d'un modèle de prédiction du volume aérien total du segment de haie IFN à partir des métriques MNHC correspondantes ;
3. Application du modèle de prédiction au linéaire DSB enrichi des métriques MNHC (millésimes 1 et 2) pour calculer les volumes sur pied et récemment prélevés ainsi que leurs équivalents biomasse et carbone.

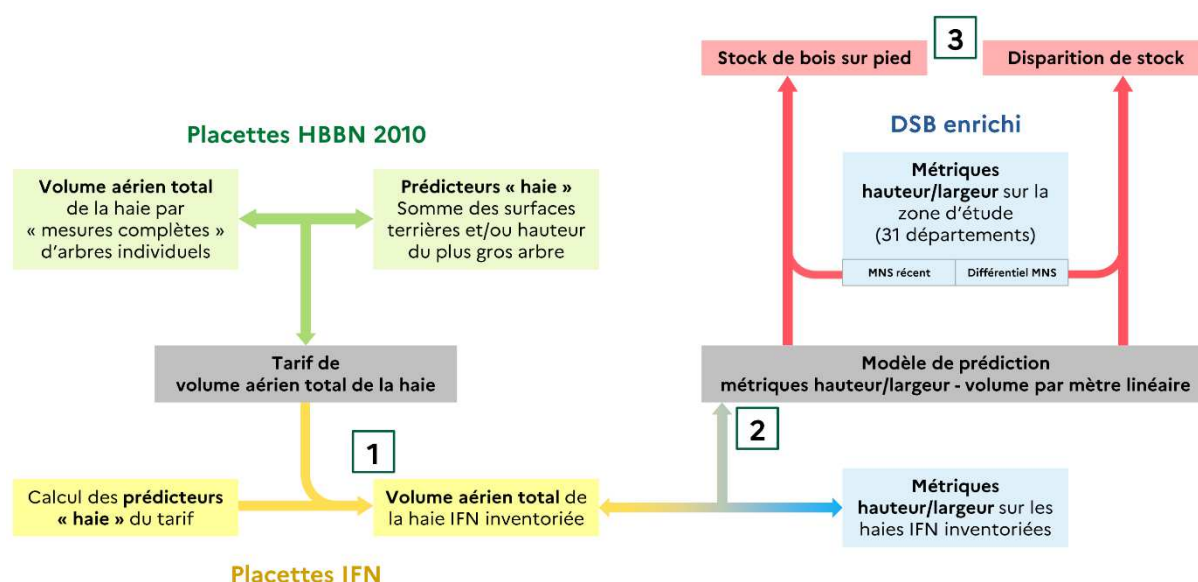


Figure 21 : schéma général de la méthodologie de calcul des stocks

4.3.1. Tarif de cubage et calcul du volume aérien total des segments de haie IFN

4.3.1.1. L'étude IFN « Haies Biomasse Basse-Normandie » 2010

Les données mesurées sur les placettes IFN relatives aux haies concernent le diamètre et la hauteur des arbres mais elles n'intègrent pas d'estimation du volume de bois sur pied, faute de disposer d'un tarif de cubage adapté à ces milieux ou de pouvoir réaliser des mesures dendrométriques détaillées qui seraient trop coûteuses en temps lors de la phase de terrain.

Une première étape a donc consisté en l'élaboration d'un tarif de cubage permettant d'approcher le volume aérien total de la haie IFN par des prédicteurs simples calculés à partir des données dendrométriques recueillies en routine par les équipes d'inventaire. Pour cela, les données d'une étude spécifique menée par l'IFN en Basse-Normandie en 2010 (étude « Haies Biomasse Basse-Normandie ») ont été exploitées. Cette étude, pour laquelle un protocole de collecte de données dendrométriques

détaillées avait permis de calculer un volume aérien total, visait à évaluer la ressource en bois-énergie disponible dans les haies des trois départements de Basse-Normandie (Calvados, Manche et Orne). Elle sera mentionnée par l'acronyme « HBBN » dans la suite de ce rapport.

4.3.1.2. Échantillonnage et protocole HBBN

L'échantillonnage de l'étude HBBN était constitué de 578 segments de haie identifiés sur l'ensemble des trois départements par photo-interprétation (étape initiale utilisée à l'IGN pour répartir les points d'inventaire sur un territoire selon un maillage régulier). La méthode d'échantillonnage était identique à celle de l'IFN mais les points à visiter sur le terrain ont été tirés suivant une maille plus dense. Les segments de haie présents dans un rayon de 30 m autour du point photo-interprété et intersectant un transect d'azimut aléatoire sont sélectionnés (figure 22).



Figure 22 : localisation et sélection par photo-interprétation des segments haies inventoriés

Dans le cadre de l'étude HBBN, une typologie de haie représentative de l'ensemble du bocage français et intégrée depuis dans le protocole général de l'IFN a été développée. Les 8 types élémentaires de haie qu'elle identifie ont été répartis en 4 « types regroupés », pour un total de 410 segments de haie (les alignements d'arbres et les haies à volume nul étant exclues de l'échantillon de terrain) :

- haie d'arbres de haut-jets à une, deux ou trois strates (type regroupé « haies de hauts-jets », effectif : 145 segments) ;
- haie de cépées à une ou deux strates (type regroupé « haies de cépées », effectif : 189 segments) ;
- haie de têtards à une ou deux strates (type regroupé « haies de têtards », effectif : 27 segments) ;
- haie arbustives à une strate (type regroupé « haies arbustives », effectif : 49 segments).

L'un des atouts de l'étude HBBN réside dans le protocole mis en œuvre, qui intègre (i) les mesures IFN standard utilisées pour l'inventaire des haies lors des campagnes annuelles et (ii) des mesures détaillées de la tige et des branches des arbres, appelées « mesures complètes », qui permettent de calculer le volume aérien total des arbres échantillonnés :

- Le protocole IFN repose sur une longueur de haie inventoriée comprise entre 25 et 50 m centrée sur l'intersection transect-haie. Il consiste à mesurer l'arbre le plus proche de l'intersection pour chaque classe de circonférence IFN ($[23,5-70,5[$, $[70,5-117,5[$, $[117,5-164,5[$ et $>164,5$ cm), soit un maximum de 4 arbres mesurés par segment. De nombreuses données sont alors recueillies, notamment l'essence, la circonférence et la hauteur de l'arbre. Enfin, un comptage du nombre d'arbres de chaque classe de dimension sur la longueur inventoriée (de 25 à 50 m) est réalisé.
- Le protocole de « mesures complètes » repose quant à lui sur une description détaillée de la tige et des branches (figure 23). Il décompose la bille de pied et le houppier en billons élémentaires cubés séparément à partir de mesures de diamètres et de longueurs/hauteurs spécifiques. La somme du volume des différents éléments permet de calculer un volume aérien total pour l'arbre mesuré dans chaque classe de dimension. En multipliant ce volume individuel par l'effectif des arbres de chaque classe de dimension sur le segment de haie inventorié, il est alors possible de calculer un volume aérien total (V_{0-50m}) pour un segment de haie d'une longueur calibrée à 50 m (longueur inventoriée standard de l'IFN). Ce volume constituera notre référence à prédire lors de la construction du tarif.

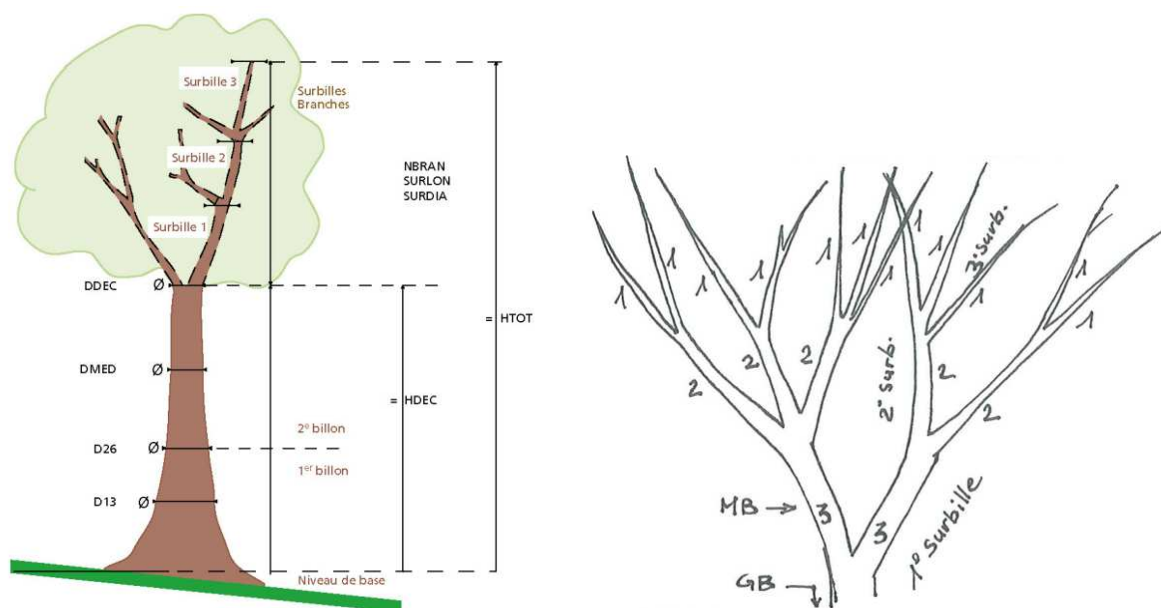


Figure 23 : protocole de « mesures complètes ». Il intègre plusieurs mesures de diamètre le long de la bille de pied et des mesures de diamètre, de longueur et de fréquence de chaque classe de dimension des surbilles, branches incluses.

4.3.1.3. Construction du tarif de volume aérien total

La construction du tarif a pour objectif d'identifier des prédicteurs (i.e. des variables *explicatives* calculées à partir des données dendrométriques issues de l'inventaire terrain) qui permettent de prédire le mieux possible le volume aérien total du segment de haie de 50 m obtenu par les « mesures complètes » (variable à *expliquer*).

Le tarif a été ajusté sur les 410 segments de haie du domaine d'étude HBBN grâce à la méthode de la régression linéaire multiple. De nombreux prédicteurs, dont voici une liste non exhaustive, ont ainsi été testés, seuls ou en combinaison, afin d'expliquer le volume du segment : hauteur moyenne et diamètre à 1,30 m moyen des arbres du segment pondérés par l'effectif de chaque classe de dimension, hauteur et diamètre à 1,30 m de l'arbre de la plus grosse classe de dimension, effectif total des arbres sur le segment, effectif des arbres de la plus grosse classe de dimension, somme des surfaces terrières individuelles, type de haie, etc.

Plusieurs critères ont été utilisés pour sélectionner le modèle le plus pertinent :

- valeur de significativité des prédicteurs (*p-value*) : un prédicteur dont la *p-value* est $>0,05$, $<0,05$, $<0,01$ et $<0,001$ (seuils couramment utilisés) est respectivement non-significatif, significatif, hautement significatif et très hautement significatif ;
- valeur du coefficient de détermination (R^2) : mesure de la qualité de la prédiction de la régression linéaire. Sa valeur varie entre 0 (mauvaise prédiction) et 1 (bonne prédiction) ;
- normalité des résidus : idéalement, les résidus doivent présenter une distribution aléatoire et symétrique autour de 0 ;
- homoscedasticité des résidus : idéalement, la variance des résidus doit rester constante, quelle que soit la valeur de la variable considérée (par exemple la valeur prédite par le modèle). Dans le cas contraire, les résidus présentent une hétéroscedasticité ;
- écart entre les valeurs prédites et les valeurs observées : idéalement, le graphique des valeurs prédites en fonction des valeurs observées doit présenter un nuage de points situé au voisinage de la droite à 45° (droite 1:1).

L'analyse a montré que le « type regroupé » de la haie (voir section précédente) avait une influence significative sur le tarif. Par conséquent, un tarif a été développé pour chacun des quatre « types regroupés ». Deux prédicteurs se sont montrés particulièrement significatifs :

Haie de hauts-jets :	$VO_{50m} = 14,602 * sumG$	$(R^2 = 0,81)$
Haie de cépées :	$VO_{50m} = 8,485 * sumG + 0,136 * HTOTmax$	$(R^2 = 0,70)$
Haie de têtards :	$VO_{50m} = 3,076 * sumG + 0,537 * HTOTmax$	$(R^2 = 0,55)$
Haie arbustives :	$VO_{50m} = 9,106 * sumG$	$(R^2 = 0,66)$

où $V0_50m$ est le volume aérien total du segment de haie de 50 m (volume à prédire, issu des « mesures complètes »), $sumG$ la somme des surfaces terrières individuelles pondérées par l'effectif de chaque classe de dimension sur 50 m et $HTOTmax$ la hauteur de l'arbre de la plus grosse classe de dimension mesuré sur le segment. L'ordonnée à l'origine du modèle est fixée à 0. La relation entre $V0_50m$ et chacun des prédicteurs individuels $sumG$ et $HTOTmax$ est présentée aux figures 24 et 25, respectivement.

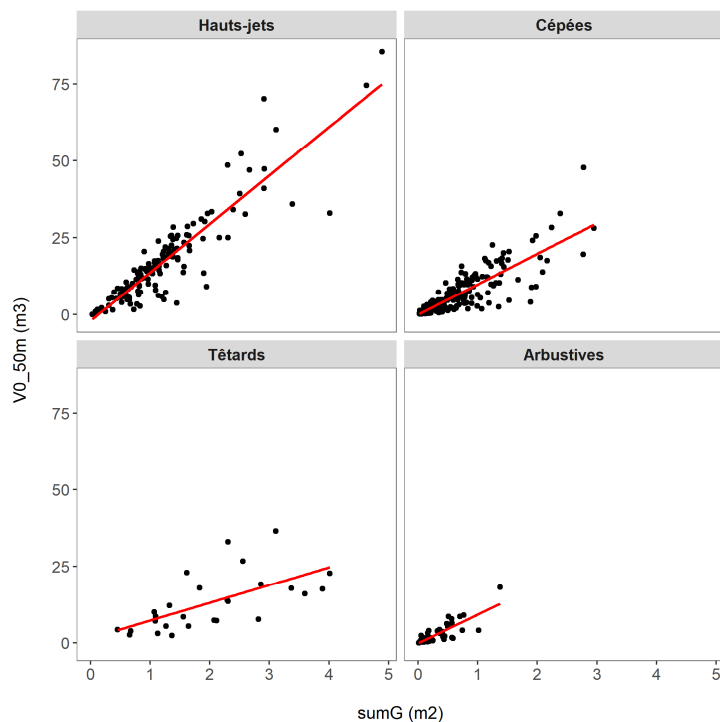


Figure 24 : relation entre $V0_50m$ et le prédicteur $sumG$ par type regroupé de haie

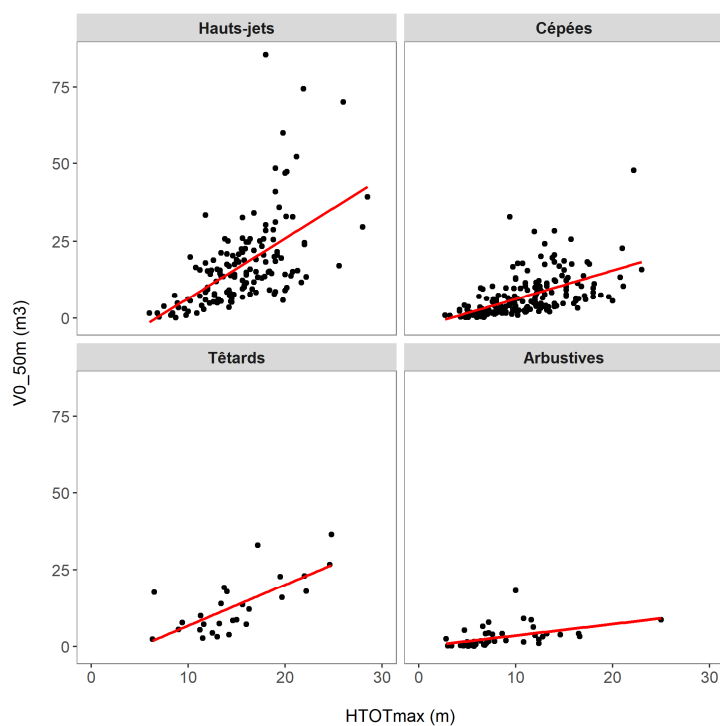


Figure 25 : relation entre $V0_50m$ et le prédicteur $HTOTmax$ par type regroupé de haie

Le prédicteur *sumG*, variable la plus explicative de l'ensemble du jeu de données, obtient une p-value <0,001 pour les haies de hauts-jets, de cépées et arbustives et <0,05 pour les haies de têtards. Il explique à lui seul 81% de la variance pour les haies de hauts-jets et 66 % pour les haies arbustives (cf. valeur du R^2). Pour les haies de cépées et de têtards, le tarif intègre en plus le prédicteur *HTOTmax* (p-value <0,01), pour une part de variance expliquée égale à 70 % et 55 %, respectivement.

Les résidus des tarifs retenus (figure 26) présentent une distribution plutôt symétrique et centrée sur 0 pour les haies de hauts-jets, de cépées et arbustives, mais pas pour les haies de têtards. Ils présentent en revanche une forte hétéroscédasticité (variance des résidus plus élevée pour des valeurs prédites fortes). La figure 27 témoigne de la cohérence entre les valeurs observées (volume issu des « mesures complètes ») et les valeurs prédites par le tarif pour les haies de hauts-jets, de cépées et arbustives, avec toutefois un biais pour les haies de têtards. Les valeurs moyennes de volume observé et de volume prédit par les tarifs, très proches, sont indiquées dans le tableau 1.

Type regroupé de haie (points HBBN)	Effectif	Volume observé sur 50m moyen ("mesures complètes", en m3)	Volume prédit sur 50m moyen (tarif, en m3)
Hauts-jets	145 (35%)	17,35	17,93
Cépées	189 (46%)	7,05	7,50
Têtards	27 (7%)	13,09	14,08
Arbustives	49 (12%)	2,78	2,84

Tableau 1 : effectifs et volumes moyens observés et prédits sur 50 m par « type regroupé » de haie pour les points HBBN

Un ajustement des tarifs sur les mêmes variables à expliquer et explicatives transformées en log a été testé afin de réduire l'hétéroscédasticité des résidus (résultats non présentés). La transformation log a cependant entraîné la perte de la normalité des résidus et un biais plus important entre les valeurs observées et les valeurs prédites pour les haies de hauts-jets, qui constituent une grande part de l'échantillon et la majeure partie du volume sur pied. Le modèle logarithmique ne fut donc pas retenu.

