

MESURER LA BIOMASSE DES HAIES

RAPPORT FINAL

Oct.
2024



EXPERTISES

REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement les structures opérateurs et les techniciens qui ont réalisés les relevés de haies et les suivis de chantiers :

- Atelier Agriculture Avesnois Thiérache
- SCIC Mayenne bois énergie
- SCIC Bocage Bois Energie

CITATION DE CE RAPPORT

MORET Catherine, PILLE Lauranne Afac-Agroforesteries. Sylvain Betolaud SCIC Bocage Bois Energie. 2024, Mesurer la biomasse des haies - 47 pages

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

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

Ce document diffusé par l'ADEME a été réalisé à l'initiative de son/ses auteur(s) ; il a reçu un soutien financier de l'ADEME mais n'engage pas l'ADEME. Son contenu (ou les données qu'il contient) n'engage que la seule responsabilité de son/ses auteurs et ne représente pas la position de l'ADEME.

ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 2003C0054

Étude réalisée par MORET Catherine, PILLE Lauranne Afac-Agroforesteries. Sylvain Betolaud SCIC Bocage Bois Energie. **pour ce projet Cofinancé par l'ADEME, et WWF France**

Avertissement : Ce rapport fait suite et complète celui publié en 2022 : VIAUD Valérie, LESAINTE Lucas, INRAE, COULON Frédéric, SOLAGRO, BETOLAUD Sylvain, NEVOUX Laurent, CANONNE Dorine, SCIC B2E (Bois Bocage Energie), MORET Catherine Afac-Agroforesteries. 2022. Evaluation des stocks et des flux de biomasse et carbone des haies, tests métrologiques et premières références dans 4 régions en France. 64 pages

Coordination technique - ADEME : DELBERGUE Antoine, ingénieur

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

SOMMAIRE

RÉSUMÉ	4
ABSTRACT	5
1. PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS	1
2. ÉTAT DE L'ART	3
2.1. Les données actuelles et les manques	3
2.2. Les méthodes existantes aujourd'hui à l'échelle des territoires	5
2.2.1. Liaison simple entre type de haies et résultats de chantiers :	5
2.2.2. Extrapolation des méthodes forestières	5
2.2.3. La méthode IGN.....	6
2.2.4. La méthode de l'étude Biomasse Normandie	6
3. METHODOLOGIE	7
3.1. Collecte, gestion et analyse des données.....	7
3.2. Echantillonnage.....	9
3.2.1. Types de haies	9
3.2.2. Localisations.....	10
4. RESULTATS	11
4.1. Caractérisation générale de l'échantillon de haies - y compris « gabarit des haies hauteur, largeur...».....	11
4.2. Modèles de cubage.....	16
5. - SUITES ET PERSPECTIVES	23
6. - ANNEXES.....	24
6.1. Annexe 1 - Protocole de mesures des haies.....	24
6.2. Annexe 2 – Tableaux de renseignements des données	37
▪ TABLE DES FIGURES.....	39
▪ TABLE DES TABLEAUX.....	39
▪ SIGLES ET ACRONYMES	40
▪ BIBLIOGRAPHIE.....	40

RÉSUMÉ

Les haies bocagères sont une source de biomasse pour développer les ressources renouvelables des territoires agricoles. Leur préservation et leur maintien sont aussi une solution pour stocker davantage de carbone dans les parcelles. Cependant, les données disponibles aujourd’hui sur le volume produit par les haies, leur accroissement annuel et leur capacité de stockage de carbone sont faibles et ne permettent pas de réaliser des scénarios fiables pour valoriser ces services. La majorité des méthodes qui existaient jusqu’à présent pour cuber les haies sont principalement des méthodes pour estimer le volume sur pied en m³ de bois rond. Les méthodes sont soit trop complexes à mettre en œuvre ou nécessitent déjà une certaine expérience, soit elles sont trop simplistes ou anciennes et ne permettent pas une précision suffisante. Elles s’appuient souvent sur des références forestières alors que la croissance des arbres n’est pas la même dans les haies.

Une première étude a été engagée de 2020 à 2022 soutenue par l’ADEME, les financements CASDAR (projet Resp’haies) et Ecotone sous la coordination de l’Afac en partenariat avec l’INRAE, la SCIC Bois Bocage Energie et Solagro afin de travailler à des modèles simplifiés permettant de construire des référentiels Biomasse-carbone des haies France entière.

Cependant avant d’engager un travail de transfert, il a semblé important de poursuivre la collecte de données pour conforter le modèle de cubage des taillis et têtards construit dans la précédente étude.

Le travail sera poursuivi en 2025/2026 pour compléter les méthodes de mesure de biomasse sur les arbres de hauts jets.

ABSTRACT

Hedgerows are a source of biomass for developing renewable resources in agricultural areas. Their preservation and maintenance are also solutions for increasing carbon storage in plots. However, the data currently available on the volume produced by hedges, their annual growth, and their carbon storage capacity is limited, making it difficult to create reliable scenarios to value these services. Most existing methods for measuring hedge biomass primarily estimate the standing volume of round wood in cubic meters. These methods are often either too complex to implement or require prior expertise, or they are overly simplistic or outdated, lacking sufficient precision. They frequently rely on forest references, despite the fact that the tree growth differs significantly in hedgerows.

A preliminary study was conducted from 2020 to 2022, supported by ADEME and funded by CASDAR (project Resp'haies) and Ecotone, under the coordination of Afac in collaboration with INRAE, SCIC Bois Bocage Energie and Solagro. This study aimed to develop simplified models to establish biomass-carbon reference frameworks for hedges across France.

However, before moving forward with this work, it was deemed essential to continue collecting data to strengthen the cubing model for coppices and pollards established in the previous study.

This work will continue through 2025/2026 to enhance biomass measurement methods for tall trees.

Au vu du développement des besoins de bois énergie issu des haies et du marché du carbone il est nécessaire de disposer de données chiffrées sur leur productivité. La majorité des méthodes qui existent aujourd'hui pour cuber les haies sont principalement des méthodes pour estimer le volume sur pied en m³ de bois rond. Les méthodes sont soit trop complexes à mettre en œuvre ou nécessitent déjà une certaine expérience, soit elles sont trop simplistes ou anciennes et ne permettent pas une précision suffisante. Elles s'appuient souvent sur des références forestières alors que la croissance des arbres n'est pas la même dans les haies.

Ce projet a comme objectif de conforter une méthode de cubage simplifiée des taillis et têtards des haies établis dans un projet précédent afin de pouvoir le transférer et l'utiliser pour construire un référentiel de données Biomasse-carbone des haies France entière.

1. Problématique et objectifs

Regroupant plus de 300 structures, l'Afac-Agroforesteries est une organisation nationale tête de réseau dont l'objet est de promouvoir, d'accompagner et mettre en œuvre des politiques globales de développement de l'arbre et de la haie dans tous les territoires, afin de répondre aux enjeux de transition agroécologique, de lutte contre l'effondrement de la biodiversité, et de résilience face à la crise climatique.

Elle est intervenue dans ce projet comme coordinateur et a traité l'ensemble des résultats. Trois structures de son réseau ont réalisé l'ensemble des mesures de terrain nécessaires au projet.

- **Afac -Agroforesteries : coordinateur**
- **3 prestataires – opérateurs terrain :**

Association atelier agriculture Thiérache (AAT) basée dans les Hauts de France

SCIC bois bocage énergie (B2E) basée en Normandie

SCIC Mayenne Bois énergie

Les haies bocagères sont une source de biomasse pour développer les ressources renouvelables des territoires agricoles. Leur préservation et leur maintien sont aussi une solution pour stocker davantage de carbone dans les parcelles. Cependant, les données disponibles aujourd'hui sur le volume produit par les haies, leur accroissement annuel et leur capacité de stockage de carbone sont faibles et ne permettent pas de réaliser des scénarios fiables pour valoriser ces services.

Une première étude a été engagée de 2020 à 2022 soutenue par l'ADEME et coordonnée par l'Afac en partenariat avec l'INRAE, la SCIC Bois Bocage Energie et Solagro afin de travailler à des modèles simplifiés permettant de construire des référentiels Biomasse-carbone des haies France Entière

Résultats étude 2020/2022

L'étude a abouti à la construction d'une méthode simplifiée de cubage sur pied des haies de taillis (arbres et arbustes) et de têtards qui sont aujourd'hui les types de haies qui sont les plus exploités dans les territoires pour produire de la biomasse.

Les modèles confirment les résultats des travaux faits en forêt de AUCLAIR et METAYER (1980), in BAZIN et CHEVALIER (1985), qui mettent en évidence une forte corrélation entre le poids total d'un brin de taillis et sa surface terrière (surface de la section de coupe). (Cf fiche de restitution de l'étude méthode-https://afac-agroforesteries.fr/wp-content/uploads/2023/01/mep_fiche_methodo_cubage_V2.pdf)

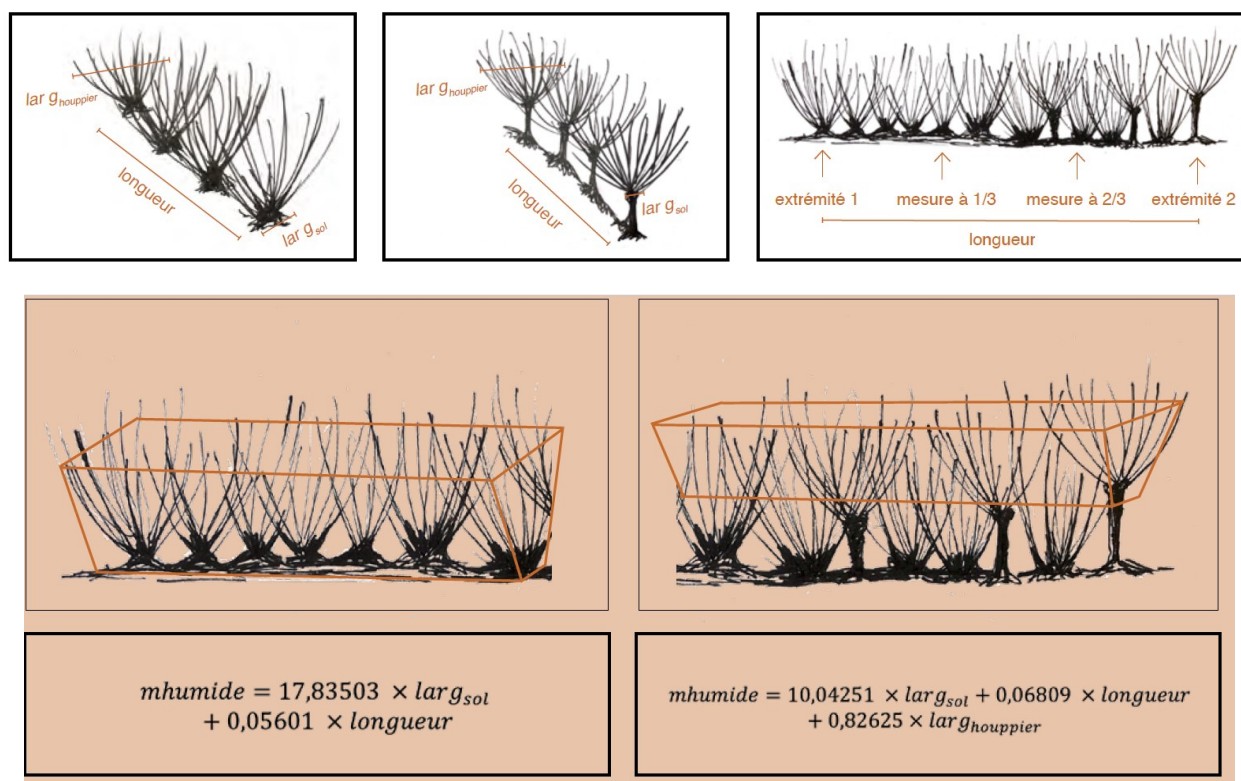


Figure 1 Modèle de cubage simplifié des haies de taillis et de têtards – étude 2022

Par ailleurs l'étude a permis de vérifier les coefficients de conversion (MAP-Tonne, bois vert et sec) utilisés dans les projets de valorisation de la biomasse des haies.