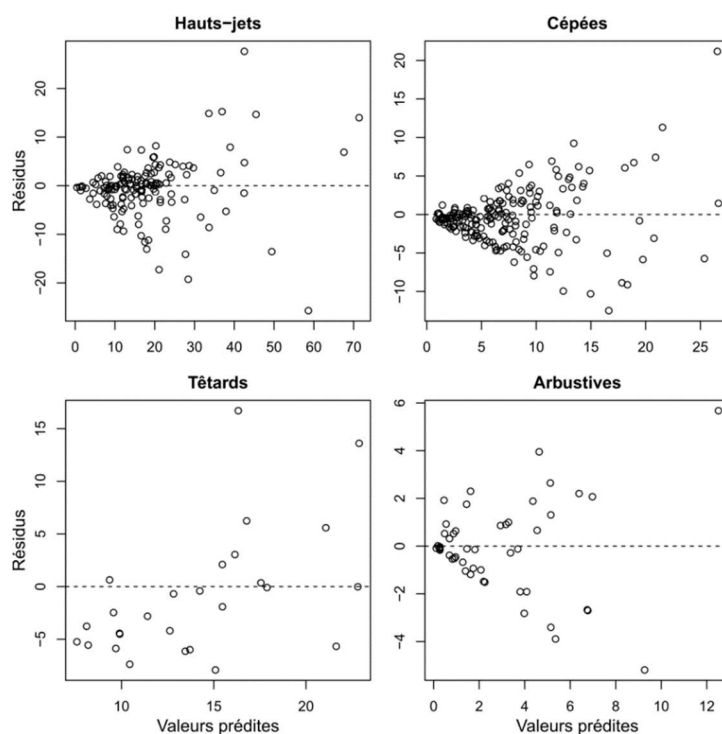


Figure 26 : résidus des tarifs de volume aérien total par « type regroupé » de haie

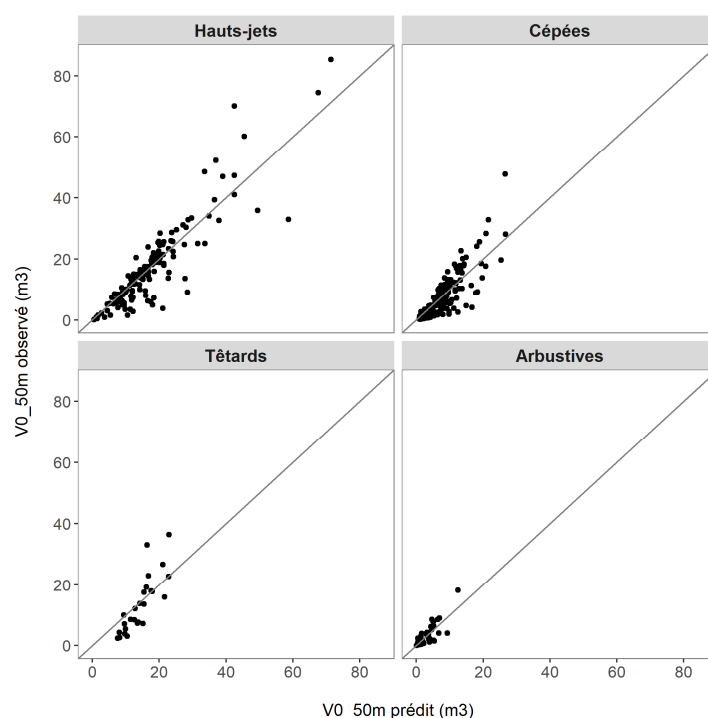


Figure 27 : V0_50m observé (« mesures complètes ») vs. V0_50m prédit (tarif) par « type regroupé » de haie

4.3.1.4. Application du tarif de volume aérien total aux segments de haie IFN

Chaque année, l'IFN inventorie plus de 400 segments de haie sur l'ensemble du territoire métropolitain. De 2009 à 2019, 3761 segments de haie ont été inventoriés dans les 31 départements de la zone d'étude. Depuis 2009, l'IFN utilise la typologie de haie élaborée dans l'étude HBBN et met en œuvre le même protocole d'inventaire (hors « mesures complètes »). Les tarifs de cubage ont donc pu être appliqués aux segments de haie IFN pour calculer leur volume aérien total, après vérification préalable de la représentativité des dimensions des arbres HBBN par rapport aux dimensions des arbres des campagnes IFN dans le périmètre de l'étude (évaluation de la similarité des gammes de hauteur et de diamètre, figure 28).

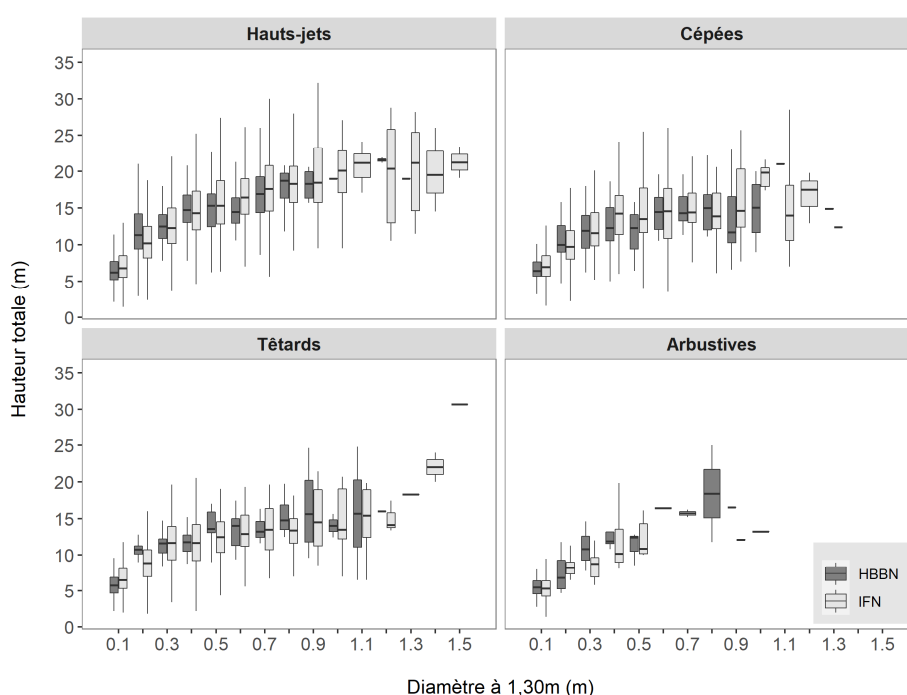


Figure 28 : relation hauteur-diamètre pour les arbres HBBN et les arbres des campagnes IFN dans la zone d'étude

Chaque segment de haie IFN a été affecté à l'un des « types regroupés » établis dans l'étude HBBN, un type « autre haie », exclus de l'analyse, étant attribué aux segments n'étant pas une « haie bocagère » (cordons boisés, alignements d'arbres, haie à volume nul). A partir des données dendrométriques relevées sur le segment, les prédicteurs *sumG* et *HTOTmax* ont été calculés et le tarif de cubage correspondant au « type regroupé » appliqué pour calculer le volume aérien total du segment de haie rapporté à une longueur de 50 m (*VO_50m*). Plus de 2 600 segments IFN ont ainsi été cubés sur l'ensemble des 31 départements sélectionnés.

4.3.2. Modèle de prédiction du volume sur pied par les métriques MNHC

4.3.2.1. Mise en commun des volumes estimés sur les points IFN et du DSB enrichi des métriques 3D

L'élaboration du modèle de prédiction du volume aérien total du segment de haie IFN par les métriques MNHC correspondantes nécessite la mise en commun de deux sources de données : les données de l'IFN (contenant le volume aérien total tarifé *VO_50m*) et les données du DSB enrichi (contenant les métriques de hauteur et de largeur de haie). Les données étant contenues dans des couches SIG, une jointure spatiale optimisée a été réalisée (figure 29) : à chaque point défini par la photo-interprétation est associé un transect d'azimut aléatoire qui intersecte les segments de haie situés dans un rayon de 25 m (a). A partir des données recueillies par l'IFN dans ces segments et du tarif de cubage, un volume aérien total sur 50 m (symbolisé par un point vert de taille variable) est calculé et affecté au point d'intersection transect-haie (b). Le linéaire du DSB enrichi des métriques MNHC contient quant à lui les attributs de hauteur (symbolisée par le dégradé de couleur bleue) et de largeur (symbolisée par la largeur du trait) des segments de haie (c). Une jointure spatiale est alors effectuée entre la couche des points d'intersection transect-haie (données IFN + volume aérien total) et la portion du linéaire du DSB enrichi (hauteur et largeur de haie) située au voisinage des points d'intersection (linéaire superposé de couleur verte) (d).

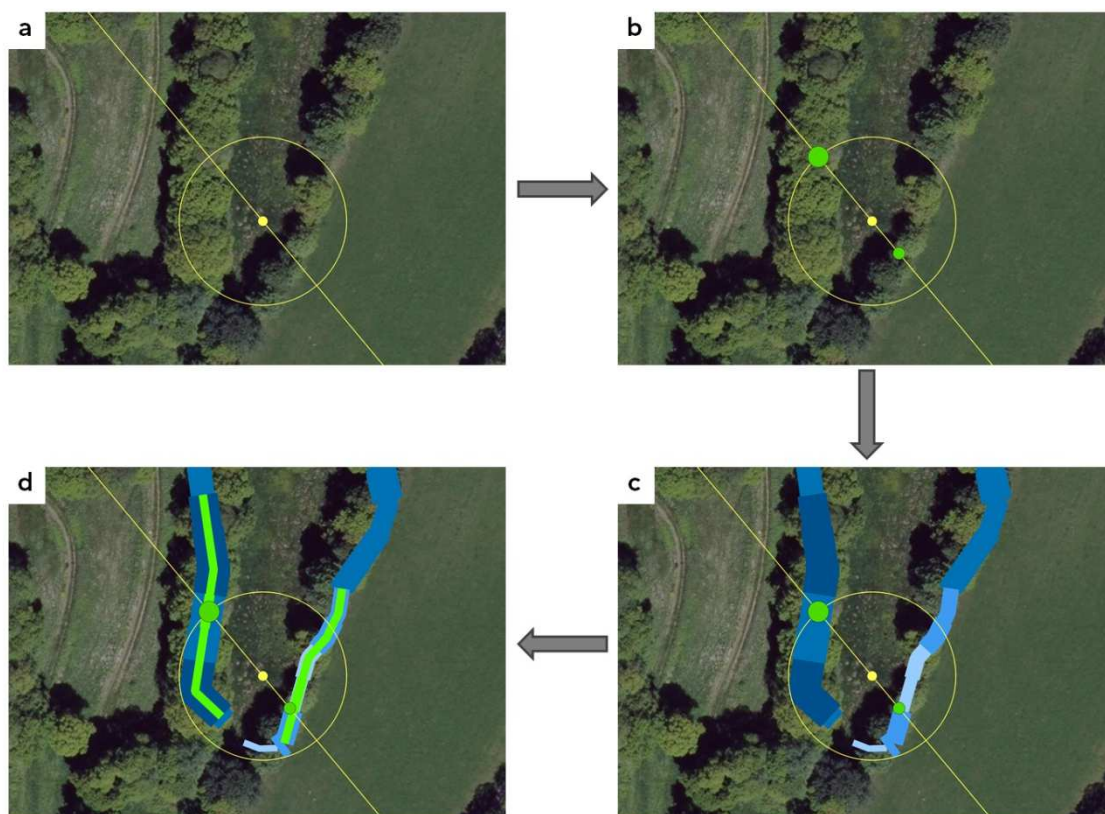


Figure 29 : Jointure spatiale entre les données IFN (incluant le volume aérien total) et le linéaire du DSB enrichi des métriques MNHC

Afin de maximiser la pertinence du modèle de prédiction, la jointure spatiale entre les données IFN (volume) et les données du DSB enrichi (hauteur et largeur de haie) n'a été réalisée que pour les segments IFN inventoriés dans une période de ± 2 ans autour de l'année de réalisation des photographies aériennes départementales (sur lesquelles le MNHC est calculé). L'année de réalisation des photographies aériennes étant variable selon le département, une sélection différentielle des campagnes IFN a donc été appliquée dans le périmètre de l'étude. A titre d'exemple, pour le département de la Manche (50), le MNHC a été calculé à partir des photographies aériennes de l'année 2015. Par conséquent, seuls les segments IFN inventoriés de 2013 à 2017 se sont vu attribuer les métriques de hauteur et de largeur par jointure spatiale avec le DSB enrichi et ont été utilisés pour la calibration du modèle de prédiction. Pour le département de l'Allier (03), en revanche, seuls les segments IFN inventoriés de 2014 à 2018 ont reçu des métriques, le MNHC ayant été calculé sur des photographies aériennes réalisées en 2016. Cette sélection permet de réduire le risque de mettre en relation le volume avec des métriques trop influencées par la croissance de la haie ou son éventuelle exploitation.

En cas d'absence de linéaire DSB correspondant, le segment de haie IFN est ignoré. Il est également possible que la position du segment de haie dans le linéaire du DSB diffère de plusieurs mètres de celle obtenue par la photo-interprétation IFN, du fait des spécificités méthodologiques intrinsèques aux deux approches. Seuls les segments de haie présentant un écart inférieur à 10 m ont été sélectionnés. Dans tous les cas, une vérification de la jointure par inspection sous SIG a été réalisée pour tous les segments, une correction manuelle étant apportée si nécessaire. Au total, 879 segments de haie IFN enrichis des métriques MNHC ont été sélectionnés pour définir le modèle (figure 30).

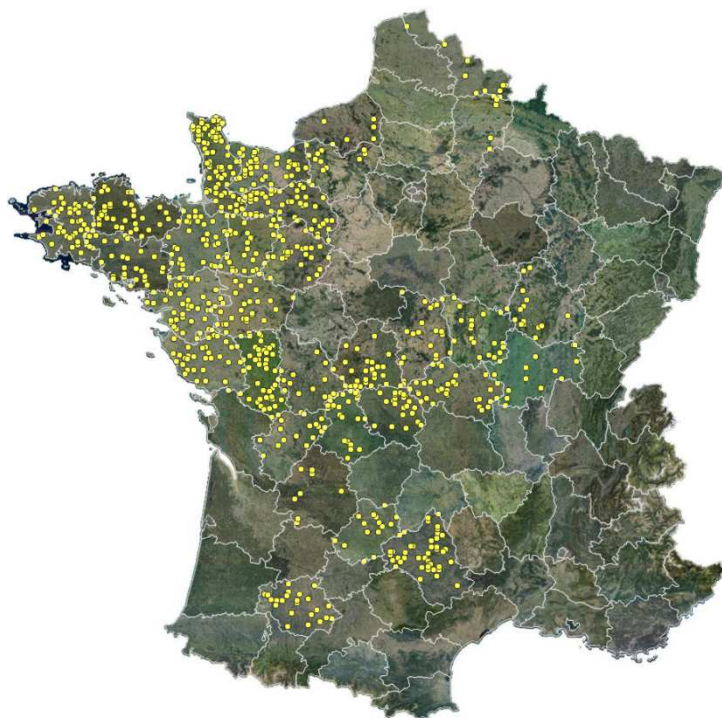


Figure 30 : répartition des 879 segments de haie IFN enrichis du volume et des métriques MNHC utilisés pour définir le modèle de prédiction

4.3.2.2. Construction du modèle de prédiction métriques-volume aérien total applicable au DSB enrichi en 3D

Le volume du segment IFN issu du tarif de cubage est un volume calibré sur une longueur de 50 m. Or, le modèle de prédiction du volume à partir des métriques MNHC a pour but d'être appliqué au linéaire du DSB, dont les différents tronçons constitutifs possèdent des longueurs variables. Le volume du segment IFN (VQ_{50m}) a donc été divisé par 50 pour obtenir une valeur par mètre linéaire (VQ_m) qui a ensuite été utilisée comme variable à expliquer dans le modèle de prédiction.

La portion du linéaire DSB enrichi (linéaire superposé de couleur verte visible à la figure 29.d) jointe à la donnée IFN est constituée de plusieurs tronçons du DSB, chaque tronçon étant caractérisé par des données de hauteur, de largeur et de longueur calculées à la tâche 1. Autrement dit, pour chaque segment

de haie IFN, la donnée de volume par mètre linéaire VO_ml est associée à de multiples métriques qui nécessitent d'être synthétisées à l'échelle du segment de haie. Ainsi, pour chaque segment de haie, les valeurs de hauteur maximale (ht_max) et de largeur maximale (lg_max) ont été déterminées. Les valeurs de hauteur moyenne (ht_moy) et de largeur moyenne (lg_moy) pondérées par la longueur des tronçons DSB ont également été calculées.

Plusieurs types de relation ont été testés entre le volume aérien total par mètre linéaire (VO_ml) et les métriques de la haie, les critères de sélection du modèle étant la p -value des paramètres, la qualité d'ajustement (R^2 pour les modèles linéaires, AIC et $pseudo-R^2$ pour les modèles non-linéaires), l'analyse des résidus et la cohérence des valeurs prédites. Le modèle suivant a finalement été retenu :

$$VO_ml = 0,0116 * (ht_moy * lg_moy) ^ 0,708$$

où VO_ml est le volume aérien total par mètre linéaire du segment de haie IFN, ht_moy sa hauteur moyenne et lg_moy sa largeur moyenne.

Ce modèle non-linéaire, de type $y = ax^b$, se caractérise par deux paramètres a et b très hautement significatifs (p -value <0,001) associés aux variables ht_moy et lg_moy . Ces deux métriques, déjà très explicatives individuellement (Figure 31.a et Figure 31.b), améliorent encore le modèle lorsqu'elles sont utilisées en produit (valeur d' AIC plus faible et $pseudo-R^2$ plus élevé, Figure 31.c). Dans le cas présent, le produit des métriques ht_moy et lg_moy est considéré comme un « proxy » correspondant à la surface moyenne de la section transversale de la haie. Le type de haie n'a pas été intégré à l'équation, cet attribut étant absent du linéaire du DSB sur lequel le modèle doit être appliqué.

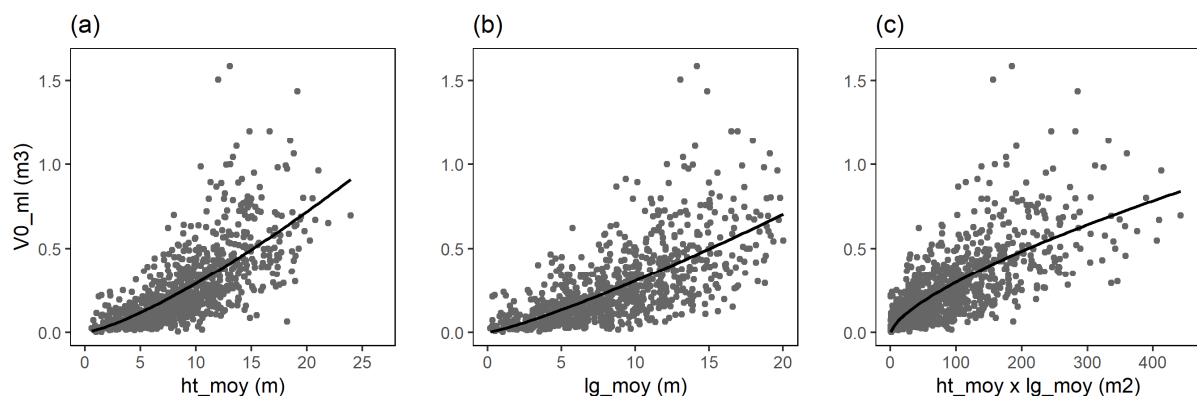


Figure 31 : relation entre le volume aérien total par mètre linéaire et les métriques moyennes de la haie

Les résidus du modèle de prédiction (Figure 32.a) présentent une distribution légèrement dissymétrique (effectif plus important en dessous de 0) ainsi qu'une hétéroscédasticité marquée (variance des résidus plus élevée pour des valeurs prédites fortes). La comparaison entre les valeurs observées et prédites (Figure 32.b) montre un nuage de points plutôt centré sur la droite 1:1 malgré la présence de quelques valeurs observées (volume tarifé) élevées. Ces indicateurs (résidus et biais), acceptables, nous ont permis de valider et sélectionner le modèle.

Bien que le modèle n'ait pas pour vocation à être appliqué par type de haie, une comparaison entre les valeurs moyennes de volume observé et de volume prédit par type a été réalisée (tableau 2). Elle révèle une légère sous-estimation du modèle pour les haies de hauts-jets, une légère surestimation pour les haies de cépées et de têtards et une forte surestimation pour les haies arbustives. Ces dernières sont toutefois très peu représentées (2 segments sur 879) du fait du seuillage du MNHC à 3 m et de la méthode par perpendiculaires utilisés à la tâche 1, qui, souvent, ne permettent pas la récupération de pixels supérieurs à 3 m dans ces haies basses.

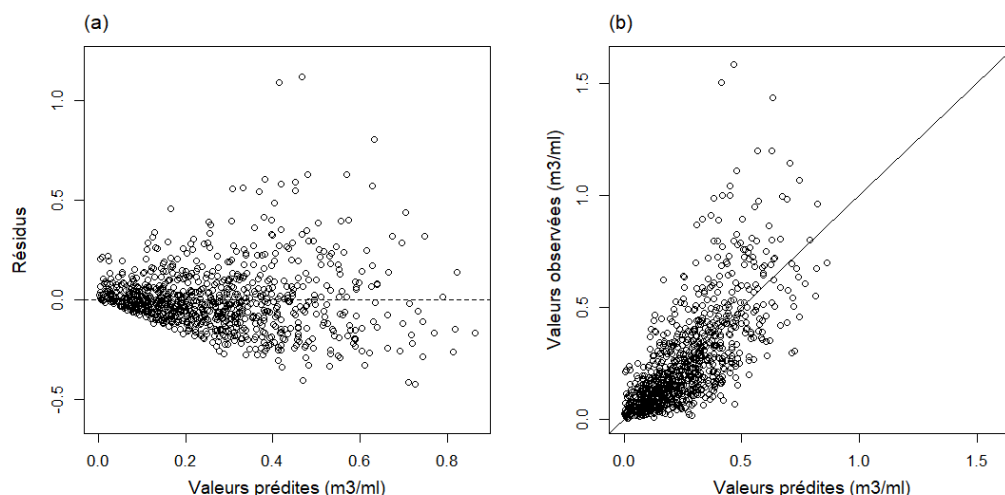


Figure 32 : résidus du modèle et comparaison entre les valeurs observées et prédites de volume

Type regroupé de haie (points IFN)	Effectif	Volume aérien total sur 50 m (tarif, en m3)	Volume aérien total par mètre linéaire (tarif, en m3)	Volume aérien total par mètre linéaire prédit par les métriques (m3)
Hauts-jets	457 (52%)	18,44	0,37	0,32
Cépées	347 (40%)	7,47	0,15	0,19
Têtards	73 (8%)	13,67	0,27	0,32
Arbustives	2 (0,2%)	1,49	0,03	0,05

Tableau 2 : effectifs et volumes moyens observés et prédits par « type regroupé » de haie pour les points IFN

4.3.2.3. Application du modèle aux linéaires départementaux - calcul des stocks

Afin d'évaluer les stocks actuels et récemment prélevés, le modèle de prédiction a été appliqué à tous les tronçons des linéaires DSB départementaux ayant une hauteur supérieure à 3 m (hauteur seuil du MNHC, voir les justifications techniques évoquées à la section 4.1.2), les haies de moins de 3 m de hauteur étant par conséquent exclues :

- **Calcul du stock actuel** : pour chaque tronçon, un volume aérien total au mètre linéaire a été calculé par le modèle à partir des métriques de hauteur/largeur fournies par le MNHC « récent » (millésime 2 du MNS). Le volume aérien total du tronçon a ensuite été obtenu en multipliant le volume au mètre linéaire par la longueur du tronçon (environ 10 m dans la majorité des cas). Ces valeurs unitaires ont été agrégées pour fournir des estimations départementales du stock sur pied actuel en volume et sa répartition selon la classe de hauteur et de largeur des haies ;

- **Calcul du stock prélevé sur une période** : pour les tronçons du DSB identifiés comme « prélevés » (voir section 2.2), le modèle de prédiction métriques-volume a été appliqué une seconde fois, mais en utilisant les métriques « anciennes » issues du MNHC « ancien » (millésime 1 du MNS). Les différentiels de volume ainsi obtenus ont également été agrégés pour fournir des estimations départementales du stock sur pied prélevé en volume et sa répartition selon la classe de hauteur et de largeur des haies. Les valeurs ont été annualisées en tenant compte de la durée séparant les deux MNS de chaque département ;

- **Calcul des stocks de biomasse et de carbone** : à partir des valeurs d'infradensité (masse de bois anhydre sur volume saturé en eau, en kg/m³) produites par le projet CARBOFOR, un facteur de conversion volume-biomasse moyen, pondéré par la surface terrière des différentes essences relevées par l'IFN dans les haies de la zone d'étude, a été utilisé pour calculer la biomasse correspondant aux volumes actuels et

récemment prélevés. Dans cette étude, la valeur du facteur de conversion moyen utilisé est de 524,5 kg/m³. Cette valeur moyenne est légèrement inférieure à la moyenne des essences feuillues en forêt en raison de la fréquence d'essences au bois moins dense (saule, châtaignier, etc.) Les facteurs de conversion individuels des essences les plus représentées dans la base « haie » de l'IFN sont indiquées dans le tableau 3. Des taux de 0,475 tC/tMS (conversion de la biomasse aérienne en carbone aérien) et de 1,28 (conversion du carbone aérien en carbone total aérien + racinaire), également issus du projet CARBOFOR, ont été utilisés.

Essence	Effectif base IFN	Facteur de conversion volume-biomasse en kg/m ³ (CARBOFOR)
Chêne	51,5%	540
Frêne	13,9%	560
Châtaignier	5,6%	470
Saule	4,0%	370
Petit érable	2,6%	560
Hêtre	2,5%	550
Grand aulne	2,4%	420
Peuplier cultivé	2,3%	350

Tableau 3 : facteurs de conversion volume-biomasse (en kg/m³) des essences majoritaires de la base « haie » de l'IFN

5. Résultats

Les résultats de cette étude concernent les stocks sur pied et récemment prélevés dans les haies de plus de 3 m de hauteur. La méthodologie mise en œuvre ne permettant pas la caractérisation des haies de moins de 3 m, la part de la ressource qu'elles représentent (à priori faible) n'a pas pu être évaluée.

Les résultats ont été agrégés par département et par région (données brutes fournies à l'annexe 4) et cartographiés selon une maille de 1 km de côté afin d'identifier des tendances spatiales. Les stocks sur pied et récemment prélevés, calculés à l'échelle des tronçons des linéaires DSB par des modèles ajustés sur des données à forte variabilité, n'offrent pas une validité locale suffisante pour être présentés directement.

5.1. Ressource bocagère actuelle

5.1.1. Linéaire bocager

Le linéaire bocager total de la zone d'étude s'élève à un peu plus d'un million de kilomètres, dont environ 776 000 (77 %) possèdent un stock calculé (MNHC > 3 m). La répartition de ce linéaire entre les différents départements est représentée à la figure 33.

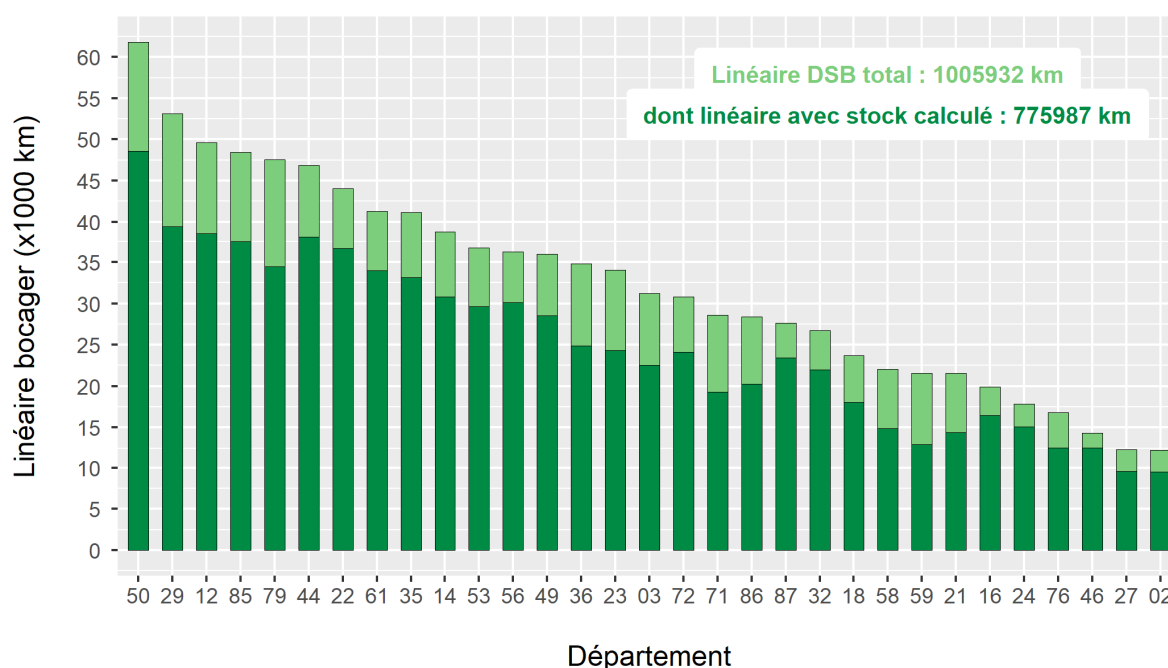


Figure 33 : linéaire bocager total du DSB et linéaire contribuant au stock sur pied (MNHC > 3 m) par département

5.1.2. Stock sur pied en volume

Le volume sur pied total de la zone d'étude s'élève à environ 243 millions de mètres cubes. La répartition de ce stock entre les départements est représentée à la figure 34. Pour deux d'entre eux, à savoir la Manche (50) et la Vendée (85), le stock de bois bocager calculé est supérieur au stock de bois forestier obtenu à partir des données de l'IFN.

En moyenne, le volume sur pied par km (pour le linéaire possédant un volume) sur l'ensemble de la zone d'étude est de 314 m³/km, pour une gamme variant de 276 à 403 m³/km pour les départements individuels (figure 35).

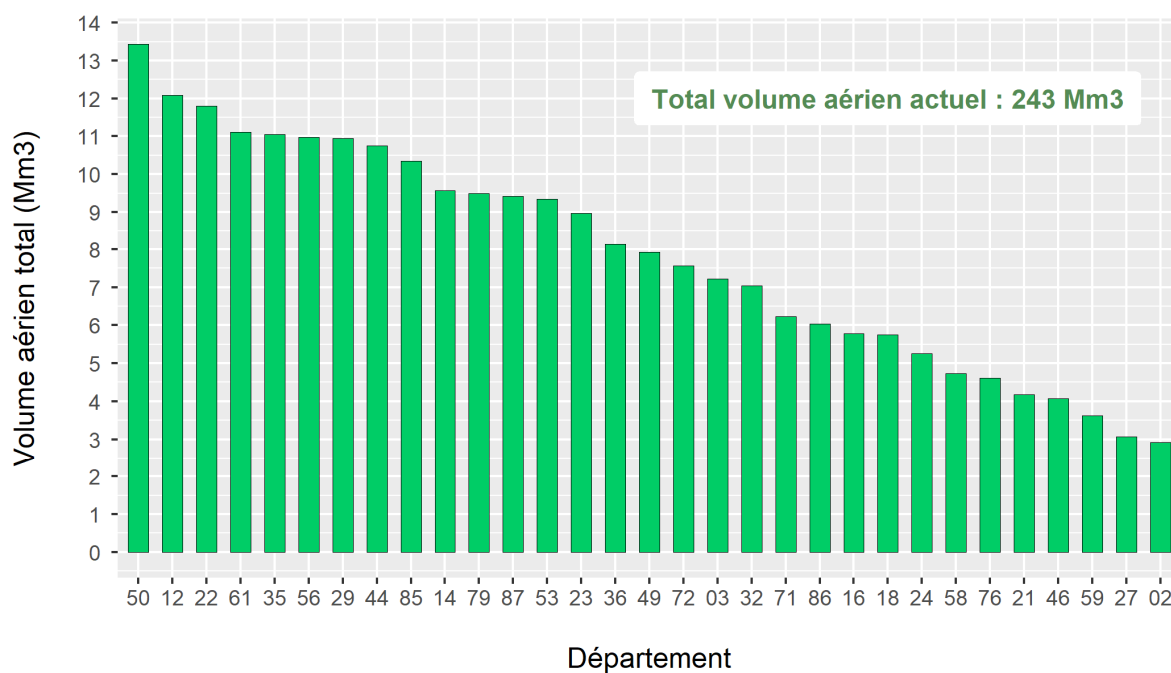


Figure 34 : stock sur pied total actuel en volume aérien (Mm³) par département (MNHC > 3 m)

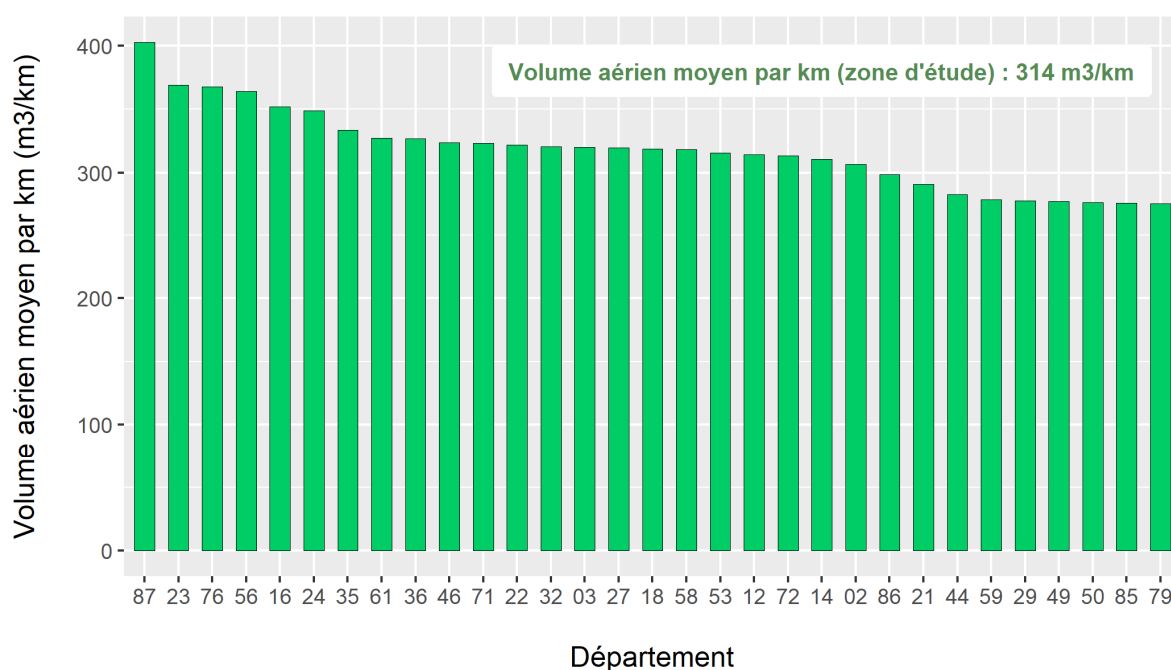


Figure 35 : stock sur pied moyen actuel en volume aérien (m³) par km par département (MNHC > 3 m)

5.1.3. Stock sur pied en volume par classe de hauteur ou de largeur

La répartition du volume sur pied selon la classe de hauteur et de largeur de haie a été analysée. Les échanges avec les experts de l'AFAC-Agroforesteries et de SOLAGRO ont permis d'identifier des classes de hauteur et de largeur pertinentes du point de vue « terrain ». Sur l'ensemble de la zone d'étude, les haies de 3 à 12 m, de 12 à 20 m et de plus de 20 m de hauteur détiennent respectivement 43 %, 48 % et 9 % du volume sur pied, le stock étant variable selon le département (figure 36), pour un volume moyen par kilomètre de 200 m³, 510 m³ et 760 m³ (valeurs très peu variables entre les départements).

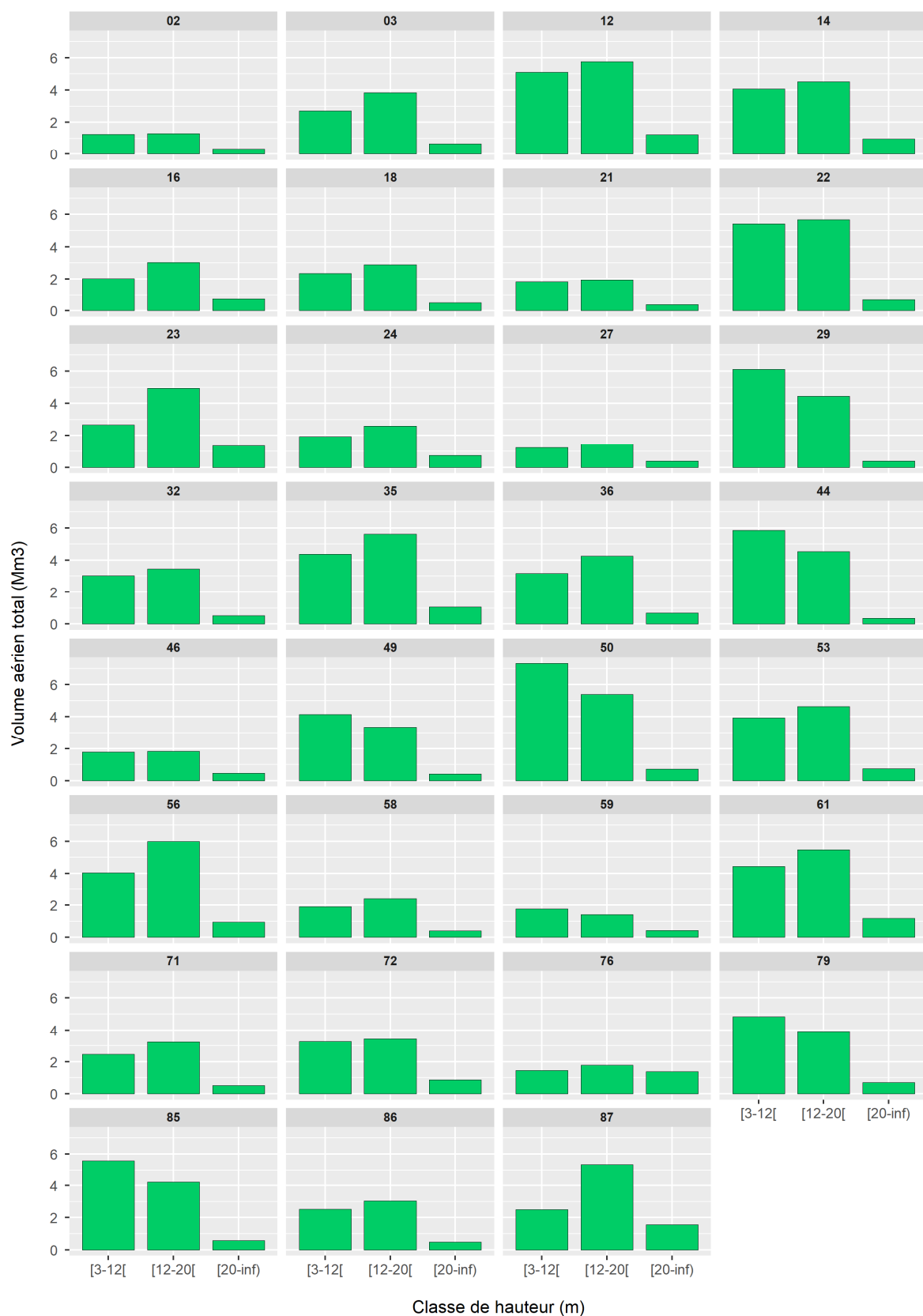


Figure 36 : stock sur pied total actuel en volume (Mm³) par département et par classe de hauteur de haie (MNHC > 3m)

Sur l'ensemble de la zone d'étude, les haies de moins de 10 m de large et de plus de 10 m de large détiennent respectivement 28 % et 72 % du volume sur pied, le stock étant variable selon le département (figure 37), pour un volume moyen par kilomètre de 160 m³ et 490 m³ (valeurs très peu variables entre les départements).