Les données sont des éléments de connaissance de référence pour les régions Hauts de France, Normandie, et Pays de Loire sur l'accroissement annuel des haies et le stockage de carbone associé dans la partie aérienne. (Cf fiche de restitution de l'étude données https://afac-agroforesteries.fr/wp-content/uploads/2023/01/mep_fiche_referentiel_cubage_V2.pdf)

Ils apportent aussi des références qui sont nécessaires pour qualifier à grande échelle les haies à partir des outils d'interprétation des photos aériennes ou satellites (en particulier gabarit des haies).

Le présent rapport met à jour ces résultats et permet de diffuser un modèle de cubage plus robuste.

2.État de l'art

2.1. Les données actuelles et les manques

Une analyse bibliographique en 2006 montre que les années 1950-1960 ont été marquées par des travaux de géographies descriptives des paysages bocagers, et des travaux sur le rôle du bocage en termes de questions agronomiques liées aux remembrements (Mérot et Bridet-Guillaume, 2006). Ensuite, ont été développés des travaux portant sur les processus écosystémiques liés aux paysages de bocage (années 1980-1990), sur le suivi par télédétection des évolutions des paysages bocagers (1990-2000), mais aussi sur l'historique des systèmes bocagers.

La revue de 2006 permet de repérer dans les travaux : 1) un manque d'approche systémique des haies dans leur contexte à la fois agricole, écosystémique, paysager et sociétal qui permettrait de comprendre les évolutions à l'œuvre, et 2) un manque d'articulation des points de vue écologiques et sociotechniques sur les haies qui permettrait de mieux identifier les ressorts de la durabilité de ces systèmes agroforestiers. Depuis les années, très peu de projets de recherche sont centrés sur la haie avec une perspective socio-écologique (trois groupes de travail dans le projet AgForward, 2014-2017). La réalisation d'un bilan de l'existant en termes de linéaire mais surtout de pratiques d'entretien et de gestion des haies devient un enjeu majeur (Moreno et al, 2018).

L'intérêt porté à la haie sur ses fonctions de production de bois et de stockage de carbone est récent. Au contraire de la forêt, la haie ne bénéficie pas de tarif de cubage et de références connues de production. Seuls quelques travaux régionaux ont travaillé sur l'extrapolation de méthodes forestières de cubage et sur la production de référentiels localisés.

Les principales qui ont fait l'objet de rapports publiés ont été réalisées en grand ouest, principalement en Normandie. Une première étude datant de 1983 a essayé de quantifier la biomasse bocagère en Normandie. Cette étude se base sur les travaux antérieurs de Auclair et Metayer dans le domaine forestier. L'idée ici était de se concentrer sur les surfaces terrières (surface de la section de coupe) et le lien avec le poids sec des brins des cépées. Le calcul de la surface terrière de la haie était réalisé par la moyenne des surfaces terrières des cépées. L'association Biomasse Normandie a réalisé une étude « des potentialités et de la valorisation des ressources des haies bocagères de Basse-Normandie », publiée en 1985 (BAZIN et CHEVALIER.,1985). Ces deux études sont anciennes et n'ont jamais été reproduites dans d'autres situations. Ces résultats de productions de ces deux études ont été publiés et nous permettrons une comparaison avec nos données de références.

C'est sur l'étude Bouvier sur laquelle se base aujourd'hui les opérateurs terrains en particulier sur les coefficients de conversion (Bouvier, 2008). Il s'agit d'une étude datant de plus de 10 ans. Le tableau 1 présente tous les coefficients qui sont utilisés aujourd'hui. Cependant, ces données, déjà anciennes, se basent elles-mêmes pour partie sur une synthèse de données issues de deux suivis différents (Caroff 2005 et Jezegou 2008). Les résultats sont basés sur des retours de chantiers peu précis, sans protocole précis de mesures et sur un faible nombre d'échantillons. Enfin, une des unités utilisées est les MAP sèches c'est-à-dire le volume apparent du bois déchiqueté qui comprend encore un taux d'humidité (autour de 25 % d'humidité). Cela pose des questions sur la méthode d'obtention du volume et également sur la précision des taux d'humidité.

Tableau 1 : Références utilisées aujourd'hui pour les changements d'unité.

<u>CONVERSION</u>	<u>m3 bois</u>	<u>Stère</u>	<u>MAP humide</u>	<u>T humide</u>	<u>MAP sec</u>	<u>T sèche</u>	<u>MW.h</u>
<u>m3 bois</u>	1,00	1,50	3,00	1,00	2,50	0,65	2,48
<u>Stère</u>	0,67	1,00	2,00	0,67	1,67	0,43	1,65
<u>MAP humide</u>	0,33	0,50	1,00	0,33	0,83	0,22	0,83
<u>T humide</u>	1,00	1,50	3,00	1,00	2,50	0,65	2,48
<u>MAP sec</u>	0,40	0,60	1,20	0,40	1,00	0,26	0,99
<u>T sèche</u>	1,54	2,31	4,62	1,54	3,85	1,00	3,81
<u>MW.h</u>	0,40	0,61	1,21	0,40	1,01	0,26	1,00

De plus, ce travail met en évidence que plusieurs études ont cherché à obtenir des références de productivité des haies mais que les mêmes limites sont notées sur les mesures (Tableau 2).

Tableau 2 : Synthèse des références de productivité des haies continues existantes dans l'Ouest (synthèse Bouvier 2008).

Type de formation	Sources	Productivité en MAP sec/an/100ml continus	Ordre de grandeur en MAP sec/an/100ml continus
Haies arbustives	CA 50	0,85	0,85
Futaies	Chambres d'Agriculture de Bretagne (2006)	1,1	0,9
	Bazin et Chevalier (1985)	0,65	
Haies mixtes, Taillis sous futaies	Chambres d'Agriculture de Bretagne (2006)	1,7	1,7
	Bazin et Chevalier (1985)	1,7	
	CA 50	1,7	
Taillis	Chambres d'Agriculture de Bretagne (2006)	1,7	2
	Bazin et Chevalier (1985)	1,5	
	CA 50	2,5	
	CA 61	2	
	CG 22	2,2	
Ripisylve	CG 22	2,5	2,5

A partir d'une étude complémentaire à ses données collectées réalisée par le CAREN (Centre Armoricaire de Recherche en Environnement), le rapport Bouvier a conclu sur les références de productivité en grand Ouest suivantes sur lesquelles de nombreux travaux se basent encore aujourd'hui (tableau 3) :

Tableau 3 : Ordre de grandeur de productivité des haies de l'Ouest – travaux CAREN et Bouvier 2008

Type de haies	Productivité en MAP sec/an/100 ml continus	Productivité en tonne humide/an/100 ml continu (avec coef bouvier)
Taillis d'arbustes	0.85	0,34
Futaies : Hauts jets et/ou émondés	1	0,4
Haies mixtes : Futaies avec taillis	1.5	0,6
Taillis d'arbres	2	0,8

Les études réalisées plus récemment par l'IGN sur l'évaluation de la biomasse en Bretagne et en Normandie s'appuyaient sur ces résultats antérieurs complétées par des enquêtes auprès des opérateurs. Deux tableaux de conversion différents ont été utilisés dans ces études (Annexe 1). Finalement, en comparant le tableau de conversion utilisé pour l'étude de Bretagne et celui de Normandie, on constate que les coefficients sont plus faibles en Bretagne. Or, dans l'étude d'évaluation de la biomasse bocagère en Bretagne (SIMON et al., 2018), la référence qui avait été utilisée était le tableau de conversion issu du rapport de Bouvier. Cela signifie que les estimations des volumes récoltés dans les haies de Normandie, sont plus élevées lorsque l'on utilise le tableau validé par le groupe normand que celui utilisé par l'étude Bouvier (SIMON et al. 2019).

Au vu de ces différences, l'IGN mettait en évidence la nécessité de travailler un tableau de conversion commun entre les régions afin de pouvoir comparer les études régionales.

L'étude de Normandie propose un tableau de productivité des haies. Cependant, il s'agit de la productivité en bois sur pied issue d'une conversion de MAP sèche. De plus, les retours d'enquête réalisés ont été peu nombreux et les résultats ont été jugés mal exploitables. Aujourd'hui il est difficile pour les acteurs locaux de donner des valeurs chiffrées des volumes récoltés et des fréquences de coupe dans les haies qu'ils rencontrent sur leur territoire.

Les besoins actuels des agriculteurs et de leurs conseillers et animateurs portent en général sur trois types d'outils et méthodes communes: 1) pour acquérir et s'approprier des références de productivités pertinentes localement, 2) pour

cuber rapidement des situations de chantiers, 3) pour évaluer des situations et des évolutions de production dans le cadre de plan de gestion des haies des agriculteurs ou des volumes mobilisables dans les territoires pour développer les filières en adéquation avec le volume disponible.

Pour évaluer de manière plus robuste la biomasse bocagère et les prélèvements possibles, il est nécessaire de disposer d'une base de données de mesures de terrain, s'appuyant sur un cubage des haies précis, par une méthodologie maîtrisée qui puisse être utilisable à grande échelle d'extrapolation statistique, en association avec un dispositif exhaustif de description du linéaire bocager.

Outre leur contribution à la substitution d'énergie fossile, les haies sont aussi une source potentielle d'augmentation des puits de carbone dans l'espace agricole. Aussi, le chiffrage du potentiel que représente ce levier dans le cadre de l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050, porté par la Stratégie Nationale Bas Carbone, est indispensable.

Une méthodologie Label Bas Carbone sur les haies a été élaborée. Réalisée par la Chambre d'Agriculture des Pays de la Loire, elle s'appuie sur les résultats du projet Carbocage2 des bocages de l'Ouest et sur l'état de connaissances bibliographiques (COLOMBIE et al. 2020). Cependant, sa construction butte sur le manque de références disponibles sur le stock de carbone des haies dans les différents compartiments, suivant les types de haies et les situations pédoclimatiques en France. Pour remédier à ce manque de connaissance, de nombreux abattements sont réalisés afin de ne pas risquer de surestimer le stockage additionnel de carbone des projets de haies accompagnés dans le cadre de cette méthode. Il est donc nécessaire de poursuivre les suivis pour préciser les données de références nécessaires aux modèles. Aucun résultat de cubage est disponible dans l'étude Carbocage et une comparaison n'est donc pas possible dans ce rapport.

2.2. Les méthodes existantes aujourd'hui à l'échelle des territoires

Une grande partie des méthodes utilisées identifiées dérive de celles existantes en forêt et/ou de suivi de chantiers.

2.2.1. Liaison simple entre type de haies et résultats de chantiers :

Il a été constaté que la productivité d'une haie dépend principalement des choix de l'exploitant, de formation et d'entretien de sa haie. Aussi la productivité est fortement liée au type de haie formé par l'exploitant et à son état. C'est pourquoi les principales références citées dans la partie II.1 suivent une des méthodes suivantes où un rapprochement est réalisé entre le descriptif simple des haies et le suivi de chantier :

1 - Relier une productivité à un type de haie. Pour cela deux phases : Une phase de description, où l'on détermine le type de la haie, puis une phase de suivis de chantier pour mesurer la production. La productivité est obtenue en ramenant la production à l'âge de la dernière coupe.