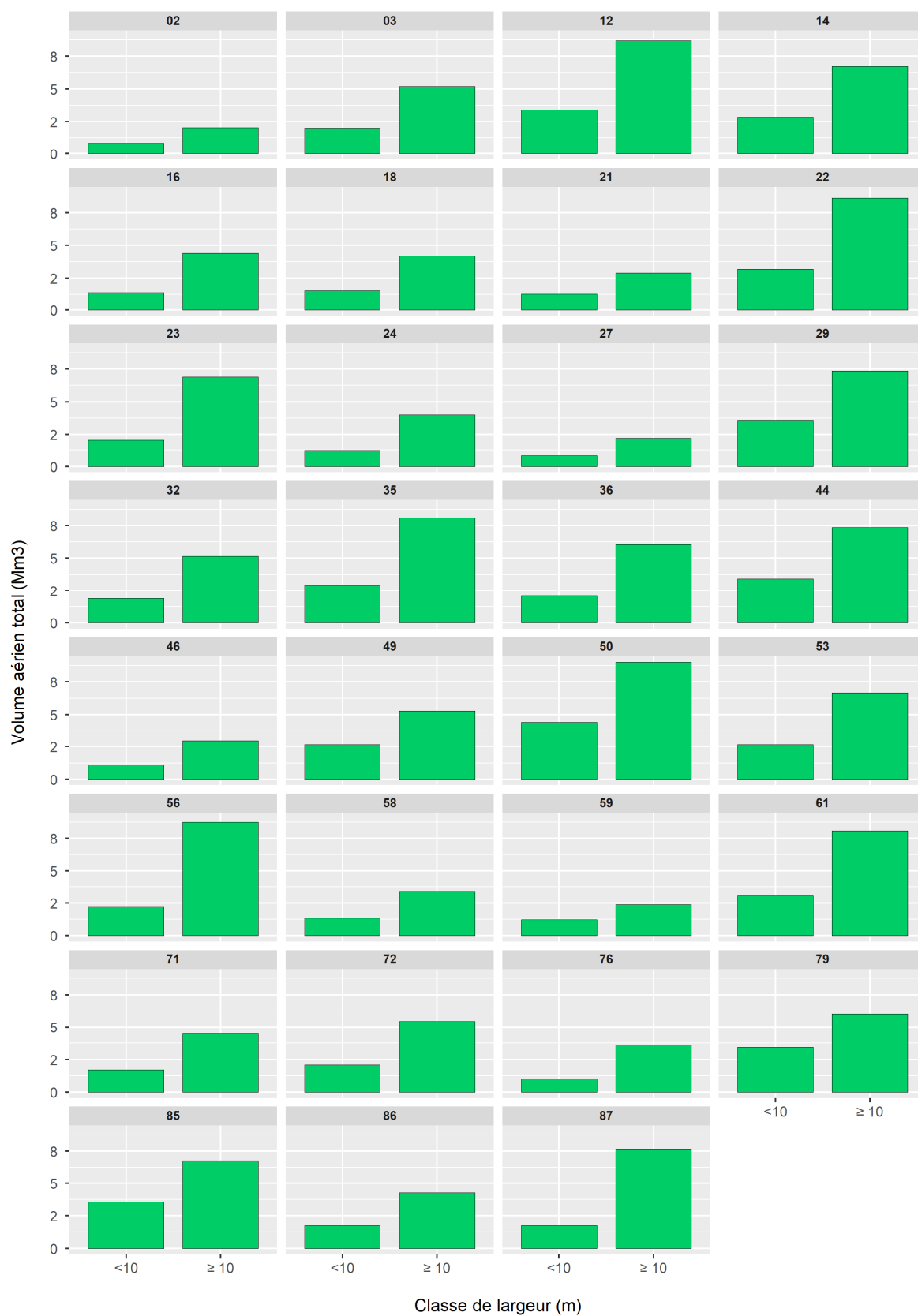


Figure 37 : stock sur pied total actuel en volume (Mm³) par département et par classe de largeur de haie (MNHC > 3m)

5.1.4. Stock sur pied en biomasse

La biomasse sur pied totale de la zone d'étude s'élève à environ 128 millions de tonnes de matière sèche aérienne. La répartition de ce stock est représentée à la figure 38. En moyenne, la biomasse sur pied par km pour le linéaire possédant un volume calculé (MNHC > 3 m) sur l'ensemble de la zone d'étude est de 165 tMS/km, pour une gamme variant de 145 à 211 tMS/km pour les départements individuels (figure 39).

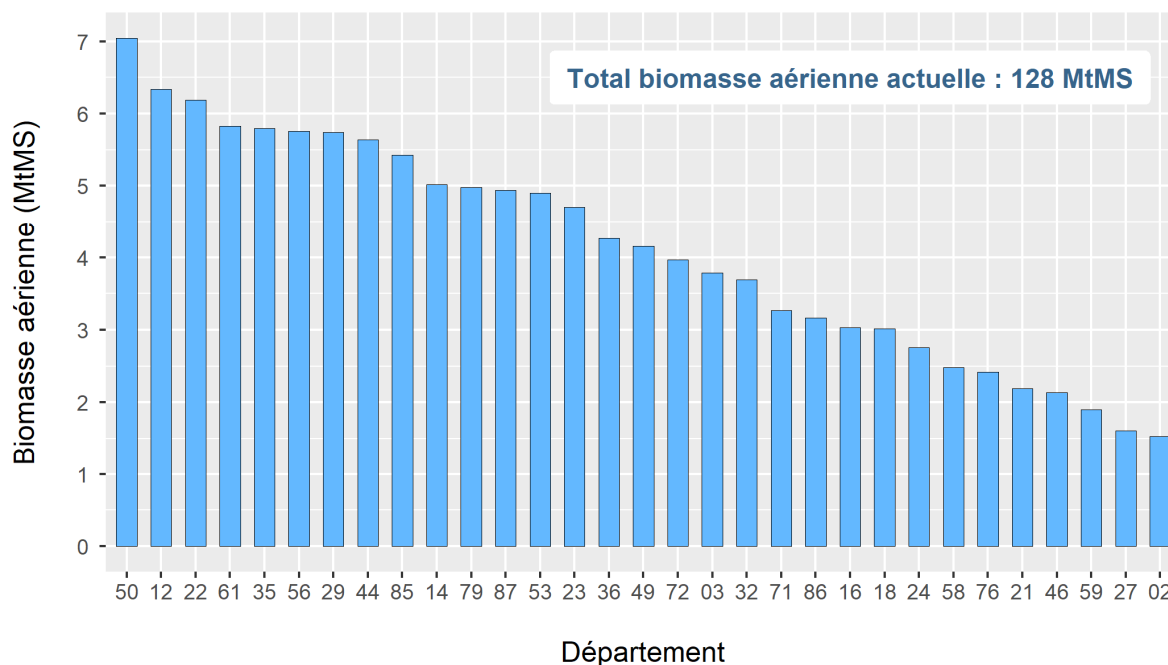


Figure 38 : stock sur pied total actuel en biomasse aérienne (MtMS) par département (MNHC > 3 m)

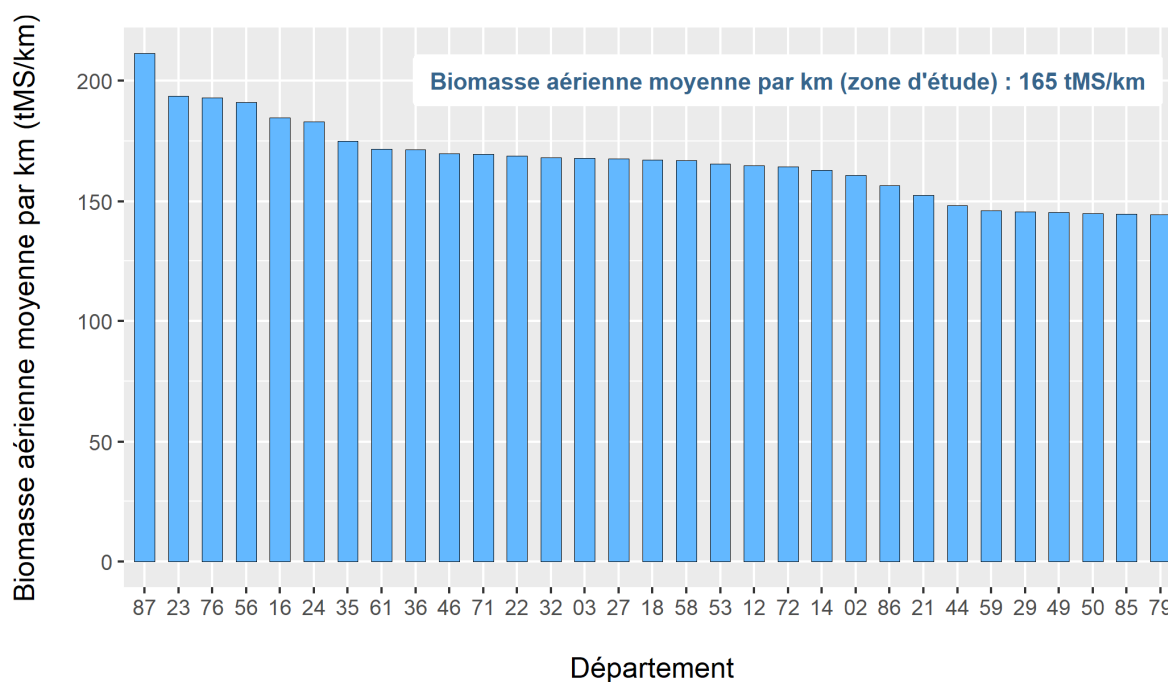


Figure 39 : stock sur pied moyen actuel en biomasse aérienne (tMS) par km par département (MNHC > 3 m)

5.1.5. Stock sur pied en carbone

Le stock de carbone total (aérien + racinaire) de la zone d'étude s'élève à environ 78 millions de tonnes de carbone, dont 61 pour la partie aérienne des haies. La répartition de ce stock est représentée à la figure 40. En moyenne, le stock de carbone par km pour le linéaire possédant un volume (MNHC > 3 m) sur l'ensemble de la zone d'étude est de 100 tC/km, dont 78 pour la partie aérienne (figure 41). Le stock de carbone (aérien + racinaire) moyen par kilomètre pour les haies de 3 à 12 m, de 12 à 20 m et de plus de 20 m de hauteur s'élève respectivement à environ 60 tC, 160 tC et 240 tC.

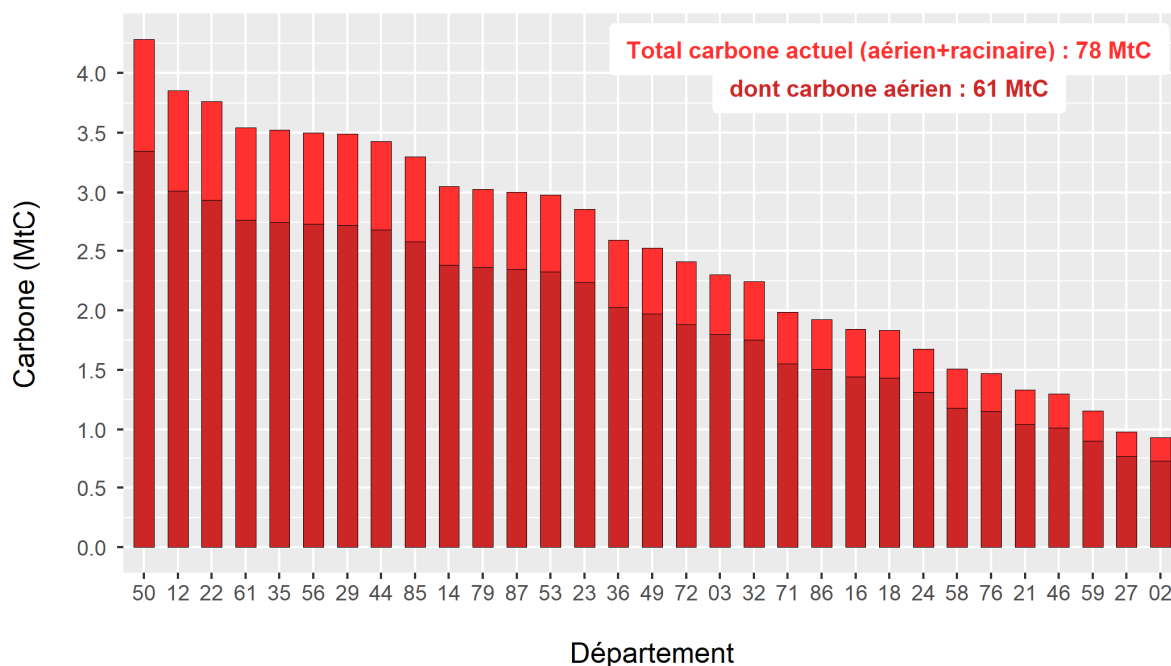


Figure 40 : stock sur pied actuel en carbone total (aérien + racinaire) et aérien (MtC) par département (MNHC > 3 m)

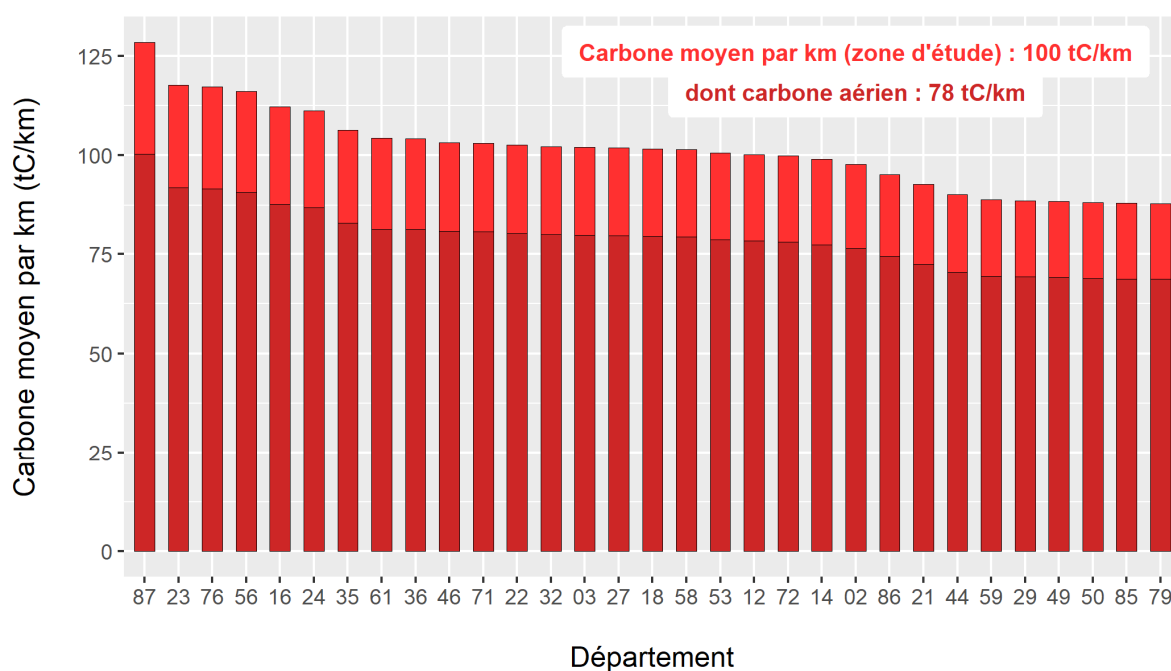


Figure 41 : stock sur pied moyen actuel en carbone total et aérien (tC) par km et par département (MNHC > 3 m)

5.2. Ressource bocagère prélevée

5.2.1. Linéaire prélevé

Le linéaire bocager prélevé dans la zone d'étude (coupes et arrachages confondus) s'élève à plus de 13 000 km par an. La répartition de ce linéaire prélevé entre les départements est représentée à la figure 42.

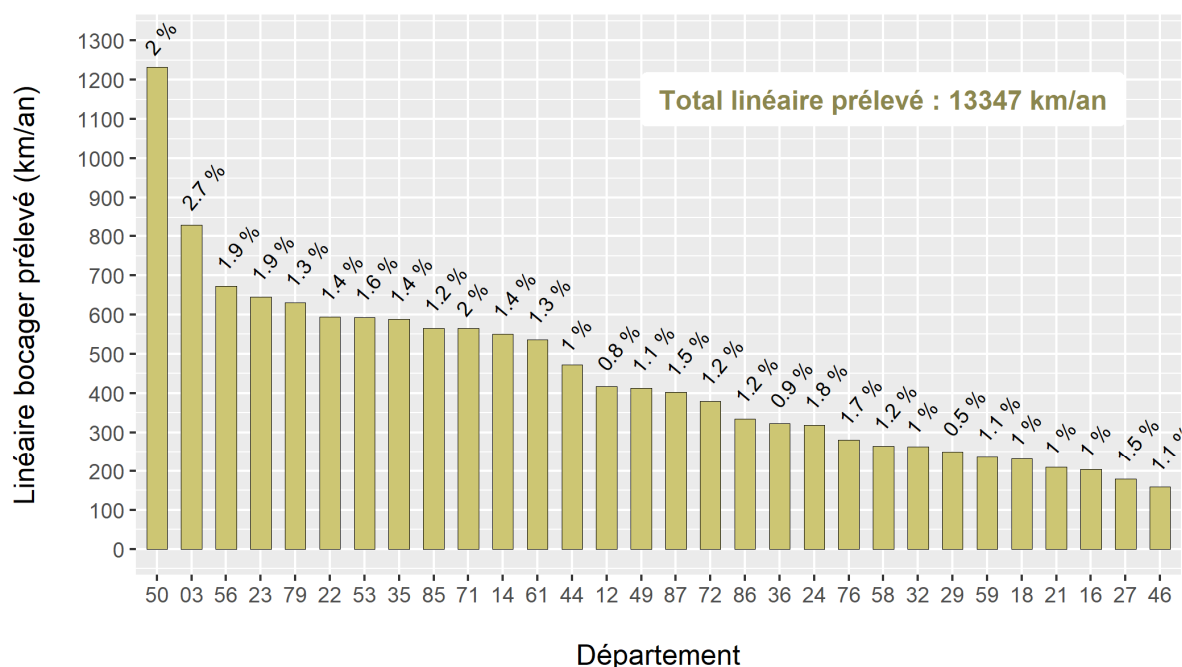


Figure 42 : linéaire prélevé par an et par département (en noir le pourcentage du linéaire actuel prélevé par an)

5.2.2. Stock prélevé en volume

Le volume aérien total prélevé dans la zone d'étude s'élève à environ 4,4 millions de mètres cube par an, soit 1,8 % du stock sur pied actuel. La répartition de ce volume prélevé est représentée à la figure 43.

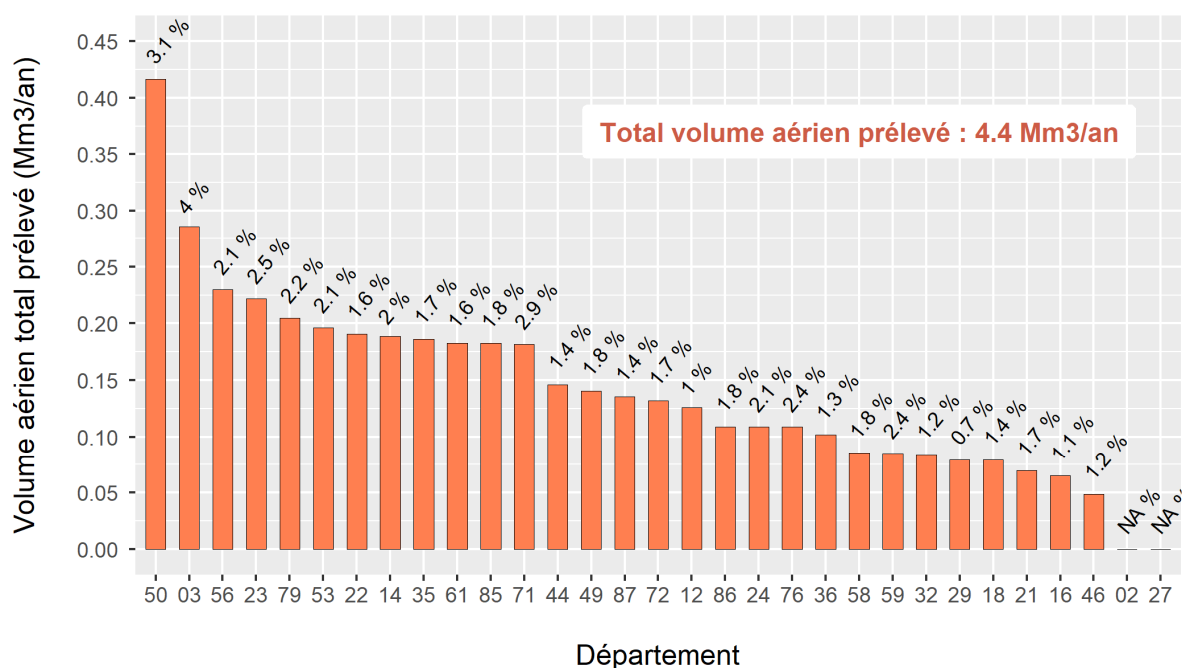


Figure 43 : volume aérien prélevé par an et par département (en noir le pourcentage du volume actuel prélevé par an)

5.2.3. Stock prélevé en volume par classe de hauteur et de largeur

Sur l'ensemble de la zone d'étude, les haies de 3 à 12 m, de 12 à 20 m et de plus de 20 m de hauteur (avant prélèvement) fournissent respectivement 45 %, 43 % et 12 % du stock prélevé (figure 44).