2 - Déterminer la productivité de tronçons de haie de type homogène. On détermine la productivité des tronçons de haie de type homogène en utilisant la méthodologie précédente.

3 - Assimiler la productivité au taux d'accroissement de la haie : Productivité en volume produit. Le taux d'accroissement est mesuré par un carottage à la terrière sur plusieurs arbres de la haie.

2.2.2. Extrapolation des méthodes forestières

Une autre méthode de cubage a été développée par Mission Haie Auvergne (Annexe 2). Cette méthode utilise un calcul du coefficient de forme des branches. Celui-ci est associé au diamètre médian et au diamètre de base du brin. Il est également utilisé un coefficient de branchage. En effet, les volumes des branches des différents arbres et arbustes sont différents les uns des autres et plus ou moins importants proportionnellement au volume de l'axe principal. Pour y remédier, une valeur de branchage est attribuée à chacun. Il s'agit d'une estimation visuelle. Ce coefficient de branchage permet de caractériser à travers une valeur, la quantité de branche plus ou moins développée de l'individu proportionnellement au volume des axes principaux. Ils sont classés en très branchus, moyennement branchus, peu branchus ou très peu branchus. chaque catégorie s'applique un coefficient.

Ensuite le volume total est obtenu par application de la formule :

$$V = \pi * \text{Diamètre}^2 / 2 * \text{longueur totale} * \text{Coeff F} + \pi * \text{Diamètre}^2 / 2 * \text{longueur totale} * \text{Coeff F} * \text{coeff B}$$

Avec Coeff F : coefficient de foisonnement

Coeff B : coefficient de branchage

Cette méthode s'est avérée un peu complexe pour les opérateurs à mettre en place. De plus, cette méthode permet une estimation du volume sur pied en m³ de bois rond. Or, les besoins sont plutôt d'estimer le plus précisément possible le volume décheté en MAP (sans usage de coefficient).

Cette méthode se rapproche de la méthodologie de cubage utilisée dans l'étude Carbocage. Les estimations de capital sur pied par type de haie ont été effectuées au sein de trois territoires (Mauges Communauté, Roi Morvan Communauté et Pays Vallée de la Sarthe) sur 36 haies. Elle permet de recueillir les informations générales sur la haie : Informations contextuelle, morphologique sur la haie, typologie, âge. Le protocole permet de relever sur chaque arbre cépée, les indicateurs permettant d'estimer le volume de bois (formules de cubage forestier). Cela se réalise avec un compas forestier pour le calcul du diamètre, une croix du bucheron pour la hauteur des haut-jets et un décamètre pour la hauteur et la largeur de la haie. Les haies, lors de la récolte sont ensuite pesées pour connaître la biomasse récoltée lors des chantiers. La biomasse non récoltée (tronc, bas de haies) est ensuite ajoutée pour en déduire la biomasse totale produite sur les 100 mètres linéaires (COLOMBIE et al., 2020).

Ces méthodes sont intéressantes et ont servi de bases pour le développement de notre protocole.

En conclusion, la majorité des méthodes qui existent aujourd'hui sont principalement des méthodes pour estimer le volume sur pied en m³ de bois rond. Les méthodes sont soit trop complexes à mettre en œuvre ou nécessitent déjà une certaine expérience, soit elles sont trop simplistes ou anciennes et ne permettent pas une précision suffisante.

2.2.3. La méthode IGN

Dans sa dernière étude de 2022, l'IGN a développé une méthode pour déterminer les stocks de bois et de carbone dans les haies bocagères de France (DASSOT et al. 2022). Les objectifs de cette étude étaient de réaliser une première estimation quantitative des stocks actuels de bois, de biomasse et de carbone dans les haies des principaux départements bocagers français, ainsi que leurs prélèvements récents, ainsi que de développer une méthodologie générique pour produire des estimations comparables aux échelles nationales et régionales. Cette méthode se base sur des photos aériennes et non des mesures terrain. Il s'agit des photographies collectées en continu par l'IGN en moyenne tous les 3 ans. La méthodologie consiste à calculer des métriques de hauteur et de largeur de haie calculées à partir de photographies aériennes récentes. Ces données sont calculées par un Modèle Numérique de Hauteur de Canopée (MNHC) à partir des Modèles Numériques de Surface (MNS) et de terrain (MNT) de l'IGN. En supprimant les points inférieurs à 3 mètres, les cultures ont été exclues. Ensuite, elle identifie les linéaires des haies du DSB (Dispositif de Suivi des Bocages) qui ont subi un prélèvement sur une période récente par analyse du différentiel entre deux millésimes de photographies. Les différentiels de hauteurs de plus de 5 mètres ont été notés et considérés comme un prélèvement. Enfin, des modèles ont été développés de calculs des stocks sur pied. Le tarif de cubage utilisé est issu de l'étude IFN de 2010 en Basse-Normandie. Il s'agissait de réaliser des mesures détaillées (tiges et branches), pour obtenir un volume de bois total sur des segments de haie de 50m. Les modèles ont été obtenus par une mise en relation des données IFN et le linéaire DSB enrichi des métriques de hauteur et largeur, situé à proximité du point IFN.

Cette étude apporte une première évaluation de la ressource bocagère en identifiant des tendances régionales. De plus, elle apporte une première méthode générique issue de plusieurs sources. Mais elle ne permet pas d'obtenir des informations précises récupérables grâce à un protocole terrain. Ainsi, l'état de la végétation de la haie n'est pas pris en compte. De plus, il est très difficile de différencier les haies par leur typologie et il ne pas être fait de distinction entre les haies arasées et les haies exploitées pour les prélèvements. Enfin, l'étude calcule des quantités de bois sur pied et utilise également des coefficients qui sont issus de données forestières. Elle ne prend également pas en compte l'accroissement de la haie. Cependant, les modèles obtenus sont intéressants car les mesures qui décrivent le mieux le volume de bois des haies correspondent sensiblement aux données qui nous intéressent et que nous recherchons, d'où l'importance d'une approche terrain complémentaire.

2.2.4. La méthode de l'étude Biomasse Normandie

L'association Biomasse Normandie a réalisé une étude « des potentialités et de la valorisation des ressources des haies bocagères de Basse-Normandie », publiée en 1985 (BAZIN et CHEVALIER., 1985). Cette étude fut la première en France à s'intéresser à la productivité des haies. Aujourd'hui encore elle constitue la majorité des données existantes sur le sujet.

1/ Méthodologie

L'étude propose une méthode de mesure dérivée de celles existantes en foresterie. L'évaluation se réalise en 4 phases.

- Descriptions et mesures physiques de la haie

- Calculs, extrapolations des mesures physiques à l'ensemble de la haie, à partir des données de l'Institut pour le Développement Forestier
- Enquêtes auprès des agriculteurs (historique de la haie, âge de la dernière coupe et productions)
- Suivis de chantiers de broyage (mesure de la production)

L'étude considère qu'une haie est composée de 3 strates différentes, la strate basse (petits ligneux : ronces, prunelliers...) ; la strate moyenne ou taillis (moins de 8m de haut) et la haute strate (futaie en émonde ou haut jet). L'évaluation de la biomasse (aérienne) de la haie se réalise en cumulant la production de la moyenne et de la haute strate.

Pour les taillis (moyenne strate) D'après AUCLAIR et METAYER (1980), in BAZIN et CHEVALIER (1985), les travaux menés en massifs forestiers mettent en évidence une forte corrélation entre le poids sec total d'un brin de taillis et sa surface terrière (surface de la section de coupe).

- A partir de plusieurs échantillons prélevés sur la haie, l'étude détermine le Poids Sec total (P.S.T) d'un brin et réalise une courbe de P.S.T en fonction de l'essence et du diamètre.
- Par mesures physiques sur la haie, les brins du taillis sont classés par essence et en classes de diamètres.
- On obtient alors, grâce à la courbe de P.S.T, la classe de diamètre et l'essence des brins, le poids sec total produit par le taillis (Bouvier 2008).

Pour la haute strate

- Arbres abattus : calculs moyens observés : 1.5 stères par arbre soit 0,48 T de MS
- Produits d'émondage : calculs moyens observés : 0,32 T de MS par têtard émondé

La productivité de la haie, selon l'étude, correspond à la somme de celles des deux strates supérieures. Résultats de l'étude : « Selon les essences et les modes de traitement de la haie, la productivité des haies varie de 2,2 à 4,8 Tonnes de Matière Sèche par Km et par an » (BAZIN et CHEVALIER, 1985), dans l'hypothèse de non-concurrence entre les strates.

Ordre de grandeur : 3 TMS/km/an

Soit 1,5 MAP sec / 100 ml / an

Toutes ces études et le travail de synthèse réalisé par Bouvier concluait déjà le besoin d'établir un modèle simple avec pour objectif de prédire la productivité d'une haie (prédicteur) à partir des variables identifiées préalablement comme étant fortement corrélées linéairement à la productivité (prédicteurs).

Ces différentes approches ont servi de base pour construire le protocole engagé dans cette présente étude.

3.Méthodologie

3.1. Collecte, gestion et analyse des données

Collectes de données

Afin de pouvoir avoir des données exploitables pour vérifier le modèle de cubage, il est nécessaire de collecter des données dans le cadre de chantiers de coupe afin de rapprocher les mesures faites sur pied du bois extrait de la haie.

C'est pourquoi les opérateurs choisis pour travailler sur ce projet sont tous des structures qui accompagnent les agriculteurs dans le développement de filières bois énergie et qui ont déjà participé à l'opération précédente (bonne connaissance du protocole)

Il a été mis en œuvre le protocole simplifié de mesure des haies définis dans le projet biomasse Carbone ADEME-Resp'haie.

Les données à relever permettent d'informer :

- les mesures du volume de bois des haies sur pied
- les volumes réellement produits par suivi des chantiers d'exploitation
- la mesure de l'âge des bois pour calculer l'accroissement annuel
- la mesure du poids anhydre pour homogénéiser les résultats quel que soit la période de broyage

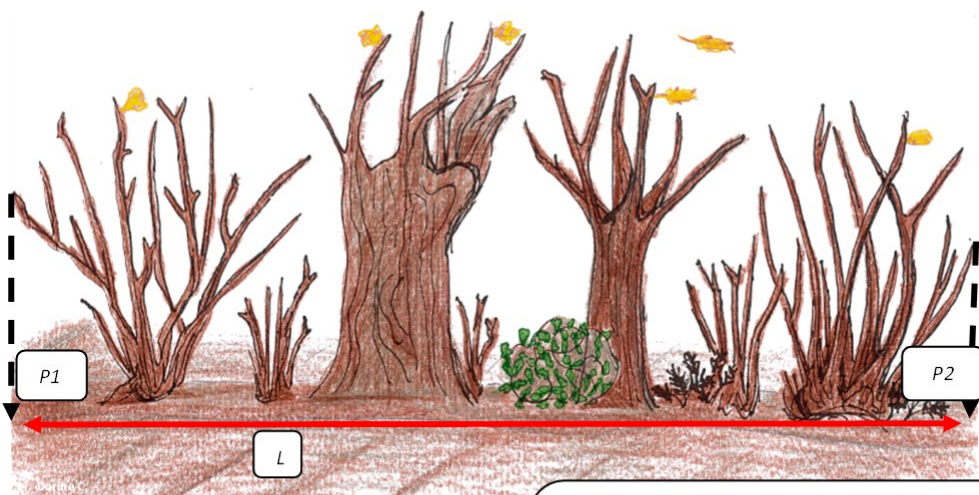
Deux passages sont nécessaires pour relever les données nécessaires :

- avant abattage ;
- pendant déchiquetage.

Afin que les données soient significatives et que le référentiel puisse à long terme être alimenté par davantage de données, un protocole a été élaboré. Il s'agit d'un document précisant les types de haies à échantillonner, les données à récupérer et la manière de les relever. Il est annexé (annexe 1) au présent document ainsi que le tableau Excel (annexe 2) qui a permis de relever les données.

Les principales données qui ont été collectées sont :

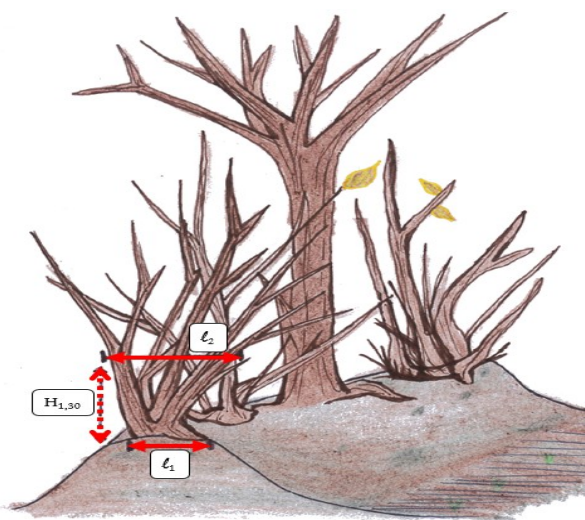
- Informations générales de localisation, situation, type de haies et gestion appliquée
- Longueur de la haie
- Hauteur moyenne de la haie
- Largeur moyenne au sol ou à la tête de chat pour les têtards de la haie
- Largeur moyenne de la haie à 1.30 m
- Largeur moyenne de la haie au houppier
- Age moyen de la haie
- Volume de bois produits
- Taux d'humidité



P1 : Projection au sol de l'extrémité externe du houppier de l'extrémité 1 de la haie

P2 : Projection au sol de l'extrémité externe du houppier de l'extrémité 2 de la haie

L : Longueur de la haie



H_{1,30} Hauteur à laquelle doit s'effectuer la mesure de l_2 , c'est-à-dire à 1,30m du niveau du sol où la cépée / l'arbre est.

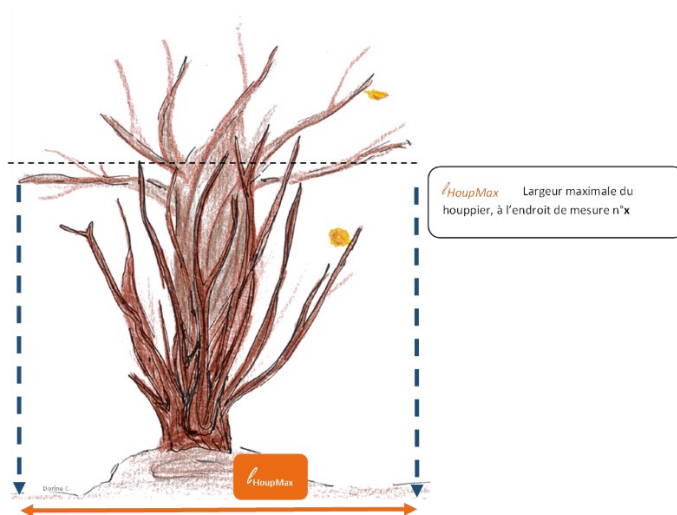


Figure 2 : schémas des principales données à mesurer sur le terrain (se référer au protocole en annexe 1)

Stockage des données

L'ensemble des données collectées a été cumulé aux précédentes campagnes de mesures faite en 2020 et 2021 pour obtenir une seule base basculée en format Excel. Il est en effet plus facile aux opérateurs de compléter un fichier Excel que Access.

Analyse de données

Le logiciel analytique utilisé est R-Studio. Différents types d'analyses ont été réalisées, afin de décrire et établir les liens entre deux variables, et modéliser les liens entre plusieurs d'entre elles. Il a été réalisé des analyses générales sur l'ensembles des haies. Puis, afin d'explorer des corrélations possibles, des analyses exploratoires ont été réalisées, d'abord entre variables deux à deux, puis entre des groupes de variables par la recherche de modèles de régression.

3.2. Echantillonnage

3.2.1. Types de haies

Les objets d'étude sont des haies bocagères. Les haies ornementales ne sont donc pas intégrées à cette étude, puisqu'elles relèvent de composition floristique, d'usages et de gestions trop éloignés des haies bocagères. Pour le choix des haies à mesurer, plusieurs indicateurs, résumés dans le tableau suivant, ont été analysés avant la prise de données (Tableau 4).

Tableau 4 : Indicateurs et caractéristiques pour le choix des haies à mesurer

Indicateurs terrain	Caractéristiques spécifiques	Remarques
Propriété	La haie est de préférence intraparcellaire.	A minima, elle se situe dans au sein d'une seule exploitation.
Intervention	La haie est exploitée (recépage étêtage) au cours de la saison hivernale 2023-2024.	Important : les haies mesurées sont des haies intégrées à un cycle de gestion et donc non dégradées par des outils mécaniques d'entretien d'emprise.
Typologie	La haie est de type simple. Autrement dit, sa typologie figure dans la liste suivante : - Taillis simple de Cépées d'arbustes ; - Taillis simple de Cépées d'arbres ; - Taillis fureté de Hêtres ; - Taillis mixte de Cépées d'arbres et d'arbustes ; - Alignement de têtards ; - Taillis sous futaie de Têtards et cépées d'arbustes ; - Taillis sous futaie de Têtards et cépées d'arbres.	Les typologies utilisées sont définies dans le Référentiel National de Typologie des Haies.
Longueur	La haie a une longueur d'au minimum 100 mètres linéaires.	Si sa morphologie et sa composition floristique sont homogènes, une haie de longueur comprise entre 80 et 100 mètres linéaires peut être référencée.

3.2.2. Localisations

Les données ont été obtenues dans des zones pédoclimatiques différentes. Les références proviennent de 3 régions métropolitaines : la Normandie, les Hauts-de-France, les Pays de la Loire.

Plus précisément, les références se situent sur les territoires plus homogènes en termes de conditions pédoclimatiques. Il s'agit de :

- L'Ouest du département de l'Orne pour la SCIC BBE
- Le Nord du département de l'Aisne et le Sud du département du Nord pour l'AAAT
- La Mayenne pour la SCIC Mayenne Bois Energie

En cumulant les données du programme précédent, en tout, ce sont 129 haies qui sont enregistrées dans la base de données :

38 pour l'Orne pour la SCIC BBE (3 haies mesurées en 2023/2024)

71 pour le département de l'Aisne le département du Nord pour l'AAAT (19 haies mesurées en 2023/2024)

17 pour la Mayenne pour la SCIC Mayenne Bois Energie (9 haies mesurées en 2023/2024)

3 pour le département de la Nièvre et l'Yonne pour la SRPM (aucune haie supplémentaire mesurées)

Une estimation des coûts a été actualisée pour l'application du protocole, du contact avec l'exploitant jusqu'à la saisie des données (Tableau 5). Ainsi, il est estimé en moyenne un peu moins de 2 jours de travail pour la mesure d'une haie pour l'équivalent d'un ETP ou 1 jour à 2 personnes. En effet, l'application du protocole est simplifiée lors de la prise des mesures en étant à deux opérateurs. Le temps des tableaux ci-dessous, cumule les heures passées à deux personnes. Dans le cadre d'une valorisation de cette méthode pour un référentiel France entière, il n'est pas nécessaire d'avoir un deuxième passage ni un suivi de chantier de déchiquetage. Au temps de mesure du premier passage, il sera nécessaire d'ajouter l'estimation de l'âge de la haie par comptage des cernes sur quelques brins prélevés.

Tableau 5 : Synthèse du temps passé pour la mesure et la saisie d'une haie – exemple de l'AAAT et MBE

AAT	Contacts	Premier passage	Deuxième passage	Déchiquetage	Etuve*	Suivi exploitants	Données	TOTAL
Temps total (h)	8	49	88	33	3	5	43	229
Nombre de haies concernées	19	19	17	16	12	17	17	117
Temps moyen par haie (h)	0,4	2,6	5,2	2,1	0,3	0,3	2,5	13,3

* (préparation pour envoi uniquement)

MBE 53	Contacts	Premier passage	Deuxième passage	Déchiquetage	Etuve**	Suivi exploitants	Données	TOTAL
Temps total (h)	4,5	40,5	31,5	9	9		18	112,5
Nombre de haies concernées	9	9	9	9	9	9	9	63
Temps moyen par haie (h)	0,5	4,5	3,5	1,0	1,0	0,0	2,0	12,5

** (protocole étuve complet)

Les analyses globales ont été réalisées sur l'ensemble de ces données. Cependant, pour la recherche de modèles, l'analyse statistique a été réalisée sur des haies dont la typologie étaient soit seulement composée de cépées d'arbres ou d'arbustes soit en intégrant des têtards. En effet, nous avons fait le choix d'analyser dans un premier temps ces typologies pour lesquelles une méthode de cubage très simplifiée (tout en étant suffisamment robuste au vu des données disponibles statistiquement représentatives) peut être identifiée.

Le premier modèle sur les haies de typologies cépées basses (cépées d'arbustes, cépées d'arbres, cépées d'arbres et d'arbustes et taillis fureté de hêtre) est réalisé sur 35 haies. Le deuxième est réalisé sur les mêmes typologies mais en rajoutant les typologies de têtards seuls et les typologies mixtes têtards et cépées basses. Il contient 53 haies.

4. Résultats

4.1. Caractérisation générale de l'échantillon de haies - y compris « gabarit des haies hauteur, largeur... »

L'ensemble de ces données permet d'obtenir des données descriptives de haies en fonction de leur typologie et de leur localisation géographique.

Pour toute la suite, les unités utilisées sont les suivantes :

- mhumide = masse humide dont l'unité de mesure est la tonne de bois déchiqueté humide
- manhydre = masse anhydre dont l'unité est la tonne de bois déchiqueté à 0 % d'humidité
- Volume = Volume de bois déchiqueté dont l'unité est en MAP (Mètre cube Apparent)

Ces données varient des autres études qui utilisent souvent la masse de bois déchiqueté sec (avec une humidité variable autour de 25 % d'humidité) et le volume de bois plein sur pied en m³. Il a été choisi de travailler sur les MAP et les tonnages car ce sont les unités de référence des opérateurs et qui sont fiables en termes de mesure de vérification récoltable facilement. Pour travailler sur le bois plein, il aurait été nécessaire de classer chaque partie des arbres comme sur la photo ci-dessous (Figure 3). Cela aurait nécessité un travail d'une ampleur énorme et beaucoup plus coûteux en termes de temps de travail et d'organisation.



Figure 3 : Chantier d'abattage de bois avec tri de chaque partie des arbres (source : L.Nevoux)

Caractérisation de gabarits de haies

Tout d'abord, on note qu'en fonction du lieu où on était mesuré les haies, des typologies reviennent majoritairement (Tableau 6). Dans l'Orne, ce sont principalement des haies de taillis bas qui ont été mesurées (cépées d'arbustes, d'arbres et mixte). Dans le Nord, ce sont principalement des haies intégrant des têtards qui sont présentes dans la base de données. Cela est dû au paysage caractéristique de ces deux zones et non à des choix de chantiers. En effet, ces typologies sont majoritaires dans chacune de ces deux régions de France. On retrouve peu de têtards dans l'ouest de l'Orne mais plus souvent des taillis bas. En Mayenne, il a été plus compliqué de trouver des haies de ces typologies. Ainsi, de nombreux taillis sous futaie ont été relevés. En Bourgogne, on ne relève pas une typologie dominante.