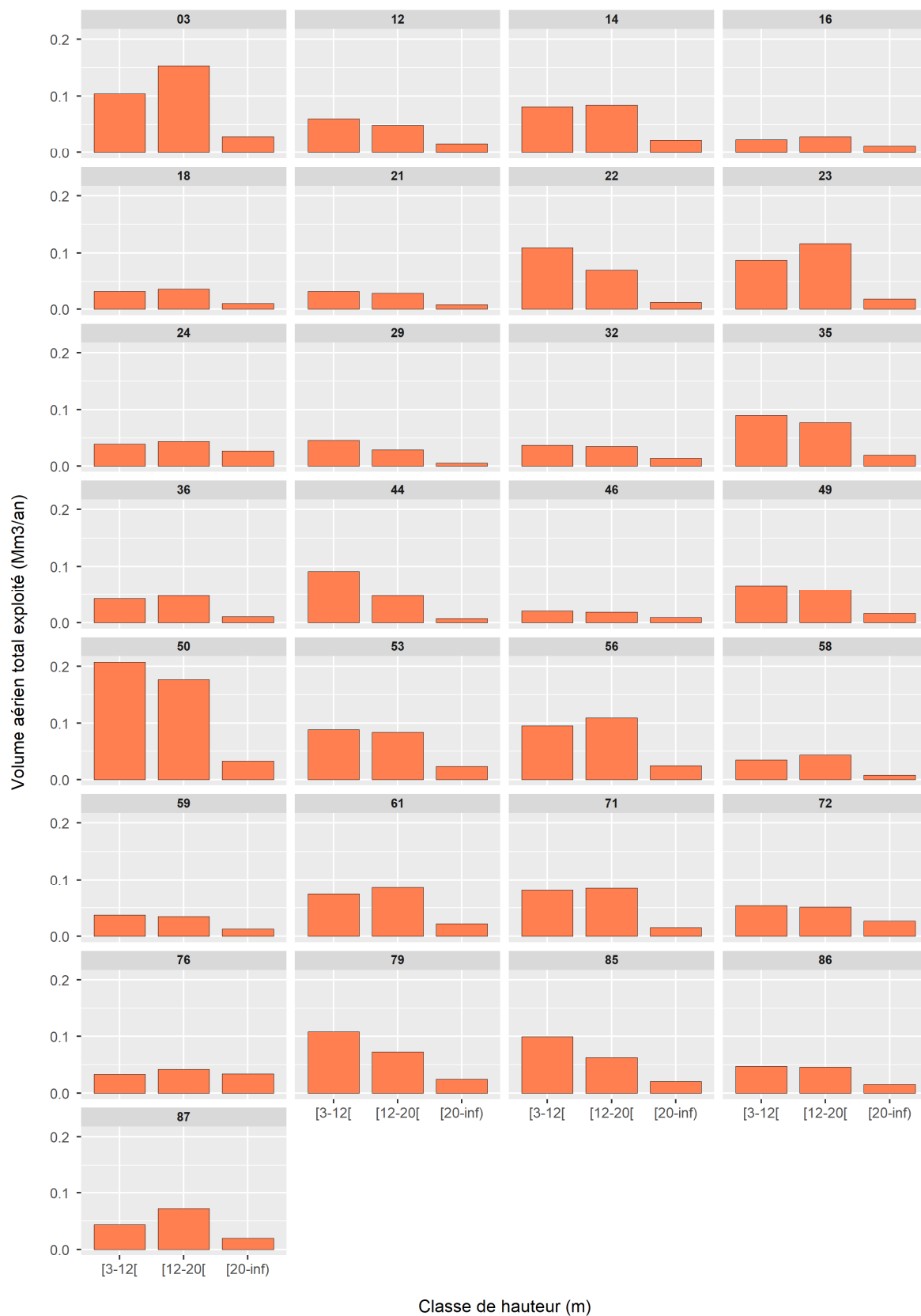


Figure 44 : volume prélevé par an, par département et par classe de hauteur de haie

Les haies de moins de 10 m de large et de plus de 10 m de large (avant prélèvement) fournissent respectivement 32 % et 68 % du stock prélevé par an, cette tendance étant identique entre les départements (figure 45).

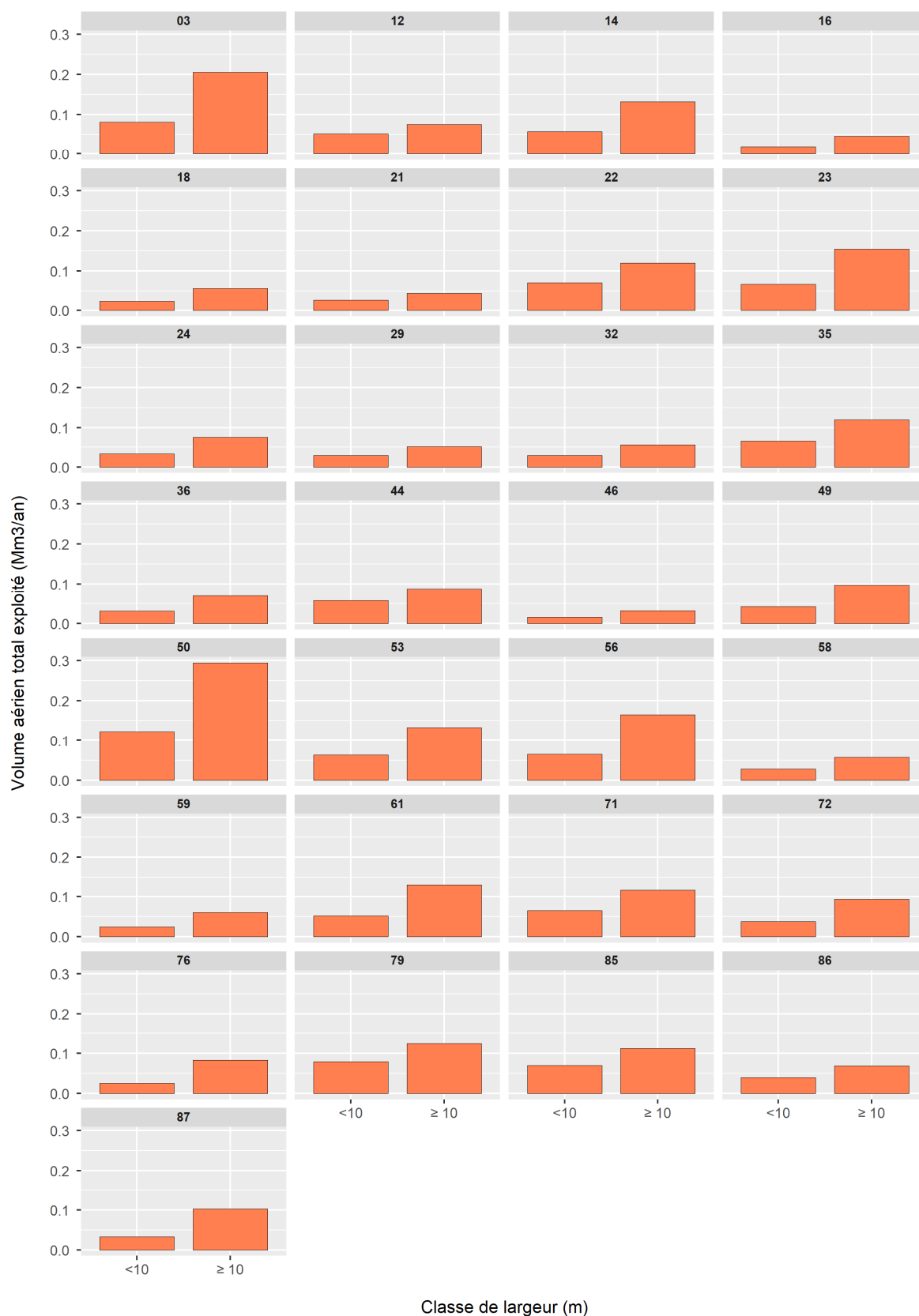


Figure 45 : volume prélevé par an, par département et par classe de largeur de haie

5.2.4. Stock prélevé en biomasse

La biomasse aérienne totale prélevée dans la zone d'étude s'élève à environ 2,3 millions de tonnes de matière sèche par an. La répartition de cette biomasse prélevée est représentée à la figure 46.

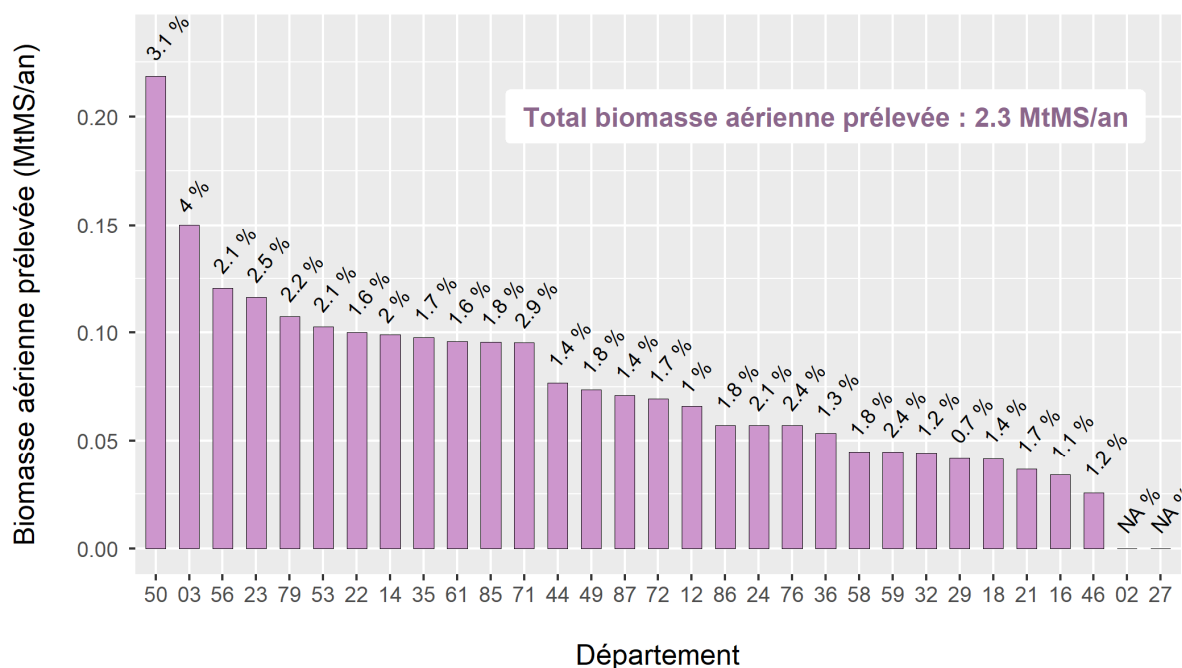


Figure 46 : biomasse aérienne (MtMS) prélevée par an et par département (en noir le pourcentage de la biomasse aérienne actuelle prélevée par an)

5.2.5. Stock prélevé en carbone

Le stock total de carbone aérien prélevé dans la zone d'étude s'élève à environ 1,1 millions de tonnes de carbone par an. La répartition de ce stock prélevé est représentée à la figure 47.

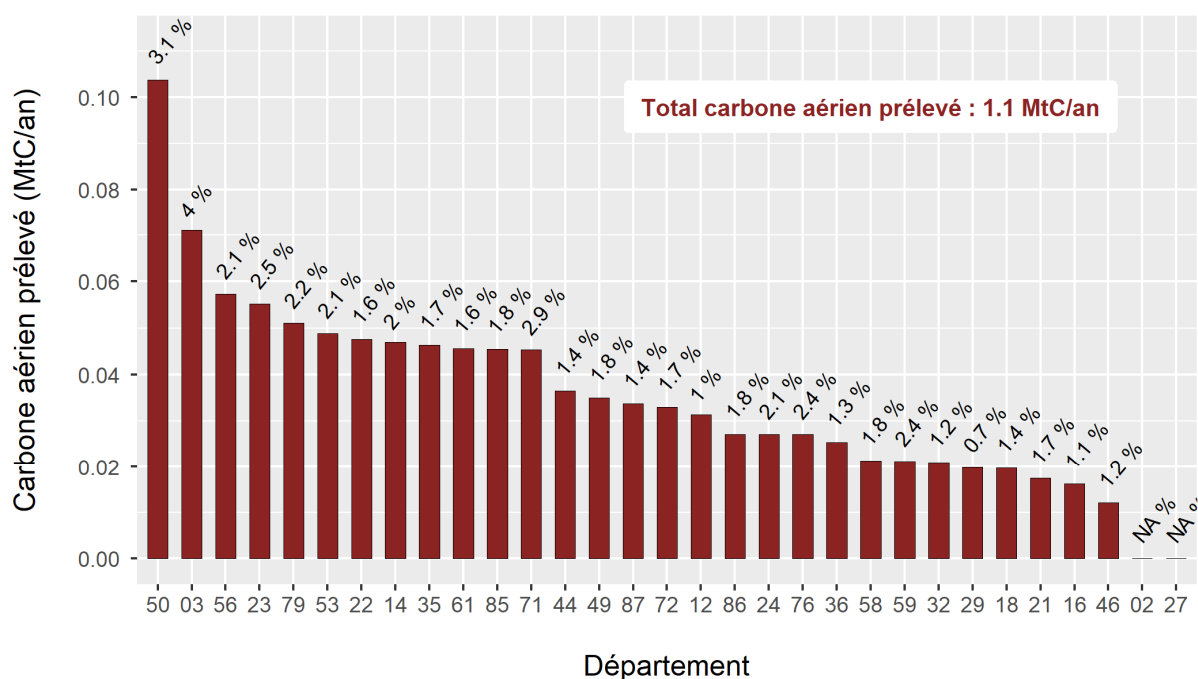


Figure 47 : carbone aérien (MtC) prélevé par an et par département (en noir le pourcentage du carbone aérien actuel prélevé par an)

5.3. Synthèse des valeurs régionales

Les valeurs régionales des linéaires et des stocks actuels et prélevés ont été calculées. La valeur obtenue pour certaines régions administratives peut toutefois être fortement sous-estimée dans la mesure où tous les départements qui les composent ne sont pas inclus dans l'étude. Seules les régions Bretagne, Normandie et Pays de la Loire sont traitées en intégralité. Les linéaires bocagers sont présentés dans le tableau 4, les stocks actuels en volume, biomasse et carbone dans le tableau 5 et les stocks prélevés dans le tableau 6.

Région (% de couverture et départements concernés)	Linéaire DSB (km)	Linéaire à stock calculé (km)	Linéaire à stock prélevé (km/an)
Bretagne (100 %) (dep 22, 29, 35, 56)	174 400	139 300	2 110 (1,2 %)
Normandie (100 %) (dep 14, 27, 50, 61, 76)	171 000	135 600	2 780 (1,6 %)
Pays de la Loire (100 %) (dep 44, 49, 53, 72, 85)	198 800	157 800	2 420 (1,2 %)
Auvergne-Rhône-Alpes (10 %) (dep 03)	31 200	22 600	830 (2,66 %)
Bourgogne-Franche-Comté (51 %) (dep 21, 58, 71)	72 100	48 600	1 050 (1,4 %)
Centre-Val de Loire (36 %) (dep 18, 36)	58 500	42 900	550 (0,9 %)
Hauts-de-France (41 %) (dep 02, 59)	33 800	22 500	240 (1,7 %)
Nouvelle-Aquitaine (46 %) (dep 16, 23, 24, 79, 86, 87)	175 500	133 800	2 540 (1,5 %)
Occitanie (28 %) (dep 12, 32, 46)	90 600	73 100	840 (0,9 %)
Total 31 départements	1 005 900	776 200	13 360 (1,3 %)

Tableau 4 : linéaires bocagers régionaux totaux et présentant un stock calculé (MNHC > 3 m). Les pourcentages correspondent à la fraction du linéaire à stock qui est prélevée chaque année

Région (% de couverture et départements concernés)	Volume aérien actuel (m³)	Biomasse aérienne actuelle (tMS)	Carbone aérien actuel (tC)	Carbone total (aérien + racines) actuel (tC)
Bretagne (100 %) (dep 22, 29, 35, 56)	44 760 000 (322)	23 480 000 (169)	11 150 000 (80)	14 270 000 (103)
Normandie (100 %) (dep 14, 27, 50, 61, 76)	41 810 000 (307)	21 920 000 (161)	10 410 000 (77)	13 330 000 (98)
Pays de la Loire (100 %) (dep 44, 49, 53, 72, 85)	45 930 000 (291)	24 090 000 (152)	11 440 000 (72)	14 650 000 (93)
Auvergne-Rhône-Alpes (10 %) (dep 03)	7 220 000 (314)	3 790 000 (165)	1 800 000 (78)	2 300 000 (100)
Bourgogne-Franche-Comté (51 %) (dep 21, 58, 71)	15 140 000 (315)	7 940 000 (165)	3 770 000 (79)	4 830 000 (101)
Centre-Val de Loire (36 %) (dep 18, 36)	13 870 000 (323)	7 280 000 (169)	3 460 000 (80)	4 420 000 (103)
Hauts-de-France (41 %) (dep 02, 59)	6 540 000 (297)	3 430 000 (156)	1 630 000 (74)	2 080 000 (95)
Nouvelle-Aquitaine (46 %) (dep 16, 23, 24, 79, 86, 87)	44 960 000 (335)	23 580 000 (176)	11 190 000 (84)	14 340 000 (107)
Occitanie (28 %) (dep 12, 32, 46)	23 200 000 (318)	12 170 000 (167)	5 770 000 (79)	7 400 000 (101)
Total 31 départements	243 430 000 (314)	127 680 000 (165)	60 620 000 (78)	77 620 000 (100)

Tableau 5 : stocks régionaux actuels en volume, biomasse et carbone (le stock par km est indiqué entre parenthèses)

Région (% de couverture et départements concernés)	Volume aérien prélevé (m³/an)	Biomasse aérienne prélevée (tMS/an)	Carbone aérien prélevé (tC/an)	Ratio stock prélevé par an /stock actuel (%)
Bretagne (100 %) (dep 22, 29, 35, 56)	686 000	360 000	171 000	1,5
Normandie (100 %) (dep 14, 27, 50, 61, 76)	898 000	470 000	223 000	2,1
Pays de la Loire (100 %) (dep 44, 49, 53, 72, 85)	796 000	418 000	199 000	1,7
Auvergne-Rhône-Alpes (10 %) (dep 03)	286 000	150 000	71 000	4
Bourgogne-Franche-Comté (51 %) (dep 21, 58, 71)	338 000	177 000	84 000	2,2
Centre-Val de Loire (36 %) (dep 18, 36)	181 000	95 000	45 000	1,3
Hauts-de-France (41 %) (dep 02, 59)	85 000	45 000	21 000	1,3
Nouvelle-Aquitaine (46 %) (dep 16, 23, 24, 79, 86, 87)	845 000	443 000	210 000	1,9
Occitanie (28 %) (dep 12, 32, 46)	259 000	136 000	64 000	1,1
Total 31 départements	4 374 000	2 294 000	1 088 000	1,8

Tableau 6 : stocks régionaux prélevés chaque année en volume, biomasse et carbone et taux de stock prélevé par an

5.4. Cartes des volumes sur pied et prélevés

Des cartes représentant la distribution spatiale des volumes de bois sur pied et récemment prélevés ont été produites. Les données sont spatialisées selon la maille INPN de 1x1 km. La valeur de chaque maille correspond soit :

- à la somme des volumes de bois sur pied des haies contenues dans la maille, figure 48 ;
- au volume de bois sur pied moyen par kilomètre linéaire, figure 49 ;
- à la somme des volumes de bois récemment prélevés des haies contenues dans la maille, figure 50 ;
- au volume de bois prélevé moyen par kilomètre linéaire, figure 51.