Tableau 6 : Résultats du nombre de haies par typologie et par région.

	4 Taillis simple, cépées d'arbustes	5 Taillis simple, cépées d'arbres	6 Taillis fureté de hêtres	8 Taillis mixte, cépées d'arbres et d'arbustes	9 Futaies régulières, hauts jets du même âge	11 Futaie régulière alignement de têtards	16 Taillis sous futaie, hauts jets avec cépées d'arbustes	17 Taillis sous futaie, hauts jets avec cépées d'arbres	18 Taillis sous futaie, hauts jets avec cépées d'arbres et d'arbustes	19 Taillis sous futaie, têtards avec cépées d'arbustes taillés sur les 3 faces	20 Taillis sous futaie, têtards avec cépées d'arbustes	21 Taillis sous futaie, têtards et cépées d'arbres	22 Taillis sous futaie, hauts jets avec têtards avec cépées d'arbres et d'arbustes
Orne	20	6	3	3	3	2	0	0	1	0	0	0	0
Bourgogne	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0
Mayenne	0	3	0	7	0	0	0	0	5	0	0	1	1
Nord	1	0	0	9	0	10	1	0	14	8	20	0	8

Les données permettent également d'obtenir des gabarits de haies en fonction de leur typologie (Tableau 7). Ces gabarits sont obtenus par des mesures sur 126 références (en effet, nous avons retiré les haies de futaies seules ; celles-ci étant compliquées à mesurer et cuber du fait d'une grande incertitude, lors de la coupe, des arbres exploités ou laissés sur pied).

La hauteur moyenne des cépées d'arbustes est de 7,5 mètres pour une largeur au sol légèrement inférieure à 1 mètre et une largeur au houppier proche de 7 mètres. Pour les cépées d'arbres, on obtient des valeurs de hauteurs de 10 mètres, des largeurs au sol d'un peu plus de 1 mètre et des largeurs au houppier d'environ de presque 8 mètres. Pour les taillis mixtes, les dimensions moyennes sont un peu supérieures à celles des cépées d'arbres.

En présence de têtards, les hauteurs moyennes sont situées autour de 13 mètres pour des largeurs au houppier de 9 mètres. Pour les haies de taillis sous futaie, hauts jets d'arbres et d'arbustes (18), les dimensions mesurées sont proches de celles des cépées d'arbres.

Pour les autres typologies, les estimations ne peuvent être retenues comme des références définitives car trop peu de données ont été relevées.

Tableau 7 : Résultats des gabarits des taillis ou des têtards des haies en fonction de leur typologie.

	4 Taillis simple, cépées d'arbustes	5 Taillis simple, cépées d'arbres	6 Taillis fureté de hêtres	8 Taillis mixte, cépées d'arbres et d'arbustes	11 Futaie régulière alignement de têtards	16 Taillis sous futaie, hauts jets avec cépées d'arbustes	17 Taillis sous futaie, hauts jets avec cépées d'arbres	18 Taillis sous futaie, hauts jets avec cépées d'arbres et d'arbustes	19 Taillis sous futaie, têtards avec cépées d'arbustes taillés sur les 3 faces	20 Taillis sous futaie, têtards avec cépées d'arbustes	21 Taillis sous futaie, têtards et cépées d'arbres	22 Taillis sous futaie, hauts jets avec têtards avec cépées d'arbres et d'arbustes
Hauteur moyenne	7,52	10,04	11,09	11,48	13,18	5,65	12	11,37	13,12	12,44	8,04	13,83
Hauteur médiane	7,23	9,7	12,28	10,75	12,86	5,65	12	10,85	12,72	12,4	8,04	13,67
Larg_sol_moy	0,93	1,46	1,51	1,1	1,13	1,63	1,4	1,24	0,92	1,04	1,21	1,01
Larg_sol médiane	0,74	1,17	1,2	1,06	1,2	1,63	1,4	0,8	0,88	0,82	1,21	0,97
Larg_houp_moy	7,1	7,71	7,95	7,87	9,92	6,72	8,8	7,55	10,48	9,2	5,9	10,36
Larg_houp médiane	6,64	7,66	8,8	7	10,61	6,72	8,8	7,02	10,66	9,3	5,9	10,25

Caractérisation de la productivité des haies

Enfin, ces données permettent des estimations sur la productivité des haies en fonction de leur typologie et leur localisation géographique. Pour cela, il a été calculé le tonnage de bois recueillis sur la haie lors de l'exploitation (en tonne humide) ramené à 100 mètre linéaire de haie. L'ensemble de ces calculs a été réalisé sur un échantillon de 91 haies.

Par ces données, on obtient **qu'en moyenne sur les sites de références de l'étude, les haies produisent 21.61 tonnes de plaquettes humides.**

Ces données permettent également de détailler cette productivité et d'obtenir une estimation de la biomasse produite par les haies en fonction de leur typologie (Tableau 8). **On note donc que 100 mètres de cépées d'arbustes produit en moyenne 15 tonnes de plaquettes vertes alors que 100 mètres de cépées d'arbres en produisent plus du double (38 tonnes).** Cependant, les médianes sont assez éloignées des moyennes. Cela peut être dû au fait d'essences différentes ou de cycles de productions différents créant des valeurs plus grandes.

Les données sont plus élevées que les résultats de l'étude précédente. Les mesures s'appuyant sur les chantiers des exploitants, une forte variabilité de maturité des haies peuvent expliquer ces différences.

Tableau 8 : Productivités moyennes et médianes des haies en bois déchiqueté en tonne humide pour 100 ml en fonction de leur typologie.

	Taillis simple, cépées d'arbustes	Taillis simple, cépées d'arbres	Taillis simple, fureté de Hêtres	Taillis mixte, cépées d'arbres et d'arbustes	Futaie régulière, hauts jets de même âge	Futaie régulière, alignement de têtards	Taillis sous futaie, hauts jets avec cépées d'arbustes	Taillis sous futaie, hauts jets avec cépées d'arbres	Taillis sous futaie, hauts jets avec cépées d'arbustes	Taillis sous futaie, têtards avec cépées d'arbustes taillés sur les 3 faces	Taillis sous futaie, têtards et cépées d'arbustes	Taillis sous futaie, têtards et cépées d'arbres	Taillis sous futaie, hauts jets avec têtards et cépées d'arbres et d'arbustes
masse humide moyenne pour 100 ml	15,74	38,00	16,40	16,45	27,37	17,53	19,37	129,20	22,99	25,79	23,68	7,74	19,38
masse humide médiane pour 100 ml	12,40	27,97	16,40	10,04	27,37	16,19	19,37	129,20	17,30	20,01	19,32	7,74	13,39

Enfin, on a observé la productivité des haies en fonction de la zone géographique étudiée (Tableau 9).

Tableau 9 : Productivités moyennes et médianes pour 100 ml de haie en fonction de la région.

	Orne	Mayenne	Bourgogne	Nord
Nombre de haies	22	17	3	52
Masse humide moyenne (en tonne) pour 100 ml de haie	20.45	24.51	10.94	21.16
Masse humide médiane (en tonne) pour 100 ml de haie	14.10	18.12	5.07	17.32

On observe des rendements qui sont assez proches entre la Mayenne, l'Orne et Le Nord avec l'échantillon complété par rapport à l'étude précédente.

Cependant, si cette comparaison permet d'avoir des informations intéressantes sur les productivités moyennes des haies en fonction des régions, pour construire un référentiel fiable qui s'affranchit du moment de la coupe dans le cycle de croissance, il est mieux de fournir les référentiels sur la base des accroissements annuels (Tableau 10). En effet, on part du postulat que toutes les haies de France peuvent atteindre de tels rendements. Ce qui varie est le temps qu'elles mettent pour atteindre ce potentiel. C'est pourquoi l'âge des brins des cépées a été relevé dans le protocole, permettant d'obtenir l'âge moyen de la cépée, puis l'âge moyen de la haie. Nous avons donc calculé la quantité de plaquettes humides produites pour 100 mètres de haies en un an. L'analyse suivante a été réalisée sur 56 haies car tous les âges n'ont pas été récupérés lors des mesures terrain.

Tableau 10 : Productivité annuel en bois déchiqueté en tonne humide pour 100 ml en fonction de la région.

	Orne	Mayenne	Nord
Nombre de haies	16	14	26
Accroissement annuel moyen en tonne humide pour 100 ml de haie	1.06	1.07	1.07
Accroissement annuel médian en tonne humide pour 100 ml de haie	1	1.02	0.96

Les données 24/25 confirme que l'accroissement annuel en moyenne est proche de 1 t /an et équivalente dans les trois régions de l'Ouest.

Ces données peuvent servir de références en adaptant la productivité au cycle de gestion de chaque région.

On observe cependant, sur la figure 7, que les points sont assez étendus autour de la moyenne allant de 0,4 t de bois par an pour 100 m de haie à 2.1 t (Figure 7).

Hypothèse : D'autres facteurs entrent en compte dans l'accroissement comme, par exemple, la situation pédo-climatique (cf partie 3)., les essences des arbres, ou des modalités de gestion antérieures.

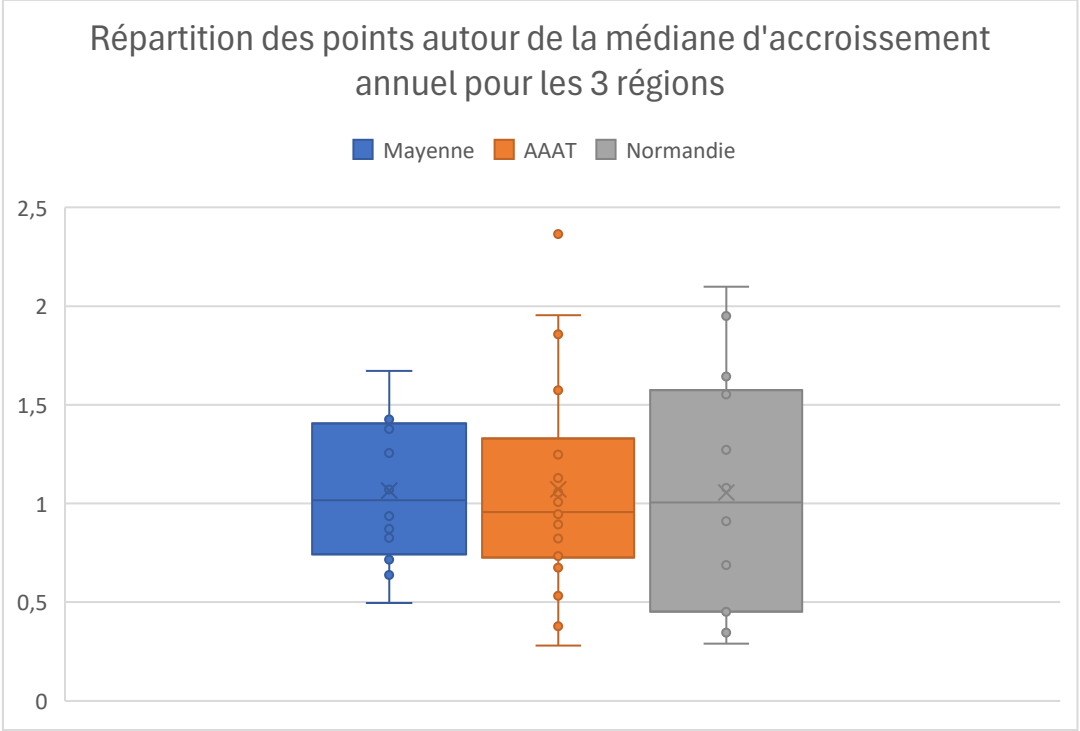


Figure 4 : Répartition des points autour de la médiane de l'accroissement annuel pour les 3 régions concernées.