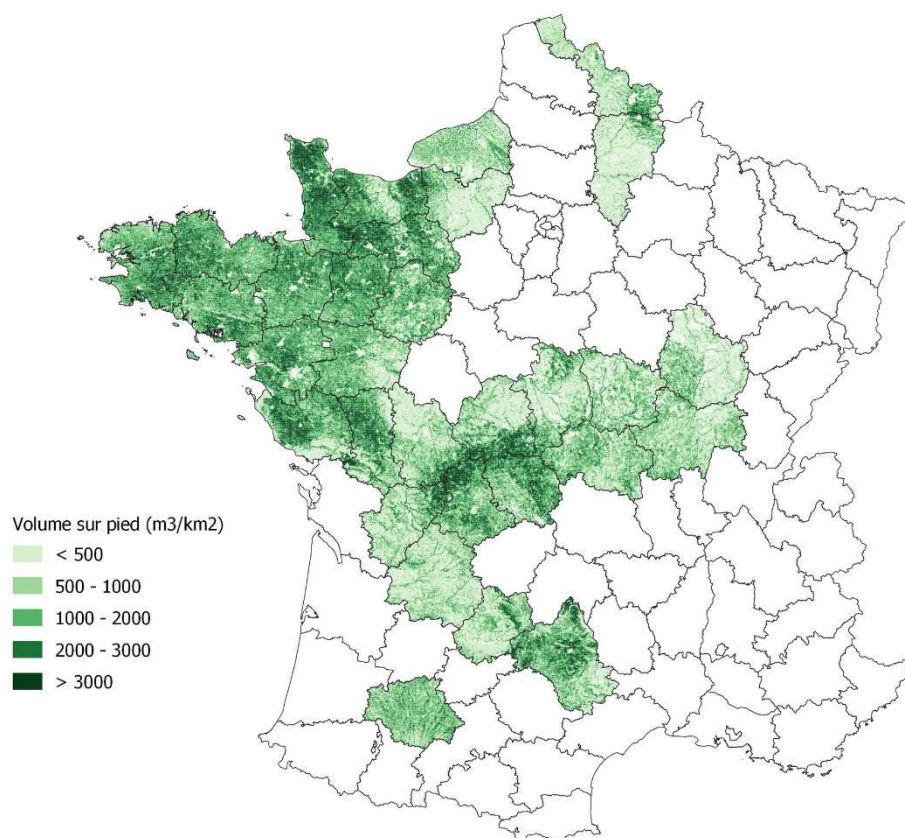


Figure 48 : carte de répartition du volume sur pied selon une maille kilométrique

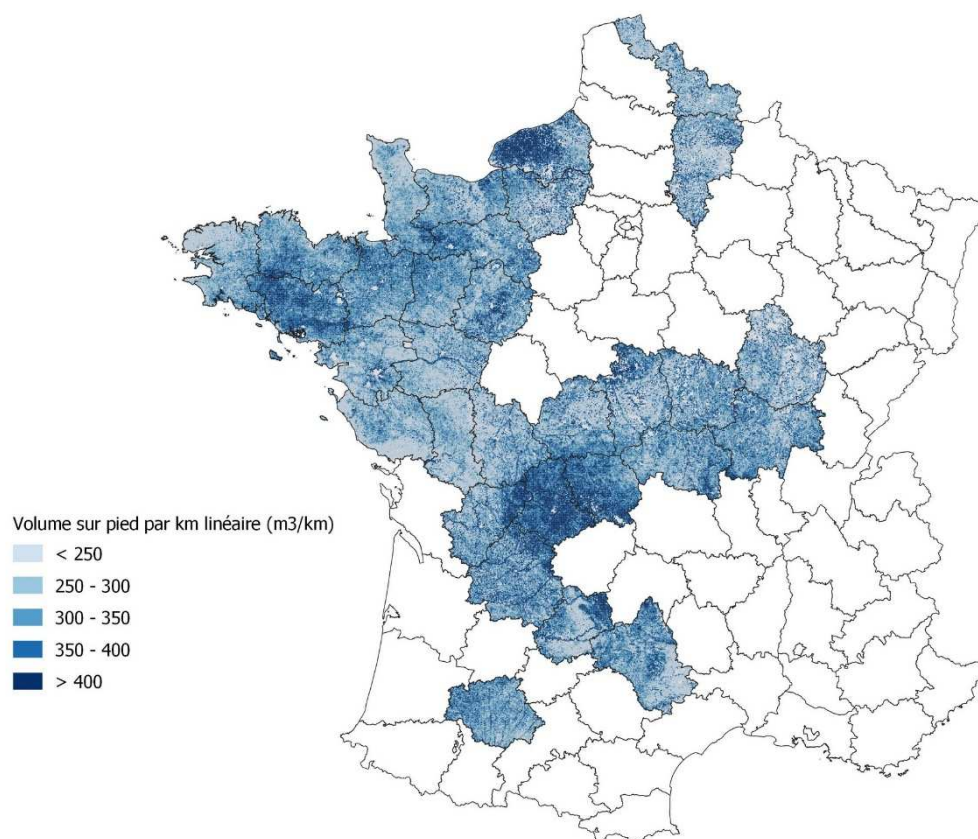


Figure 49 : carte de répartition du volume sur pied par kilomètre linéaire selon une maille kilométrique

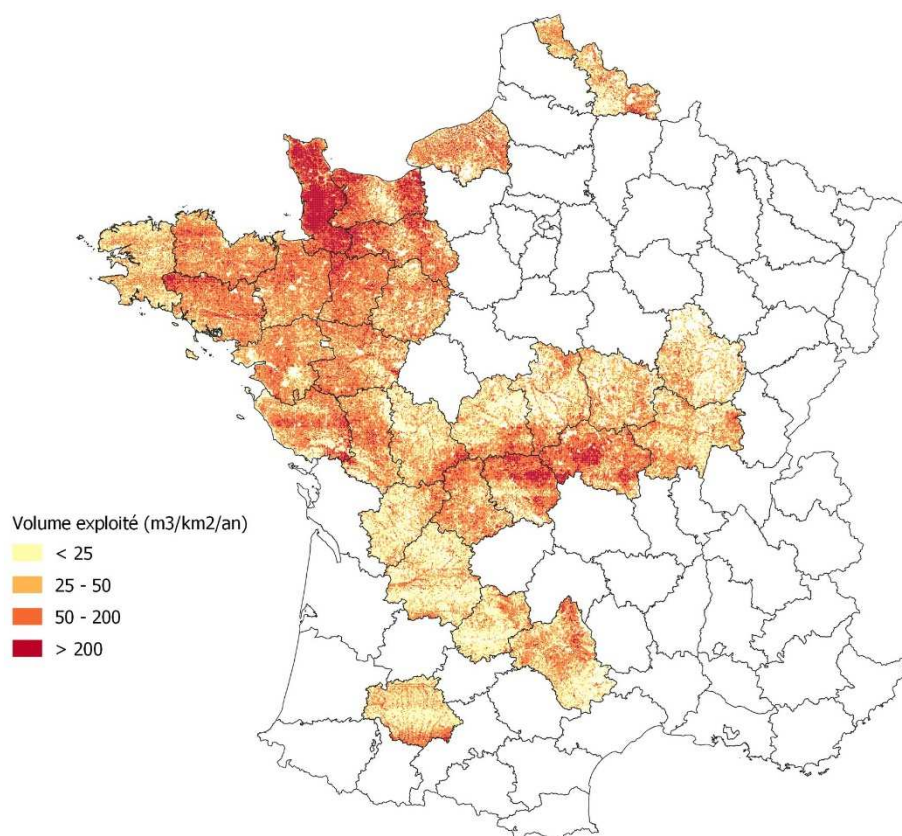


Figure 50 : carte de répartition du volume prélevé selon une maille kilométrique

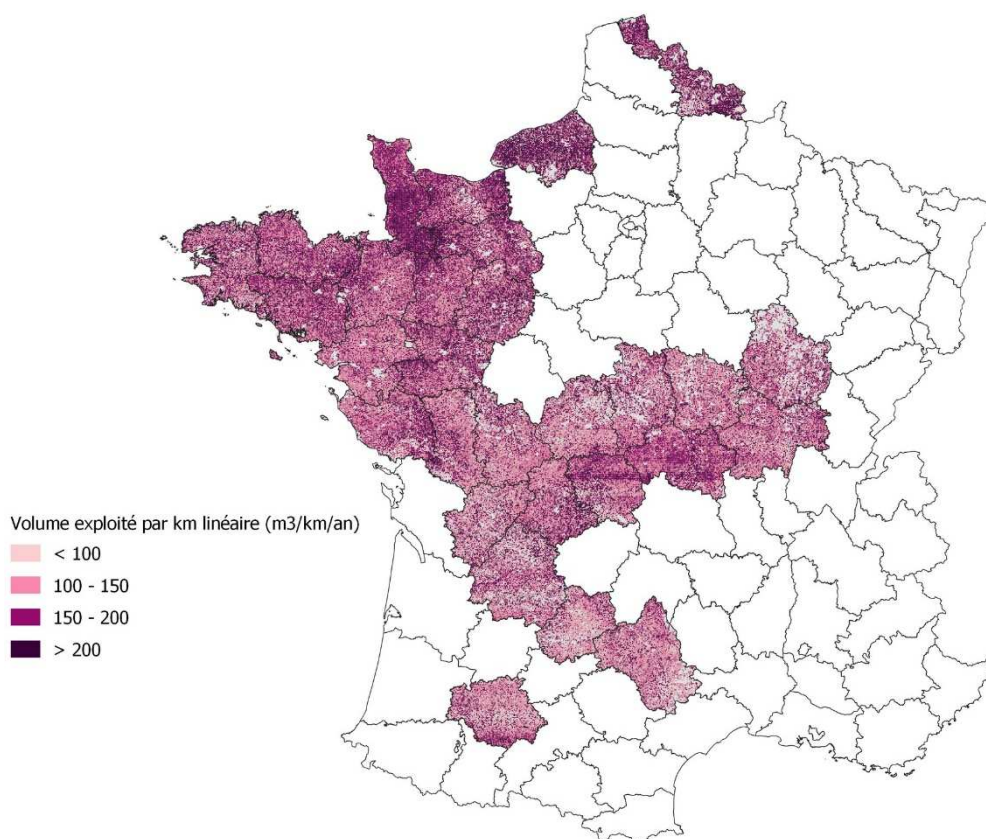


Figure 51 : carte de répartition du volume prélevé par kilomètre linéaire selon une maille kilométrique

6. Apports de l'étude et pistes d'amélioration

6.1. Apports majeurs de l'étude

Cette étude constitue le premier travail d'évaluation de la ressource ligneuse bocagère dans les haies de France et son exploitation récente sur une large échelle géographique, à savoir 31 départements parmi les plus bocagers.

Un stock sur pied actuel de 243 millions de mètres cubes a ainsi été déterminé, pour un taux d'exploitation en volume de 1,8 % par an. Des tendances départementales et régionales ont pu être identifiées. Ces données pourraient alimenter le module cartographique forêt-bois (CARTOFOB) de l'observatoire de la biomasse.

Ces premières estimations reposent sur une méthodologie multisource spécifiquement développée dans cette étude. Elle exploite et valorise à la fois des couches géographiques thématiques (linéaire DSB), des données issues de la télédétection (photographies aériennes, MNS et MNHC) et des données d'inventaire *in-situ* (données IFN). Notre méthodologie, générique, documentée et reproductible, pourrait être appliquée à l'intégralité du territoire métropolitain afin de fournir une évaluation nationale de la ressource, et répétée dans le temps pour suivre les évolutions de la ressource et contribuer à définir des scénarios d'évolution des haies selon différents scénarios de gestion dans une approche prospective.

6.2. Points de vigilance et pistes d'amélioration

Les développements méthodologiques entrepris dans les tâches 1, 2 et 3 de cette étude ont permis d'identifier certains points nécessitant une attention particulière.

Méthode générale

Les métriques de hauteur/largeur de haie et les estimations de volumes sur pied et de prélèvements produites dans cette étude n'ont pas pu être validées faute de données terrain indépendantes. Des données de hauteur et de largeur de haie mesurées *in-situ* permettraient d'évaluer la précision des métriques obtenues par le traitement du MNS, tandis que la réalisation de chantiers d'exploitation permettrait de fournir des données de volume, de biomasse et de carbone de référence permettant d'apprécier la précision de nos modèles. En ce sens, la poursuite des collaborations avec les acteurs des territoires agissant pour la valorisation des haies est indispensable pour enrichir la méthode générique.

Compte tenu des incertitudes sur le linéaire du DSB, les tarifs de cubage, les métriques et les modèles de prédiction, il n'est pas possible, à ce stade de développement de la méthode, de diffuser directement les données calculées au niveau de chaque segment de haie. Seuls des résultats agrégés par maille kilométrique, département et région sont publiés.

Tâche 1 - calcul des métriques de hauteur/largeur des haies

La largeur des haies est souvent surestimée sur le MNHC. En effet, la méthode de calcul du MNS utilise des groupes de pixels (appelés « fenêtres ») qui débordent légèrement à la limite des houppiers. L'utilisation de MNS dédiés aux usages forestiers, dont les paramètres de calcul sont spécifiques, pourrait éventuellement réduire cette surestimation. Cette surestimation n'impacte toutefois pas l'estimation du stock sur pied qui est basée sur une mesure de terrain prenant en compte les dimensions individuelles des arbres.

L'approche par perpendiculaire n'est pas entièrement satisfaisante. Bien qu'elle autorise une bonne densité de « sondage » des pixels du MNHC le long de la haie, des « double-comptes » peuvent être générés lorsque des haies se rejoignent ou forment un virage trop serré. L'approche par bassin versants pourrait permettre de pallier cette limitation dans le futur.

Tâche 2 - identification des haies récemment prélevées

La méthode par différentiel de MNS quantifie les interventions sur la haie au niveau de son axe (sur lequel le linéaire DSB est recalé à la tâche 1). Il en résulte que les prélèvements liés à l'entretien courant de la haie (élagage, taille latérale) ne sont pas pris en compte. Seules les pertes de hauteur de végétation de plus de 5 m sur l'axe de la haie sont prises en compte par cette méthode. De plus, il est possible qu'un

tronçon de haie s'accroisse en largeur (et donc que le volume du tronçon DSB correspondant s'accroisse entre les deux MNS), même s'il a été identifié comme « prélevé » par la méthode de différentiel de hauteur (c'est-à-dire, même si seulement quelques pixels ont perdu au moins 5 m de hauteur sur l'axe du tronçon).

Par ailleurs, cette méthode d'identification « pixel à pixel » des interventions sur la haie ne permet pas de calculer le linéaire prélevé par classe de hauteur ou de largeur des haies, ces métriques étant des valeurs moyennes calculées sur toute la longueur des tronçons DSB individuels (dont la longueur est de 10 m dans l'immense majorité des cas). Autrement dit, un tronçon DSB de 10 m est considéré comme « prélevé » dans son intégralité, même si seulement trois pixels de 50 cm (comptant pour 1,5 m dans le linéaire prélevé) ont présenté une baisse de hauteur sur l'axe de la haie. Une optimisation de la méthode d'évaluation du linéaire prélevé par type de haie (classe de métriques) reste donc nécessaire.

La période de prises de vue aériennes de l'IGN s'étale généralement de mi-avril à mi-octobre. Le calcul des métriques de hauteur et de largeur de haie fait donc intervenir des MNS pouvant être altérés par un manque de feuillage sur les prises de vues des mois d'avril et mai. Ce phénomène est fonction de la date de reprise de végétation plus ou moins tardive dans la saison selon l'année et le département. Un manque de feuillage sur la prise de vue 1 (2015-2017) tend à sous-estimer les linéaires prélevés (phénomène visible pour le Finistère sur la carte des volumes prélevés, voir figure 49) alors qu'un manque de feuillage sur la prise de vue 2 (2018-2020) tend à surestimer les linéaires prélevés et sous-estimer les volumes sur pied. Les périodes de vols pour les deux prises de vues utilisées par département sont fournies en annexe 3. Ce phénomène est cependant localisé aux secteurs survolés à ces périodes de printemps. Pour un même département, la période de vol peut être de plusieurs mois. Dans ce cas, seules certaines parties du département peuvent être concernées. L'annexe 3 présente également des cartes détaillant les secteurs concernés par des prises vues réalisées en avril et sur la première quinzaine de mai. Une analyse plus poussée devra être conduite pour évaluer l'impact de ce phénomène sur les résultats, probablement minime dans la mesure où le modèle a été ajusté au niveau national pour limiter ces risques.

La méthode utilisée dans cette étude pour évaluer les prélèvements de biomasse dans le bocage (différentiel de deux MNS) ne permet pas de distinguer les prélèvements relevant d'une gestion durable (coupe forte de l'étage dominant mais maintient des souches ou replantation) d'un arasement définitif. Cependant, des analyses récentes du bocage des régions Bretagne et Pays de la Loire ont permis d'évaluer la part des arasements sur la dernière décennie. Ces travaux rendent possible, au moins pour ces régions et en moyenne par département, de différencier la part des arasements dans les prélèvements de bois (annexe 5).

Tâche 3 - modélisation des stocks

Une grande attention a été portée sur la représentativité du tarif de cubage utilisé à la tâche 3. Ce tarif repose en effet sur des données de volume total aérien de référence (« mesures complètes ») recueillies exclusivement en Basse-Normandie en 2010, faute de disposer de mesures similaires dans les autres régions de France étant donné l'investissement particulièrement lourd qu'elles impliquent. Dans cette étude, la représentativité du tarif a été confirmée par la vérification de la similarité des dimensions des arbres de Basse-Normandie par rapport à celles des arbres des campagnes IFN mesurés dans les autres départements inclus dans le périmètre de l'étude. A ce titre, les données de cubage du projet Resp'Haies (voir section suivante), notamment, pourront se révéler très précieuses à l'avenir dans l'identification de tendances régionales.

La valeur d'infradensité moyenne du bois retenue dans l'étude est issue d'observations réalisées sur des arbres de forêt et concerne uniquement le tronc à 1,30 mètre de hauteur (CARBOFOR), faute de disposer à ce jour de données consolidées sur des arbres de haies incluant le tronc et les branches. Le coefficient moyen appliqué aux volumes de l'étude est toutefois une valeur pondérée par l'importance relative des essences notées sur les points de haies de l'IFN. Les chantiers réalisés dans le projet Resp'Haies permettront de préciser la gamme et la variabilité des valeurs d'infradensité du bois des arbres de haie.

Les tarifs de cubage développés dans l'étude ne permettent pas de distinguer les essences, les diamètres ou les compartiments de l'arbre, faute de données terrain suffisamment détaillées. Là encore, des données de cubage complémentaires seront nécessaires.

6.3. Perspectives

Extension de la méthode à la France entière

La méthodologie développée dans cette étude, générique et reproductible, pourrait être étendue à la France entière et permettre une première évaluation nationale de la ressource bocagère actuelle et récemment prélevée. En effet, bien que cette étude couvre une sélection de 31 départements particulièrement riches en haies, un tiers du linéaire bocager reste à évaluer dans les 65 départements français non traités à ce jour.

Amélioration des tarifs et des facteurs de conversion volume-biomasse en collaboration avec les partenaires du projet Resp'Haies

En 2019, le projet CASDAR Resp'Haies (Résilience et performances des exploitations agricoles liées aux haies) a été lancé dans le but de promouvoir l'implantation et la gestion multifonctionnelle des haies au sein des territoires, mais aussi de produire de nouveaux outils et référentiels à destination des agriculteurs, des gestionnaires territoriaux et des politiques publiques œuvrant sur le bocage, et notamment pour la collecte standardisée de données de cubage et de chantier d'exploitation. Resp'Haies vise notamment à concevoir et tester une méthode opérationnelle de cubage de la biomasse des haies pouvant ensuite être déployée sur l'ensemble du territoire.

Notre étude a permis d'initier le dialogue avec l'AFAC-Agroforesteries, SOLAGRO et la SCIC Bois Bocage Energie. Les échanges ont permis de conforter nos résultats génériques par un ressenti « terrain » positif. Des points de convergence ont été identifiés en vue d'éventuelles collaborations futures (besoins communs et approches complémentaires).

L'un des atouts de la base de données Resp'Haies, en cours de constitution et d'analyse, est d'intégrer des données « terrain » de volume et de biomasse (cubages, pesées) de segments de haie exploités dans le cadre de chantiers sélectionnés suivant un plan d'échantillonnage documenté. Le nombre de chantiers suivis dans le projet Resp'Haies restera insuffisant pour établir des équations représentatives au niveau régional et national, mais le développement d'un protocole de collecte standard ouvre des perspectives intéressantes pour uniformiser le format des futures acquisitions dans de nouveaux projets et éventuellement par un plus grand nombre d'acteurs. A terme, lorsque des données de cubage harmonisées et statistiquement représentatives seront disponibles, des tarifs de cubage prenant en compte la diversité des territoires et des contextes bocagers pourront être développés. Des facteurs de conversion volume-biomasse spécifiques aux haies pourraient également être définis. Ces deux apports permettront d'affiner significativement les résultats de la méthode générique. En retour, la base de données Resp'Haies pourrait être enrichie des métriques de hauteur et de largeur de haie produites par notre méthode générique sur leurs segments de haie exploités afin de comparer les estimations issues de la chaîne de modèles et les mesures de terrain. Les échanges doivent se poursuivre entre les équipes.