Ces données correspondent à des données d'observation issues de mesures terrain. Ces résultats d'accroissements annuels peuvent être différenciés pour chaque typologie de haie (Tableau 11). Les résultats confirment les résultats précédents. Dans nos données, on observe que les taillis d'arbustes et d'arbres ont des accroissements proches. Ce qui va différencier les productions que l'on observe dans le tableau 8, c'est le cycle de gestion plus long pour les cépées d'arbres ou têtards que pour les arbustes.

Tableau 11 : Accroissements annuels moyens et médians en tonne humide pour 100 ml de haie (uniquement les cépées ou têtards) par typologie de haie.

	Taillis simple, cépées d'arbustes	Taillis simple, cépées d'arbres	Taillis simple, fureté de Hêtres	Taillis mixte, cépées d'arbres et d'arbustes	Futaie régulière, alignement de têtards	Taillis sous futaie, hauts jets avec cépées d'arbres et d'arbustes	Taillis sous futaie, têtards avec cépées d'arbustes taillés sur les 3 faces	Taillis sous futaie, têtards et cépées d'arbustes	Taillis sous futaie, têtards et cépées d'arbres	Taillis sous futaie, hauts jets avec têtards et cépées d'arbres et d'arbustes
Accroissement annuel moyen en tonne humide pour 100 ml de haie	1,10	1,22	0,45	0,94	1,02	1,25	0,81	1,12	0,96	1,20
Accroissement annuel médian en tonne humide pour 100 ml de haie	1,10	0,93	0,45	0,89	1,13	1,26	0,81	1,03	0,96	1,20

Pour la campagne 23/24, les opérateurs ont mesuré les cernes par tranche de 5 ans afin de pouvoir identifier le cycle de gestion à partir des courbes de croissance produites sur les cépées ou têtards des haies échantillonnées.

En Mayenne, les haies sont composées principalement de cépées d'arbres qui ont été exploitées entre 18 et 20 ans. Au vu des courbes (construites sur la moyenne d'accroissement d'échantillons de brins pris sur 6 haies différentes- Figure 8), l'exploitation se situe sur la période de début de diminution de la croissance des arbres dans les cas mesurés. La capacité de réaction à développer des rejets de souches est plus faible. La coupe pourrait avoir lieu plus tôt pour une optimisation de la productivité. Un cycle de gestion de 15 ans semble le plus adapté dans cette région. Ces informations demandent à être vérifiées sur d'autres mesures

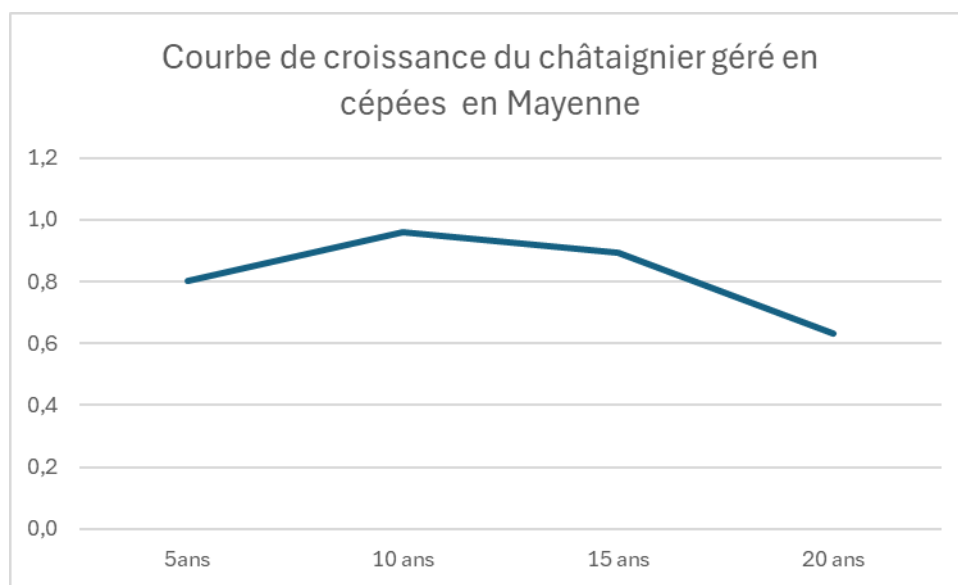


Figure 5 : Courbe de croissance des cépées de châtaignier en Mayenne

En Thiérache (Nord), les haies sont composées principalement de charmes en têtards qui ont été exploités entre 12 et 20 ans. Au vu des courbes (construites sur la moyenne d'accroissement d'échantillons de têtards pris sur 10 haies différentes- Figure 9 et 10), l'exploitation se situe bien après le début de la diminution de la croissance des arbres dans les cas mesurés. La coupe pourrait avoir lieu plus tôt pour une optimisation de la productivité. Un cycle de gestion de 10 ans semble le plus adapté dans cette région. La courbe construite pour les cépées de noisetiers montre la même tendance. Ces informations demandent à être vérifiées sur d'autres mesures.

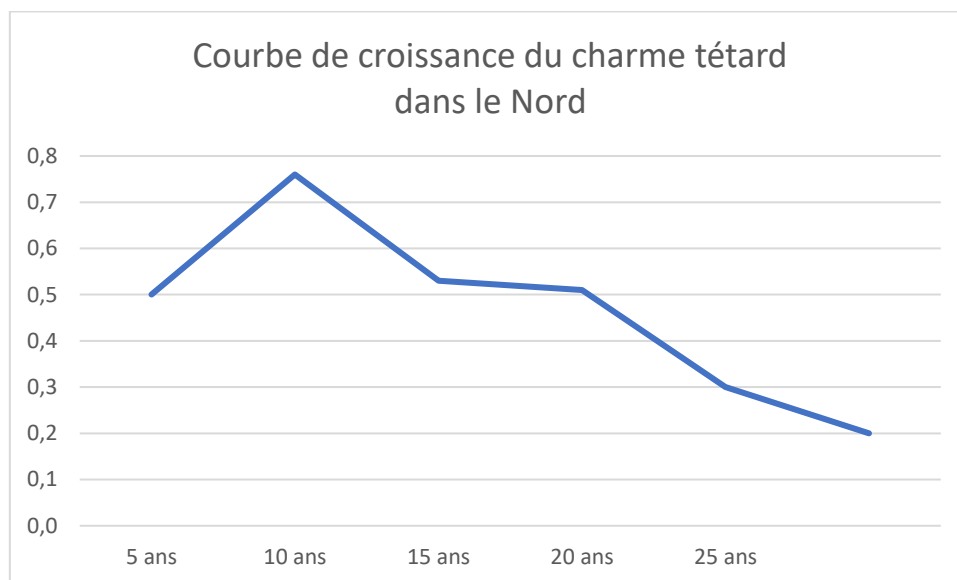


Figure 6 : : Courbe de croissance des têtards de charmes en Mayenne

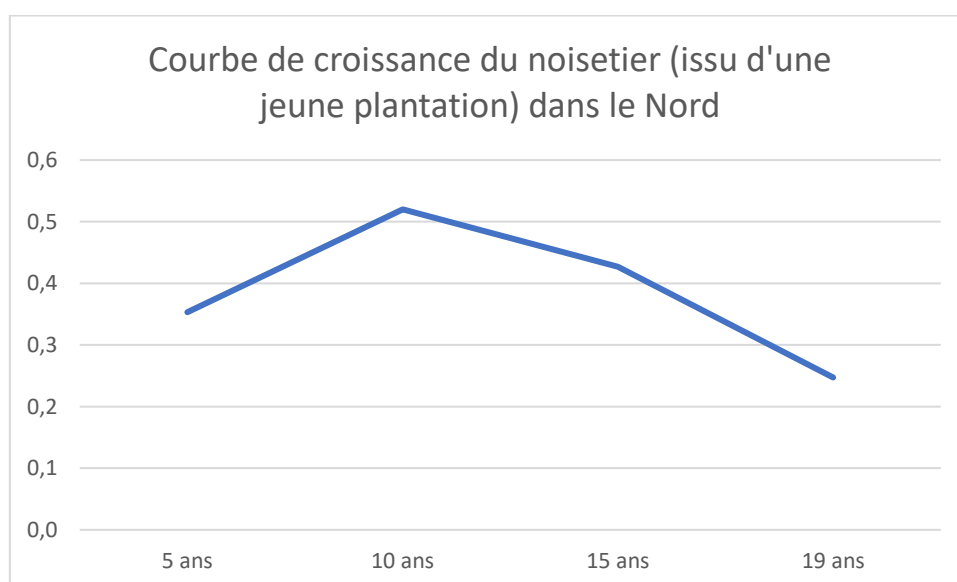


Figure 7 : Courbe de croissance des jeunes noisetiers dans le Nord

4.2. Modèles de cubage

Un des objectifs principaux de ce travail est principalement de conforter la méthode simplifiée de cubage produite dans le programme ADEME-Resp'haies (cf partie 1). Par la réalisation de modèles avec le logiciel de statistique R, on recherche des corrélations entre la masse humide obtenue du chantier, avec des données mesurées sur le terrain.

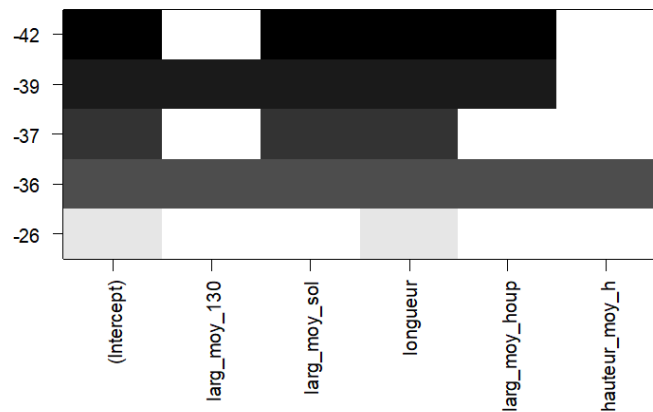
Pour ce modèle de cubage, on s'est concentré sur les typologies de haies correspondant à des taillis bas (cépées d'arbres et arbustes) et aux têtards considérés comme des taillis hauts. En effet, pour les têtards, on ne prend en compte que la masse du houppier. Dans la plupart des cas les troncs des têtards se creusent, ce qui présente un intérêt fort en termes de biodiversité, mais restent souvent sur pied et présentent peu de biomasse valorisable.

Par des analyses deux à deux et des analyses en composantes principales (ACP), nous avons déterminé que le plus pertinent pour décrire la masse humide était de partir de données de volume de la haie, en considérant la haie comme un parallélépipède. Nous cherchons à expliquer la masse humide produite par les variables suivantes : longueur, largeur

au sol, largeur à 1,3 m, hauteur, largeur du houppier, nombre de cépées. Ensuite, nous avons recherché les variables les plus explicatives de la masse humide. Nous avons étudié des corrélations linéaires. En effet, en appliquant des relations polynomiales ou logarithmiques, des modèles différents pourraient être trouvés. Cependant, l'objectif est d'obtenir une méthode simplifiée.