Amélioration de la précision des MNT-MNS-MNHC et des métriques de haie grâce à l'exploitation de la couverture nationale LiDAR HD de l'IGN

En 2021, l'IGN a lancé le programme national LiDAR HD, qui vise à numériser et à décrire le sol et le sur-sol de l'ensemble du territoire métropolitain par des relevés laser aéroportés à haute densité. Cette couverture LiDAR permettra de standardiser la production du MNT (RGE Alti® de l'IGN), qui repose pour l'instant sur la combinaison de relevés photogrammétriques (corrélation d'images) et de relevés LiDAR à faible densité. Elle devrait permettre la production de modèles numériques de terrain, de surface et de hauteur de canopée plus détaillés et plus précis, qui pourraient apporter un gain significatif dans le calcul des métriques de hauteur et de largeur des haies, tout en apportant des informations complémentaires inaccessibles par les photographies aériennes (densité et perméabilité de la végétation, présence d'un sous-étage, etc.). La donnée LiDAR HD pourrait également faciliter la segmentation des MNHC par la méthode des bassins versants évoquée à la section 4.1.3.

Définition de scénarios d'évolution des stocks et des prélèvements

L'évaluation des disponibilités futures en ressource bocagère selon différents scénarios de gestion nécessiterait deux tâches supplémentaires, non réalisées dans cette étude : quantifier l'accroissement annuel des haies et différencier les arasements des autres types de prélèvement.

Accroissement annuel des haies : dans cette étude, le second millésime MNS (MNS2) a été utilisé sur l'intégralité du linéaire DSB afin de calculer les métriques « récentes » de hauteur/largeur de haie, le premier millésime (MNS1) a été utilisé uniquement pour quantifier les métriques « anciennes » sur la portion du linéaire DSB identifiée comme « prélevée », le différentiel de métriques MNS1-MNS2 permettant de quantifier le stock ayant disparu. Une autre approche, non retenue dans cette étude en

raison du temps de calcul qu'elle nécessite, serait de calculer les métriques de hauteur/largeur de haie sur l'intégralité du linéaire DSB à partir de chacun des deux millésimes MNS. En plus de s'affranchir des limites de la méthode actuelle de détection des haies prélevées (basée sur le différentiel de hauteur des pixels sur l'axe de la haie, voir section 6.2 - tâche 2), cette approche permettrait d'identifier à la fois les portions du DSB ayant perdu du stock et celles ayant connu un accroissement. Cela permettrait d'identifier les types de haie préférentiellement prélevés (classes de hauteur ou de largeur particulières), mais également les contextes pédoclimatiques favorables à la production de bois et au stockage de carbone. En revanche, cela ne permettra pas d'accéder à d'autres informations d'intérêt, telles que l'essence ou le type d'arbre (têtards, etc.).

Distinction des types de prélèvement : la disponibilité de trois millésimes MNS pour un même département permettrait d'identifier le type de prélèvement subi par la haie, plus précisément de distinguer les haies arasées des haies gérées durablement. Par exemple, une haie arasée pourrait présenter des métriques significatives au MNS1, des métriques absentes au MNS2 et des métriques absentes au MNS3, tandis qu'une haie gérée durablement pourrait présenter des métriques significatives au MNS1, des métriques faibles ou absentes au MNS2 et des métriques en augmentation au MNS3.

Sur ces bases, des scénarios de référence régionalisés d'évolution de la ressource bocagère (évolution du linéaire, type de coupe, accroissement) pourraient être produits pour simuler les disponibilités futures en bois/biomasse et optimiser leur approvisionnement (chaufferies, etc.). Ils pourraient être confrontés aux acteurs locaux et servir de base à la définition de scénarios alternatifs reflétant l'impact de différentes stratégies de gestion des haies.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bélouard T., Py N., Maillet, G., Guyon, D., Meredieu, C., Pausader, M., Champion, N. 2015. Pinastéréo - Estimation de la hauteur dominante et de la biomasse forestière dans le massif des landes de Gascogne à partir d'images stéréoscopiques pléiades. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, vol 209, p.133.
- Bouvier D. 2008. Estimation de la productivité des haies de l'Ouest de la France, recherche de références pour l'amélioration de la valorisation énergétique des haies. 85p
- Colin A., Thivolle-Cazat A., Coulon F., Barnérias C., Couturier C. 2009. Biomasse forestière, populicole et bocagère disponible pour l'énergie à l'horizon 2020. Rapport final de convention. Contrat IFN / ADEME n°0601C0134, avec FCBA et SOLAGRO, 105p
- Commagnac L., Masson V., Benest F. 2020. Dispositif national de suivi des bocages. Rapport d'étape 2020. Conventions MAA et MTES relatives à la mise en place d'un dispositif de surveillance des bocages en France métropolitaine. V1. Juin 2020. 67p
- Dupouey J.-L. 2002. Estimation de la densité du bois pour les espèces ligneuses de la flore de France à partir d'une synthèse bibliographique. Rapport d'étude. Novembre 2002. 1p.
- Géoservices IGN. BD haie, couche nationale de référence des haies linéaires en France métropolitaine. geoservices.ign.fr/documentation/donnees/vecteur/bdhaie
- Géoservices IGN. RGE Alti, le modèle numérique de terrain (MNT) maillé qui décrit le relief du territoire français à grande échelle. geoservices.ign.fr/documentation/donnees/alti/rgealti
- Hervé J.-C., Wurpillot S., Vidal C., Roman-Amat B. 2014. L'inventaire des ressources forestières en France : un nouveau regard sur des nouvelles forêts. Rev. For. Fr. LXVI - 3-2014 - © AgroParisTech, 2014. pp. 247-260
- IFN, 2010. Etude Haies, Biomasse, Basse-Normandie (HBBN). Estimation du bois de haie mobilisable en « bois énergie » en Basse-Normandie, 24p
- Loustau D. éditeur 2004. Séquestration de Carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles. Rapport Final Projet GICC 2001 "Gestion des impacts du changement climatique" et Convention Gip ECOFOR n°3/2001. INRA, Bordeaux - Pierroton, France. 137p.
- Panagiotidis D., Abdollahnejad A., Surovy P., Chiteculo V. 2017. Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. *International Journal of Remote Sensing*. vol 38, (8-10), pp.2392-2410. Doi : 10.1080/01431161.2016.1264028.

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 1 : effectifs et volumes moyens observés et prédits sur 50 m par « type regroupé » de haie pour les points HBBN.....	29
Tableau 2 : effectifs et volumes moyens observés et prédits par « type regroupé » de haie pour les points IFN	34
Tableau 3 : facteurs de conversion volume-biomasse (en kg/m ³) des essences majoritaires de la base « haie » de l'IFN	35
Tableau 4 : linéaires bocagers régionaux totaux et présentant un stock calculé (MNHC > 3 m). Les pourcentages correspondent à la fraction du linéaire à stock qui est prélevée chaque année	46
Tableau 5 : stocks régionaux actuels en volume, biomasse et carbone (le stock par km est indiqué entre parenthèses).....	46
Tableau 6 : stocks régionaux prélevés chaque année en volume, biomasse et carbone et taux de stock prélevé par an.....	47

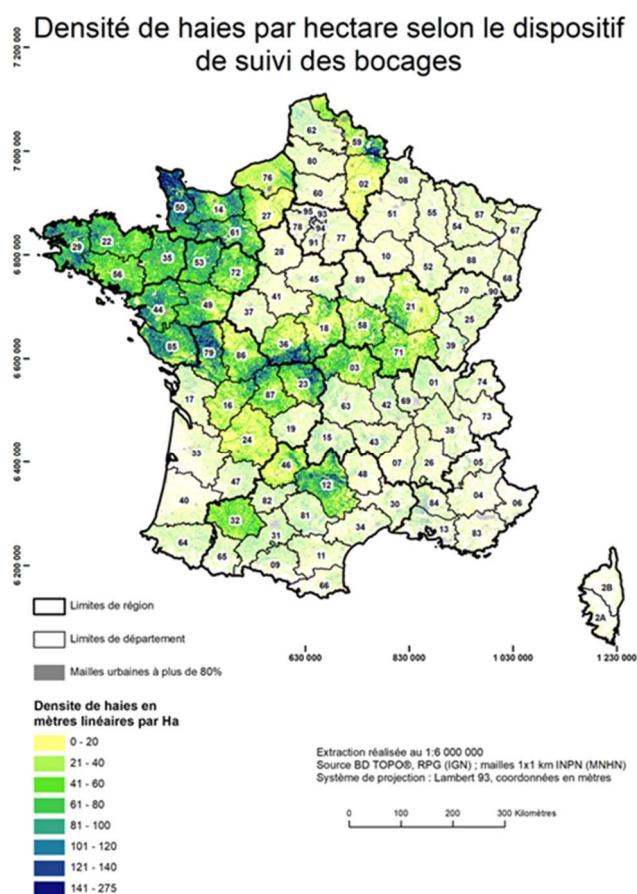
FIGURES

Figure 1 : schéma général de la méthodologie générique développée dans l'étude	11
Figure 2 : un œil seul ne peut déterminer où se trouve la maison. Avec deux yeux, les rayons s'intersectent et la position de la maison est connue.....	12
Figure 3 : avec une seule image, on ne peut déterminer à quelle distance se trouve la maison. Avec deux images (= un couple), les rayons s'intersectent et la position de la maison est connue.....	12
Figure 4 : principe du couple stéréoscopique lors d'une prise de vue aérienne.....	12
Figure 5 : la différence entre le modèle numérique de surface obtenu par corrélation d'images et le modèle numérique de terrain permet d'obtenir le modèle numérique de hauteur de canopée (MNHC) qui décrit la hauteur des arbres.....	13
Figure 6 : source des données utilisées pour les données altimétriques	14
Figure 7 : années des modèles numériques de surface utilisés pour prédire les stocks sur pied.....	14
Figure 8 : dalle kilométrique du MNHC, seuillée et filtrée, sur une zone de la Manche (50).....	15
Figure 9 : des perpendiculaires sont créées le long de l'axe de la haie pour extraire une information d'altitude à partir du MNHC seuillé et filtré. Des perpendiculaires « 3D » sont ainsi générées. Lorsque le MNHC présente une absence de données (la photo aérienne est visible, par exemple à l'extrémité de la perpendiculaire), les perpendiculaires 3D sont rognées. Ainsi la longueur de la perpendiculaire 3D correspond à la largeur de la haie et la lecture du profil des hauteurs (exemple en haut à droite pour la perpendiculaire en bleu ciel) permet de connaître la hauteur maximum de la haie	16
Figure 10 : exemple de résultat d'une segmentation du MNHC seuillé et filtré par un algorithme de bassin versant. Les différentes couleurs représentent des bassins versants différents	16
Figure 11 : exemple de haies linéaires du DSB sur le département de la Manche (50) et points tous les 10 mètres associés.....	17
Figure 12 : principe de la découpe des haies en segments de 10 mètres. Une haie de 38 mètres constituée de 3 segments de droite ①, ②, ③ (2 sommets de ligne intermédiaires) est découpée en 4 segments a, b, c et d. La longueur des segments a, b, c est de 10 mètres et celle du segment d est de 8 mètres dans ce cas.....	17
Figure 13 : La zone d'intérêt est matérialisée par l'ellipse rouge : les perpendiculaires des haies situées de part et d'autres du cours d'eau ne traversent pas le tronçon de cours d'eau. Du fait de la technique employée, quelques erreurs subsistent lorsque les linéaires de réseau et de haie sont extrêmement proches, moins de 30 cm, ellipse bleue.....	18
(3).....	19
Figure 14 : les perpendiculaires situées au niveau des angles <= 120° ou au niveau des intersections des haies indiquent des largeurs de haies aberrantes. Les valeurs de largeur et de hauteur correspondantes ne sont pas retenues pour les calculs.....	19
Figure 15 : comparaison des linéaires du DSB (en blanc) avec les linéaires recalés sur le MNHC (en rose)	20
Figure 16 : années des anciens modèles numériques de surface utilisées pour la tâche 2.....	21
Figure 17 : MNS date 1 (vue ombrée).....	22
Figure 18 : MNS date 2 (vue ombrée).....	23
Figure 19 : Différentiel MNS1 –MNS2>5m (en rouge, sur vue ombrée MNS2)	23

Figure 20 : Différentiel MNS1 –MNS2>5m (rouge, sur vue ombrée MNS2 et linéaire DSB en jaune).....	24
Figure 21 : schéma général de la méthodologie de calcul des stocks	25
Figure 22 : localisation et sélection par photo-interprétation des segments haies inventoriés.....	26
Figure 23 : protocole de « mesures complètes ». Il intègre plusieurs mesures de diamètre le long de la bille de pied et des mesures de diamètre, de longueur et de fréquence de chaque classe de dimension des surbilles, branches incluses.	27
Figure 24 : relation entre V0_50m et le prédicteur sumG par type regroupé de haie	28
Figure 25 : relation entre V0_50m et le prédicteur HTOTmax par type regroupé de haie	28
Figure 26 : résidus des tarifs de volume aérien total par « type regroupé » de haie.....	29
Figure 27 : V0_50m observé (« mesures complètes ») vs. V0_50m prédit (tarif) par « type regroupé » de haie.....	30
Figure 28 : relation hauteur-diamètre pour les arbres HBBN et les arbres des campagnes IFN dans la zone d'étude.....	30
Figure 29 : Jointure spatiale entre les données IFN (incluant le volume aérien total) et le linéaire du DSB enrichi des métriques MNHC	31
Figure 30 : répartition des 879 segments de haie IFN enrichis du volume et des métriques MNHC utilisés pour définir le modèle de prédiction.....	32
Figure 31 : relation entre le volume aérien total par mètre linéaire et les métriques moyennes de la haie	33
Figure 32 : résidus du modèle et comparaison entre les valeurs observées et prédites de volume	34
Figure 33 : linéaire bocager total du DSB et linéaire contribuant au stock sur pied (MNHC > 3 m) par département.....	36
Figure 34 : stock sur pied total actuel en volume aérien (Mm ³) par département (MNHC > 3 m)	37
Figure 35 : stock sur pied moyen actuel en volume aérien (m ³) par km par département (MNHC > 3 m)	37
Figure 36 : stock sur pied total actuel en volume (Mm ³) par département et par classe de hauteur de haie (MNHC > 3m).....	38
Figure 37 : stock sur pied total actuel en volume (Mm ³) par département et par classe de largeur de haie (MNHC > 3m)	39
Figure 38 : stock sur pied total actuel en biomasse aérienne (MtMS) par département (MNHC > 3 m) ..	40
Figure 39 : stock sur pied moyen actuel en biomasse aérienne (tMS) par km par département (MNHC > 3 m).....	40
Figure 40 : stock sur pied actuel en carbone total (aérien + racinaire) et aérien (MtC) par département (MNHC > 3 m).....	41
Figure 41 : stock sur pied moyen actuel en carbone total et aérien (tC) par km et par département (MNHC > 3 m).....	41
Figure 42 : linéaire prélevé par an et par département (en noir le pourcentage du linéaire actuel prélevé par an)	42
Figure 43 : volume aérien prélevé par an et par département (en noir le pourcentage du volume actuel prélevé par an).....	42
Figure 44 : volume prélevé par an, par département et par classe de hauteur de haie	43
Figure 45 : volume prélevé par an, par département et par classe de largeur de haie.....	44
Figure 46 : biomasse aérienne (MtMS) prélevée par an et par département (en noir le pourcentage de la biomasse aérienne actuelle prélevée par an)	45
Figure 47 : carbone aérien (MtC) prélevé par an et par département (en noir le pourcentage du carbone aérien actuel prélevé par an)	45
Figure 48 : carte de répartition du volume sur pied selon une maille kilométrique.....	48
Figure 49 : carte de répartition du volume sur pied par kilomètre linéaire selon une maille kilométrique	48
Figure 50 : carte de répartition du volume prélevé selon une maille kilométrique.....	49
Figure 51 : carte de répartition du volume prélevé par kilomètre linéaire selon une maille kilométrique	49

ANNEXES

Annexe 1 : carte de la densité de haies par hectare selon le DSB



Annexe 2 : critères de choix des départements traités dans la phase 2 du DSB

Cette annexe présente, dans une version remise en forme, la note précisant la méthodologie de choix des territoires pour la phase 2 du DSB.



METHODOLOGIE DE CHOIX DES TERRITOIRES POUR LA PHASE 2 DU DSB



1. Problématique

Le Ministère en charge de l'agriculture, le Ministère en charge de l'environnement et l'Office français de la biodiversité ont sollicité l'IGN pour la mise en place d'un Dispositif national de Suivi des Bocages (DSB). L'objectif de ce dispositif est de produire une information géographique complète (France métropolitaine) sur les réseaux de haies, de caractériser les territoires bocagers et de suivre l'évolution quantitative et qualitative des trames bocagères. Ce projet est co-produit avec l'Office français de la biodiversité.

Trois phases distinctes ont été identifiées dans la construction de ce dispositif :

- Phase 1 : production des couches de référence de haies France entière et identification des territoires bocagers à l'échelle de la France métropolitaine ;
- Phase 2 : caractérisation des territoires bocagers ;
- Phase 3 : mise en place et développement d'un protocole de suivi qualitatif.

La phase 1 a été finalisée mi-2020. La phase 2 qui doit commencer fin 2020 devait s'appuyer sur une carte des territoires bocagers produite à la fin de la phase 1. En effet il semblait logique de restreindre la caractérisation des bocages aux seuls territoires identifiés comme bocagers.

Si de nombreux indicateurs ont bien été produits comme prévus à l'issue de la phase 1 du projet (indicateurs de densité de haies, de connectivité et de cohérence du réseau de haies, etc.), le comité scientifique du DSB (dont la liste des membres est annexée à cette note) lors de sa réunion du 19 mai 2020, a considéré qu'il n'était pas possible de produire une carte des territoires bocagers à partir d'une seule des variables calculée à l'issue de la phase 1. Il est nécessaire de réaliser une étude multifactorielle et qui prenne en compte le voisinage des mailles pour obtenir un zonage réaliste.

En l'absence de carte des territoires bocagers, il semble toutefois raisonnable de limiter les travaux de la phase 2 aux territoires pouvant comporter des bocages en France métropolitaine.

Pour cette sélection de territoires, le choix a été fait de considérer des départements entiers, afin de favoriser l'utilisation des données qui seront produites à cette échelle de politique publique et par cohérence avec les données sources issues de la phase 1 du DSB.

Deux sources d'informations ont été mises à contribution pour réaliser cette sélection.

2. Sources de données quantitatives existantes sur les territoires bocagers

2.1. La carte de densité de haies du dispositif de suivi des bocages

Pour chaque maille INPN 1 x 1km (Grille nationale, 1km x 1km, Métropole, 2015 : <https://bit.ly/2SeoXZY>), la somme des longueurs de haies de la couches des haies linéaires du dispositif de suivi des bocages est calculée. Cela permet d'obtenir la densité de haies par hectare moyenne par maille kilométrique, comme illustré ci-dessous sur la figure 1.

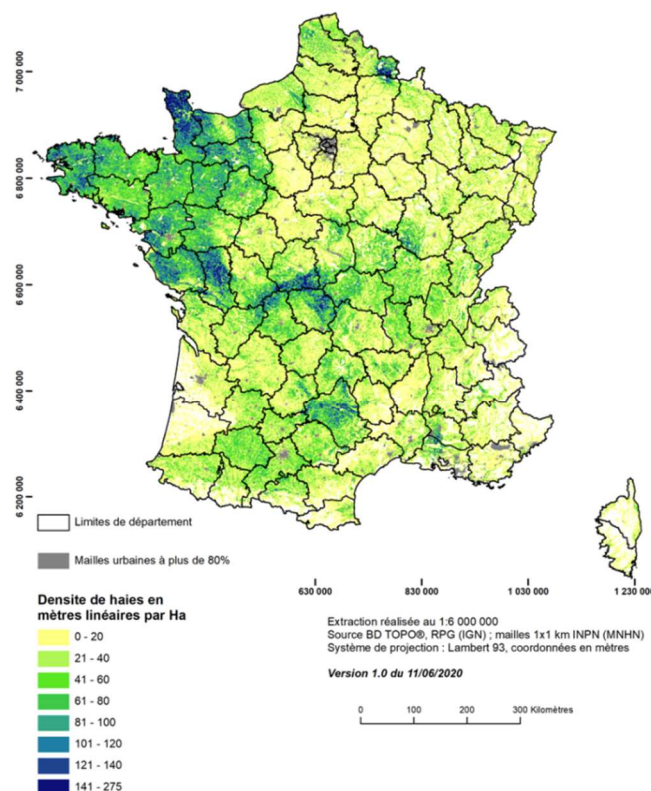


Figure 1 : carte de la densité de haies par hectare selon le dispositif de suivi des bocages

2.2. La carte de densité de haies issue de l'inventaire forestier national

L'Inventaire forestier national réalise également un inventaire des formations linéaires arborées. Pour des raisons pratiques, cet inventaire s'appuie sur le même maillage du territoire que l'inventaire forestier, qu'il vient compléter. Des cartes de densité de haies par maille peuvent ainsi être réalisées en s'appuyant sur des données photo-interprétées. La carte suivante a été réalisée à l'aide des campagnes d'inventaire menées de 2007 à 2016. La grille de restitution des résultats est de 7 km de côté.

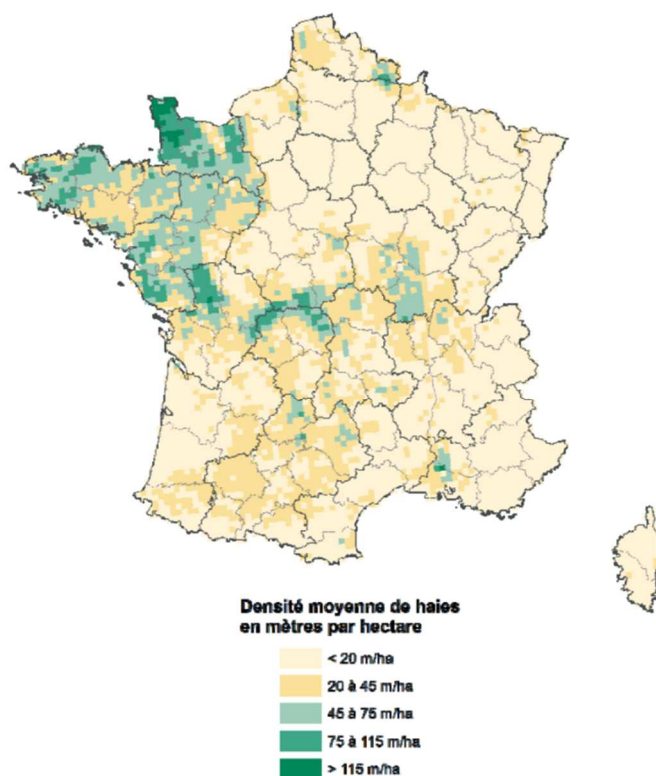


Figure 2 : carte de la densité de haies par hectare selon l'Inventaire Forestier National

3. Méthodologie de définition des territoires bocagers pour la phase 2 du DSB

La comparaison de la carte issue de la phase 1 du DSB avec celle issue de l'inventaire statistique des formations linéaires situent les zones de fortes densités de haies dans les mêmes territoires de France métropolitaine.

A l'échelle de la France métropolitaine, le choix a été fait de baser la sélection des départements « bocagers » d'une part, sur la carte de l'Inventaire forestier (figure 2, les mailles de 7 km utilisées pour cette carte étant plus lisibles à cette échelle) et d'autre part, sur des orientations de politiques régionales ou départementales relatives à la connaissance du bocage. Le résultat obtenu est cohérent avec la carte des densités de haies par maille obtenue en phase 1 du DSB.

L'IGN propose de retenir comme territoires concernés par la phase 2 du DSB les départements qui remplissent au moins une des conditions suivantes :

- le département est située dans une collectivité territoriale (département ou région) ayant mis en place une politique active sur la connaissance du bocage ;
- le département possède au moins une maille avec une densité de haies supérieure à 115 mètres/hectare.

A la liste de départements ainsi constituée :

- la Côte d'Or et la Nièvre sont ajoutés pour compléter la zone bocagère Charolais/Morvan ;
- l'Aisne est ajoutée pour compléter la zone bocagère de l'Avesnois ;
- les Bouches-du-Rhône et le Vaucluse sont soustraits car les haies présentes sur ces départements sont des haies brise-vent et ces territoires de la vallée du Rhône ne constituent pas des paysages bocagers.

4. Liste des territoires retenus pour la phase 2 du DSB

L'application de la méthodologie ci-dessus aux départements de la France métropolitaine entraîne la sélection des départements suivants sur lesquels les travaux de la phase 2 du DSB seront menés :

- Tous les départements de la région Bretagne : Côtes-d'Armor (22), Finistère (29), Ille-et Vilaine (35) et Morbihan (56) ;
- Tous les départements de la région Normandie : Calvados (14), Eure (27), Manche (50), Orne (61), Seine Maritime (76) ;
- Tous les départements de la région Pays-de-la-Loire : Loire-Atlantique (44), Maine-et-Loire (49), Mayenne (53), Sarthe (72), Vendée (85) ;
- Et les départements : Aisne (02), Aveyron (12), Charente (16), Côte-d'Or (21), Creuse (23), Gers (32), Indre (36), Lot (46), Nièvre (58), Nord (59), Saône-et-Loire (71), Deux-Sèvres (79), Haute-Vienne (87).

La liste des départements retenus est présentée ci-après sous forme de tableau (tableau 1).

N° de Ligne	Numéro de département	Nom de département
1	2	Aisne
2	12	Aveyron
3	14	Calvados
4	16	Charente
5	21	Côte-d'Or
6	22	Côtes-d'Armor
7	23	Creuse
8	27	Eure
9	29	Finistère
10	32	Gers
11	35	Ille-et-Vilaine
12	36	Indre
13	44	Loire-Atlantique
14	46	Lot
15	49	Maine-et-Loire
16	50	Manche
17	53	Mayenne
18	56	Morbihan
19	58	Nièvre
20	59	Nord
21	61	Orne
22	71	Saône-et-Loire
23	72	Sarthe
24	76	Seine-Maritime
25	79	Deux-Sèvres
26	85	Vendée
27	87	Haute-Vienne

Tableau 1 : liste des départements retenus pour la phase 2 du DSB

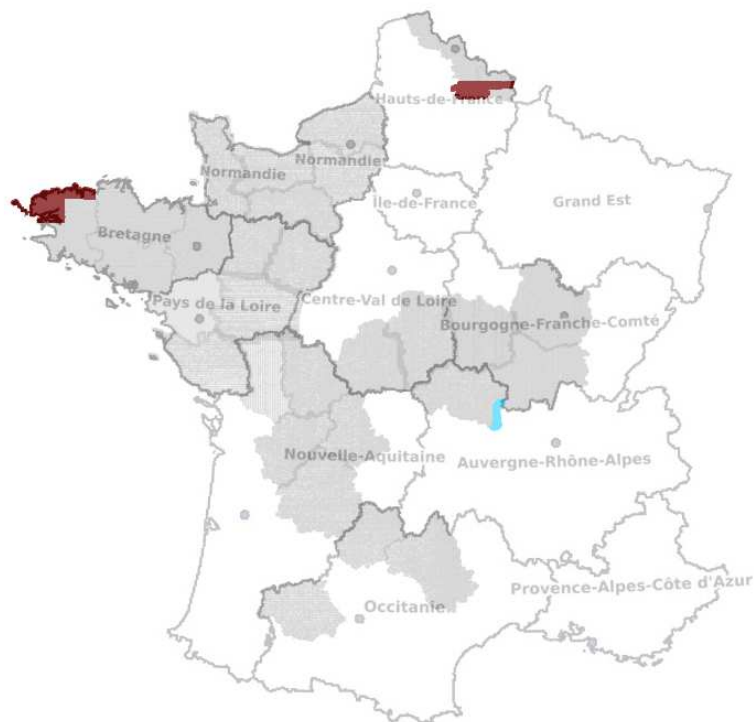
Annexe 3 : dates des prises de vue aériennes utilisées pour le calcul des MNS

Département	Dates millésime 1			Dates millésime 2		
	MNS 1	début vol	fin vol	MNS 2	début vol	fin vol
02*	2018	19/04/18	27/09/18			
03	2016	26/08/16	02/09/16	2019	15/09/19	17/09/19
12	2016	15/08/16	25/08/16	2019	14/08/19	26/10/19
14	2016	13/08/16	17/08/16	2020	14/05/20	23/06/20
16	2017	02/08/17	21/08/17	2020	18/07/20	07/08/20
18	2016	23/08/16	10/09/16	2020	26/05/20	24/06/20
21	2017	23/05/17	11/06/17	2020	08/09/20	12/09/20
22	2015	08/06/15	30/09/15	2018	17/05/18	24/06/18
23	2017	18/06/17	04/07/17	2020	08/07/20	29/07/20
24	2015	29/06/15	21/08/15	2017	02/08/17	28/08/17
27	2015	03/08/15	29/09/15	2019	16/05/19	25/08/19
29	2015	14/04/15	30/06/15	2018	05/05/18	19/05/18
32	2016	14/08/16	23/08/16	2019	01/06/19	17/06/19
35	2017	16/06/17	07/07/17	2020	07/08/20	14/09/20
36	2017	04/07/17	05/10/17	2020	16/05/20	08/07/20
44	2017	07/07/17	07/10/17	2020	26/05/20	22/06/20
46	2016	03/07/16	16/07/16	2019	02/09/19	13/09/19
49	2016	12/08/16	22/08/16	2020	27/05/20	31/05/20
50	2015	09/09/15	02/10/16	2019	13/05/19	09/07/19
53	2016	23/08/16	25/08/16	2019	03/07/19	10/07/19
56	2016	06/07/16	18/07/16	2019	13/05/19	22/08/19
58	2017	17/06/17	29/09/17	2020	26/05/20	29/05/20
59	2015	23/04/15	02/08/15	2018	07/05/18	26/07/18
61	2016	07/07/16	13/08/16	2020	15/05/20	18/05/20
71	2018	27/06/18	26/07/18	2020	30/07/20	04/09/20
72	2016	12/08/16	31/08/16	2019	10/07/19	21/08/19
76	2015	11/07/15	28/09/15	2019	23/07/19	25/08/19
79	2018	18/05/18	09/07/18	2020	18/07/20	12/09/20
85	2016	08/07/16	12/08/16	2019	30/08/19	06/09/19
86	2017	11/10/17	15/10/17	2020	19/05/20	03/09/20
87	2017	16/06/17	04/07/17	2020	19/05/20	11/07/20

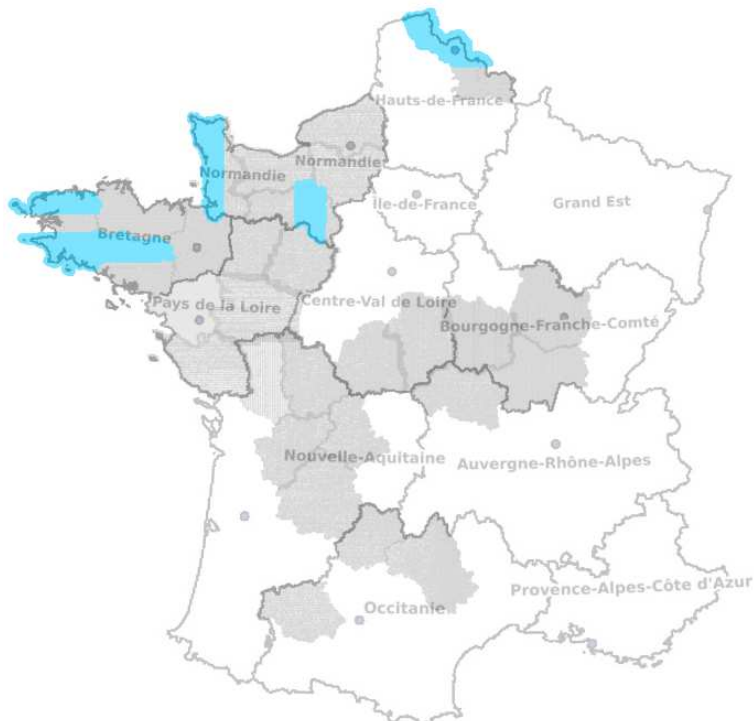
*Le département de l'Aisne (02) ne disposant que d'un seul millésime de MNS, aucun chiffre de stock récemment prélevé ne pourra lui être attribué.

Les cartes ci-dessous présentent les territoires pour lesquels les prises de vues aériennes ont eu lieu en avril (rouge) ou en première quinzaine de mai (bleu), c'est-à-dire lorsque le feuillage des arbres n'est pas entièrement développé, ce qui peut se traduire par des métriques de haie sous-estimées.

PVA 1 (millésime MNS 1) :



PVA 2 (millésime MNS 2) :



Annexe 4 : données départementales et régionales de linéaire, de volume et de carbone actuels et prélevés

Région (% couverture)	Dépt.	Linéaire DSB (km)	Linéaire à stock (km)	Linéaire prélevé (km/an)	Volume aérien actuel (m3)	Volume aérien prélevé (m3/an)	Carbone aérien actuel (tC)	Carbone aérien prélevé (tC/an)
Bretagne (100%)	22	44 000	36 700	600	11 790 000	191 000	2 940 000	48 000
	29	53 100	39 400	250	10 950 000	79 000	2 730 000	20 000
	35	41 100	33 100	590	11 050 000	186 000	2 750 000	46 000
	56	36 200	30 100	670	10 970 000	230 000	2 730 000	57 000
	Total	174 400	139 300	2 110	44 760 000	686 000	11 150 000	171 000
Normandie (100%)	14	38 700	30 800	550	9 570 000	189 000	2 380 000	47 000
	27	12 400	9 600	180	3 070 000	-	760 000	-
	50	61 800	48 600	1 230	13 430 000	417 000	3 350 000	104 000
	61	41 300	34 000	540	11 120 000	183 000	2 770 000	46 000
	76	16 800	12 600	280	4 620 000	109 000	1 150 000	27 000
	Total	171 000	135 600	2 780	41 810 000	898 000	10 410 000	224 000
Pays de la Loire (100%)	44	46 800	38 100	470	10 760 000	146 000	2 680 000	36 000
	49	36 000	28 500	410	7 920 000	140 000	1 970 000	35 000
	53	36 700	29 600	590	9 340 000	196 000	2 330 000	49 000
	72	30 800	24 100	380	7 560 000	132 000	1 880 000	33 000
	85	48 500	37 500	570	10 350 000	182 000	2 580 000	45 000
	Total	198 800	157 800	2 420	45 930 000	796 000	11 440 000	198 000
Nouvelle-Aquitaine (46%)	16	19 900	16 400	200	5 790 000	65 000	1 440 000	16 000
	23	34 000	24 300	650	8 960 000	222 000	2 230 000	55 000
	24	17 900	15 100	320	5 260 000	109 000	1 310 000	27 000
	79	47 600	34 400	630	9 490 000	205 000	2 360 000	51 000
	86	28 400	20 200	340	6 040 000	109 000	1 500 000	27 000
	87	27 700	23 400	400	9 420 000	135 000	2 350 000	34 000
	Total	175 500	133 800	2 540	44 960 000	845 000	11 190 000	210 000
Bourgogne-Franche-Comté (51%)	21	21 500	14 400	210	4 180 000	70 000	1 040 000	17 000
	58	22 000	14 900	270	4 730 000	86 000	1 180 000	21 000
	71	28 600	19 300	570	6 230 000	182 000	1 550 000	45 000
	Total	72 100	48 600	1 050	15 140 000	338 000	3 770 000	83 000
Occitanie (28%)	12	49 600	38 500	420	12 090 000	126 000	3 010 000	31 000
	32	26 700	22 000	260	7 040 000	84 000	1 750 000	21 000
	46	14 300	12 600	160	4 070 000	49 000	1 010 000	12 000
	Total	90 600	73 100	840	23 200 000	259 000	5 770 000	64 000
Centre-Val de Loire (36%)	18	23 700	18 000	230	5 740 000	79 000	1 430 000	20 000
	36	34 800	24 900	320	8 130 000	102 000	2 030 000	25 000
	Total	58 500	42 900	550	13 870 000	181 000	3 460 000	45 000
Hauts-de-France (41%)	2	12 200	9 500	-	2 920 000	-	730 000	-
	59	21 600	13 000	240	3 620 000	85 000	900 000	21 000
	Total	33 800	22 500	240	6 540 000	85 000	1 630 000	21 000
Auvergne-Rhône-Alpes (10%)	3	31 200	22 600	830	7 220 000	286 000	1 800 000	71 000

Annexe 5 : différenciation de la part des arasements dans les prélèvements de bois

Sur les deux régions Bretagne et Pays de la Loire, l'IGN vient de procéder à la cartographie complète des linéaires bocagers (sans exploitation du DSB) en s'appuyant sur des photos aériennes récentes (2017-2020 selon le département). Ces inventaires exhaustifs du bocage ont été comparés à une cartographie plus ancienne réalisée avec une méthode similaire. Ces comparaisons ont permis de quantifier le phénomène d'arasement définitif des haies par le calcul d'un indicateur par département. Ainsi, la présente étude permettant de quantifier les prélèvements d'une manière globale (arasements + non-arasements), il est possible pour ces deux régions d'en déduire, par soustraction, la part des arasements au niveau de chaque département.

	Depts	Km pva1	Taux de linéaire prélevé (%)	Taux de linéaire prélevé arasé (%)	Taux de linéaire prélevé non-arasé (%)	Part des arasements (%)	Part des prélèvements hors arasements (%)
Bretagne	22	45 806	1,35	0,18*	1,17	13	87
	29	53 897	0,47	0,26*	0,21	55	45
	35	42 911	1,43	0,39*	1,04	27	73
	56	36 129	1,86	0,10*	1,77	5	95
Pays de la Loire	44	48 249	1,01	0,26**	0,75	26	74
	49	37 613	1,15	0,28**	0,87	24	76
	53	38 494	1,61	0,40**	1,21	25	75
	72	31 908	1,24	0,29**	0,95	23	77
	85	50 164	1,17	0,25**	0,92	21	79

Répartition des exploitations de linéaires bocagers entre arasements définitifs et prélèvements hors arasements sur les départements de Bretagne et Pays de la Loire

*Evaluation du programme Breizh Bocage 2 : bilan de mise en œuvre, premiers impacts sur les territoires et pistes d'amélioration pour la future programmation.

https://geobretagne.fr/pub/ign_doc/referentiel_bocager_regional_rapport_d_execution_ign_V1_7_finale.pdf

** Mise à jour de la cartographie des linéaires de haies de Pays de la Loire - Rapport d'exécution. Conseil Régional Pays de la Loire, juin 2021.

L'ADEME EN BREF

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

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

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

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

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

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

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



CLÉS POUR AGIR

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



ILS L'ONT FAIT

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



EXPERTISES

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



HORIZONS

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



STOCKS DE BOIS ET DE CARBONE DANS LES HAIES BOCAGÈRES FRANÇAISES

Les haies bocagères rendent de nombreux services, parmi lesquels la production de bois et le stockage de carbone. Elles sont toutefois soumises à une exploitation intense depuis plusieurs décennies, sans qu'aucune donnée standardisée sur la ressource ne puisse orienter les choix des politiques publiques.

A travers la mise en œuvre d'une méthode innovante et reproductible, l'IGN réalise dans cette étude la première estimation des stocks de bois et de carbone sur pied dans les principaux bassins bocagers français, ainsi que leur exploitation récente. Les résultats, cohérents entre les territoires, mettent en évidence des tendances régionales.

Ce travail établit les bases pour étendre l'évaluation des stocks bocagers à l'ensemble du territoire métropolitain. Les pistes d'amélioration identifiées permettraient d'enrichir les résultats avec des scénarios régionalisés d'évolution de la ressource bocagère, en accroissement comme en prélèvement.

*Une première évaluation large
échelle de la ressource bocagère
française*

*Une méthodologie innovante et
applicable à l'ensemble du territoire
métropolitain*

*Un travail initiateur aux pistes
d'amélioration prometteuses*