Nous avons construit un premier modèle en ne considérant que les haies de type cépées basses (incluant cépées d'arbustes, cépées d'arbres, cépées mixtes et taillis fureté de hêtre). Ce premier modèle est établi à partir des données de 35 haies. L'analyse de la figure 11 permet de comparer le niveau d'explication de chaque variable vis-à-vis de la masse humide et la significativité. On se base pour cela sur le critère BIC. Plus cette valeur est faible, plus la variable est explicative.

Figure 8 : Comparaison du niveau d'explication des variables par rapport à la masse humide par le critère BIC pour le modèle 1 des cépées basses.



Ainsi, pour cette première simulation, le modèle le plus pertinent est celui qui explique la masse humide par la largeur au sol de la haie, la longueur et la largeur du houppier. La p_value est inférieure à 0,05, le résultat est donc significatif au seuil de 95% (Tableau 12). On obtient un R² de 0,72. Cela signifie que le modèle explique 72 % des valeurs de masse humide. Ainsi, pour ce premier modèle incluant uniquement les cépées : on obtient la formule suivante :

***mhumide* = −20,20834 + 11,14637 × larg_{sol} + 0,11387 × longueur + 1,78373 × larg_{houp}**

Tableau 12 : Présentation du modèle de cubage trouvé avec les cépées basses.

Variable du modèle	Nombre de haies concernées	Variables significatives	P value	R²	Formule
Masse, larg_sol, long, larg_houp	35	Larg_sol, long, larg_moy_houp	2.253e-10	0.7189	Masse = -20,20834 + 11,14637 * larg sol + 0,11387 * long + 1,78373 * larg houp

Evaluation de la validité du modèle

Pour évaluer la validité d'un modèle, il est nécessaire d'observer les résidus.

Adaptation du modèle

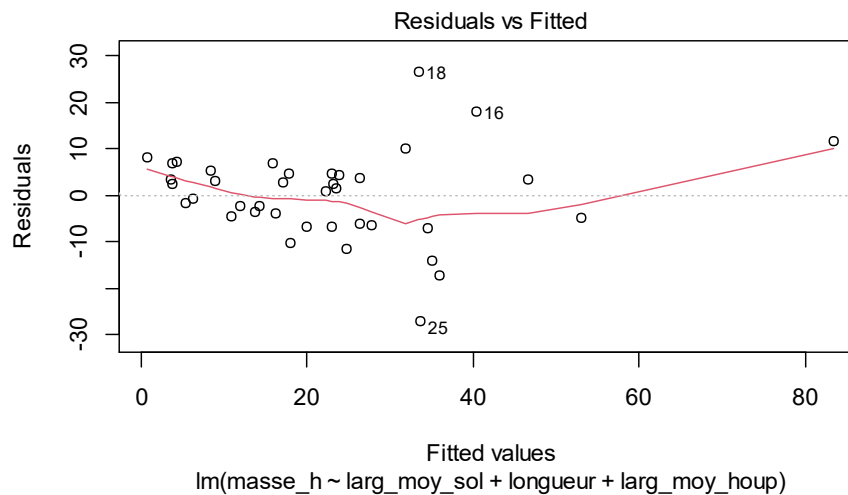


Figure 9 : Analyse de l'adaptation du modèle 1 avec les cépées basses.

On observe les écarts entre les valeurs prédites et observées. Un modèle peut être validé si les résidus sont répartis de manière homogène. Sur le graphique (Figure 12), cela signifie que la ligne rouge doit être le plus proche possible de l'horizontale, ce qui est le cas ici.

Indépendance des résidus

Il est également nécessaire de démontrer l'indépendance des résidus. Les résidus ne doivent pas être liés les uns aux autres. On ne doit pas pouvoir anticiper un résidu par la connaissance d'un autre résidu. On veut éviter les phénomènes d'auto-corrélation : les résidus augmenteraient ensemble dans une zone donnée et seraient liés les uns aux résidus précédents ou suivants.

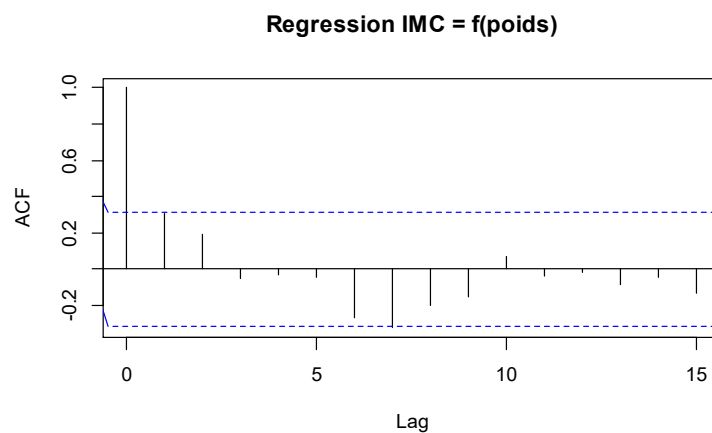


Figure 10 : Analyse de l'indépendance des résidus pour le modèle 1 des cépées basses.

Pour cela, on observe le graphique (Figure 13). Le premier bâtonnet est très élevé, c'est l'auto-corrélation des résidus avec eux-mêmes ! Le deuxième bâtonnet indique l'auto-corrélation entre les résidus et les résidus $n+1$: il y a **auto-corrélation dès que le bâtonnet (lag) dépasse les pointillés**. Le troisième bâtonnet entre les résidus n et les résidus $n+2$... etc. On observe dans ce cas-là que tous les résidus sont bien indépendants.

Normalité des résidus

Pour que la régression soit pertinente, il faut également que les résidus suivent une loi normale. Pour cela il est possible de réaliser un test de Shapiro (Figure 14).

Shapiro-Wilk normality test

```
data: residuals(MF3_H5)
W = 0.9657, p-value = 0.2747
```

Figure 11 : Test de Shapiro pour tester la normalité des résidus pour le modèle 1 des cépées basses.

On obtient une $p_value > 0,05$. On peut donc considérer la normalité des résidus au seuil de 95%.

Homogénéité des résidus

On observe enfin si les résidus sont homogènes. Pour cela, on observe le graphique (Figure 15).

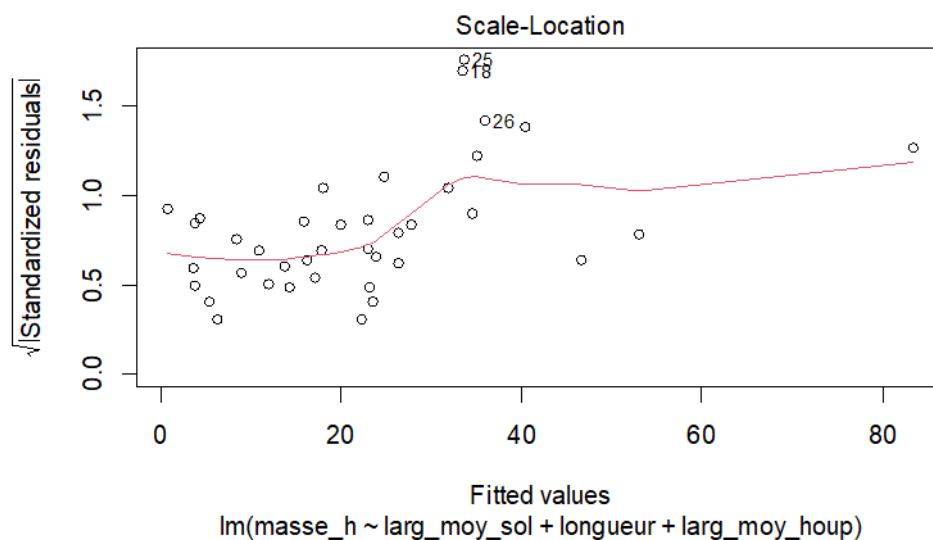


Figure 12 : Analyse de l'homogénéité des résidus pour le modèle 1 des cépées basses.

Pour qu'il y ait homogénéité, il faut que la courbe rouge soit la plus proche possible de l'horizontale. On observe que c'est tolérable ici, bien que cela pourrait être amélioré en ajustant le modèle.

Nous pouvons donc conclure que notre modèle est valide avec un bon niveau de validation.

Nous avons construit un second modèle en considérant les haies de type cépées basses (incluant cépées d'arbustes, cépées d'arbres, cépées mixtes et taillis fureté de hêtre) et les haies incluant les têtards (têtards seuls ou mixte têtards / cépées). Ce modèle comporte ainsi 53 haies. L'analyse de la figure 16 permet de comparer le niveau d'explication de chaque variable vis-à-vis de la masse humide et la significativité.

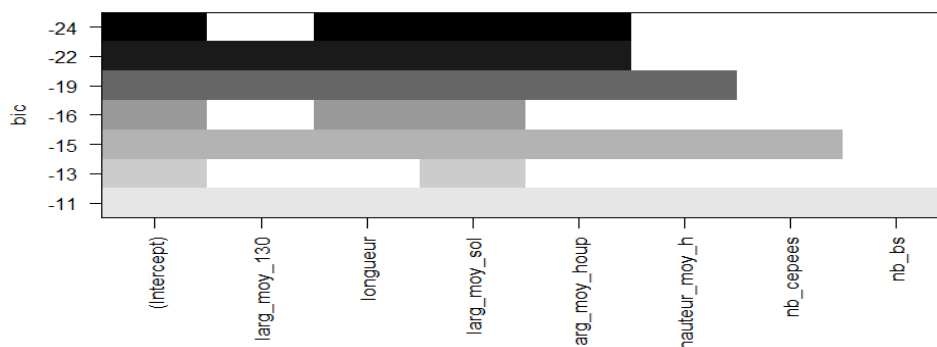


Figure 13 : Comparaison du niveau d'explication des variables par rapport à la masse humide par le critère BIC pour le modèle 3 des cépées basses et hautes.

Ainsi, pour cette seconde simulation, le modèle le plus pertinent est celui qui explique la masse humide par la largeur au sol de la haie, la longueur et la largeur au houppier. La p_value est inférieure à 0,05, le résultat est donc significatif au seuil de 95% (Tableau 13). On obtient un R² de 0,57. Cela signifie que le modèle explique 57 % des valeurs de masse humide. Il peut exister des modèles qui expliqueraient plus de données mais ils seraient moins significatifs statistiquement et plus complexe en intégrant plus de variables. L'objectif de ce travail étant d'obtenir une méthode simple de cubage et qui soit la plus pertinente statistiquement. Ainsi, pour ce deuxième modèle incluant les cépées et les têtards, on obtient la formule suivante :

$$mhumide = -15.40368 + 6.42139 \times larg_sol + 0,11995 \times longueur + 1,81987 \times larg_houppier$$

Tableau 13 : Présentation du modèle de cubage trouvé avec les cépées basses et hautes.

Variable du modèle	Nombre de haies concernées	Variables significatives	P value	R²	Formule
Masse, larg_sol, long, larg_houp	53	Larg_sol, long, larg_houp	1.566e-10	0.5745	Masse = -15,40368 + 6,42139 * larg sol + 0.11995* longueur + 1,81987 * larg houppier

Evaluation de la validité du modèle

Nous réalisons le même travail d'évaluation sur les résidus.

Adaptation du modèle

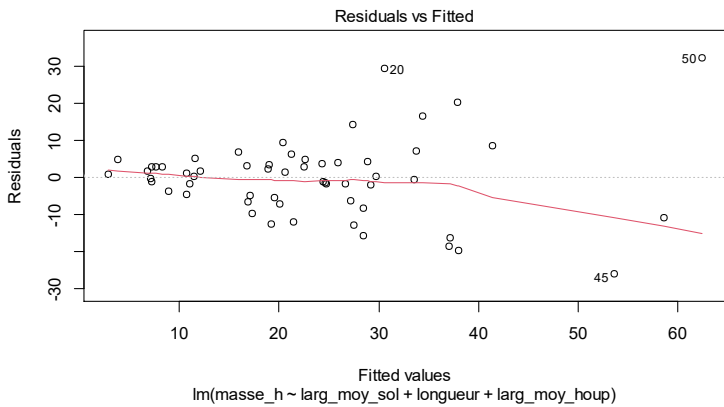


Figure 14 : Analyse de l'adaptation du modèle 2 avec les cépées basses et hautes.

On observe les écarts entre les valeurs prédites et observées. Un modèle peut être validé si les résidus sont répartis de manière homogène. Sur le graphique (Figure 17), cela signifie que la ligne rouge doit être le plus proche possible de l'horizontale, ce qui est le cas ici, à l'exception du dernier point. Comme nous avons un doute dans ce cas-là, il est possible de réaliser le test de Rainbow (Figure 18). Il y a adéquation du modèle de régression si la p-value est supérieure à 0,05.

Rainbow test

```
data: MF2_H5
Rain = 1.0403, df1 = 29, df2 = 24, p-value = 0.4649
```

Figure 15 : Test de Rainbow pour vérifier l'adéquation du modèle

C'est bien le cas ici. Il y a donc adéquation du modèle.

Indépendance des résidus

Il est également nécessaire de démontrer l'indépendance des résidus. Les résidus ne doivent pas être liés les uns aux autres. On ne doit pas pouvoir anticiper en résidu par la connaissance d'un autre résidu. On veut éviter les phénomènes d'auto-corrélation : les résidus augmenteraient ensemble dans une zone donnée et seraient liés les uns aux résidus précédents ou suivants.

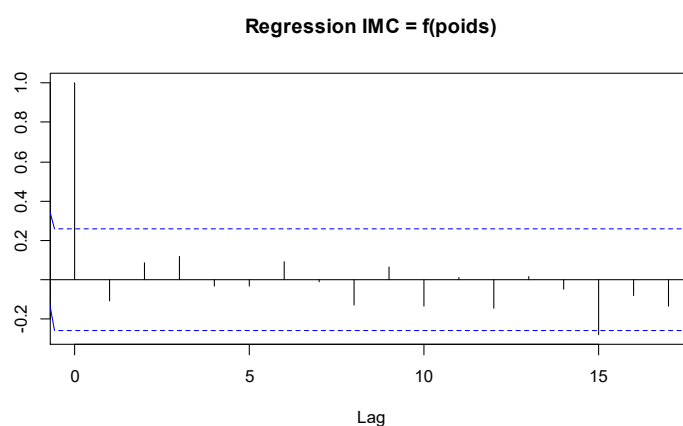


Figure 16 : Analyse de l'indépendance des résidus pour le modèle 2 des cépées basses et

Pour cela, on observe le graphique (Figure 19). Le premier bâtonnet est très élevé, c'est l'autocorrélation des résidus avec eux-mêmes ! Le deuxième bâtonnet indique l'auto-corrélation entre les résidus et les résidus $n+1$: il y a **auto-corrélation dès que le bâtonnet (lag) dépasse les pointillés**. Le troisième bâtonnet entre les résidus n et les résidus $n+2$... etc. On observe dans ce cas-là que tous les résidus sont bien indépendants sauf le troisième. Ce faible écart reste tolérable. Cependant, il est possible de réaliser le test de Durbin-Watson pour le vérifier (Figure 20). Il faut **une p-value supérieure à 0,05** pour avoir indépendance.

Durbin-Watson test

```
data: MF2_H5
DW = 2.1435, p-value = 0.6941
alternative hypothesis: true autocorrelation is greater than 0
```

Figure 17 : Test de Durbin-Watson pour tester l'indépendance des résidus du modèle.

C'est le cas ici. Il y a bien indépendance des résidus.

Normalité des résidus

Pour que la régression soit pertinente, il faut également que les résidus suivent une loi normale. Pour cela il est possible de réaliser un test de Shapiro (Figure 21).

Shapiro-wilk normality test

```
data: residuals(MF2_H5)
W = 0.9459, p-value = 0.01287
```

Figure 18 : Test de Shapiro pour tester la normalité des résidus pour le modèle 2 des cépées basses et hautes.

On obtient une p_value inférieure à 0,05. Ce résultat est donc acceptable.

Homogénéité des résidus

On observe enfin si les résidus sont homogènes. Pour cela, on observe le graphique 22.

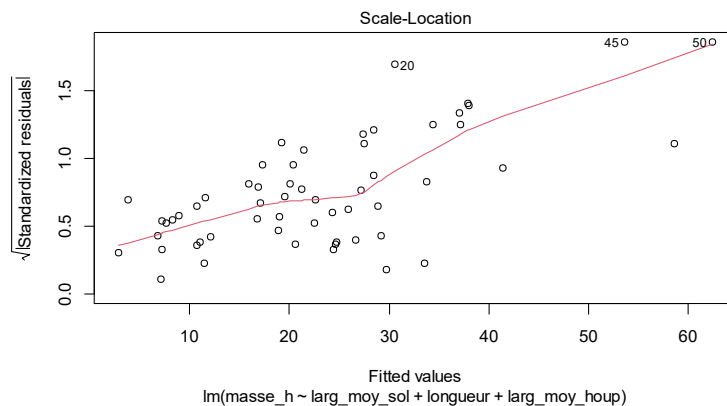


Figure 19 : Analyse de l'homogénéité des résidus pour le modèle 2 des cépées basses et hautes

Pour qu'il y ait homogénéité, il faut que la courbe rouge soit la plus proche possible de l'horizontale. On observe que cette différence de 1,5 est tolérable ici, bien que cela pourrait être amélioré en ajustant encore le modèle si on pouvait séparer les têtards des cépées.

Nous pouvons donc conclure que notre modèle est valide et s'est amélioré, mais nécessiterait encore des ajustements. Idéalement avec plus de données il serait possible de séparer les têtards des cépées.

Nous avons finalement obtenu deux modèles. Un premier qui ne comprenait que les taillis bas et le deuxième incluant les taillis bas et les têtards.

Conditions d'utilisation du modèle biomasse

Les modèles ayant été établis à partir des données réelles de terrain pour lesquels il a été cherché des corrélations, les résultats obtenus par leur utilisation seront le plus fiables en se rapprochant le plus possible des conditions des mesures ayant servi à les établir, c'est-à-dire sur un tronçon de plus ou moins 100 m, et avec un état de haies sans dégradation latérale.

5.- Suites et perspectives

Avec ce nouveau jeu de données d'une 30taines de haies mesurées durant l'hiver 23/24, les modèles de cubage pour les taillis d'arbres, d'arbres et les têtards sont suffisamment confortés avec des indicateurs simples à mesurer : largeur au sol, largeur du houppier et longueur des haies.

Ces outils peuvent permettre d'estimer des productions de chantier. Ils peuvent donc être valorisés dans les filières de valorisation du bois des haies par les gestionnaires des haies.

Ces modèles simplifiés peuvent aussi permettre de produire un référentiel de productivité des haies par grandes régions pédoclimatiques sans avoir besoin de mettre en œuvre des chantiers d'exploitations complètes des haies. Aux indicateurs des modèles, il faut couper quelques brins des cépées pour identifier l'âge moyen de la haie afin de définir l'accroissement annuel des types de haies.

Un travail préalable à la construction de ce référentiel est à poursuivre autour d'une méthode simplifiée de cubage des arbres de hauts jets. En effet en associant ces différentes approches, il sera possible de mesurer tous les types de haies combinant des formes d'arbres différentes.

Ce projet est engagé dans une nouvelle étude soutenue par l'ADEME. Les résultats sont programmés pour 2026 suite à des mesures d'arbres réalisés durant les hivers 24/25 et 25/26. L'étude est réalisée en partenariat entre l'Afac-Agroforesteries et l'École nationale des sciences géographiques (ENSG-Géomatique).

6.- ANNEXES

6.1. Annexe 1 - Protocole de mesures des haies



Mémento terrain d'aide à l'application méthodologique des récoltes de données terrains

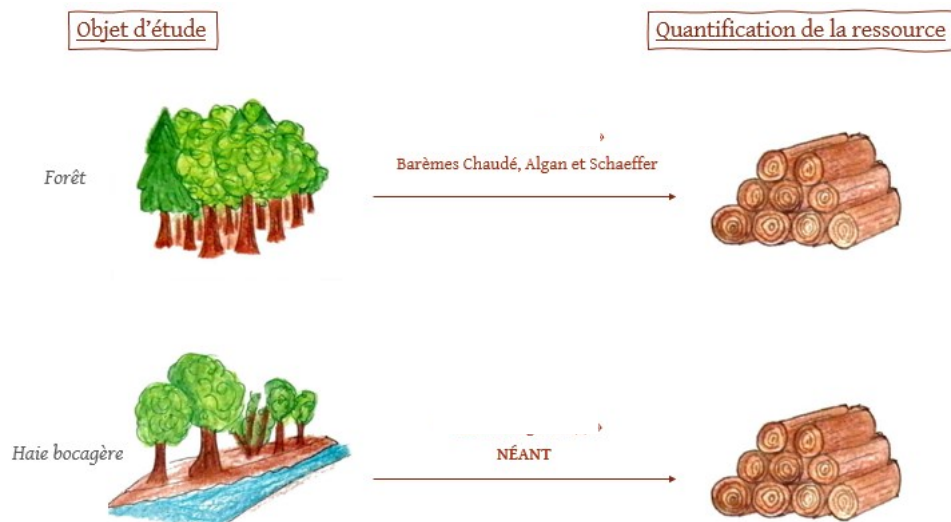
*D'après Évaluation des stocks et flux de biomasse et de carbone des haies - Tests
méthodologiques et premières références dans 4 régions de France,
octobre 2022 – projet Resp'haies -ADEME*

Typologies de Taillis simple ou mixte (y compris les têtards)



Contexte

Dans le cadre du projet de RESilience et Performances des exploitations agricoles liées aux HAIES dit RESP'HAIES, et de celui Biomasse-Carbone financé par l'ADEME, une continuité des études précédentes se met en place. Il s'agit toujours de « caractériser les haies en tant que ressources territoriales en élaborant un référentiel national de productivité et de cubage des haies [...] », en affinant les travaux réalisés en saison 2020-2021. L'obtention de données brutes reste nécessaire.



Les données recueillies et agrégées les deux saisons dernières ont permis d'établir un modèle d'estimation visuelle de la biomasse d'une haie. Néanmoins, il est nécessaire d'avoir plus de données pour conforter le modèle. Cette saison, l'objectif est donc de compléter notre jeu de données avec de nouvelles haies de référence.

Le mémento d'aide à l'application du protocole a été modifié selon les retours d'expérience terrain de la saison précédente. Ce document a pour but d'indiquer une trame à suivre pour mesurer et apprécier au mieux les éléments bocagers, de manière homogène dans tous les territoires d'étude.

Sommaire

Informations préliminaires	p.3
1 ^{er} passage : Avant abattage	p.5
2 ^{ème} et 3 ^{ème} passages : Après abattage et pendant déchetage	p.10

Les **variables** sont appréciées à une certaine échelle. Soit à celle (*code couleur utilisé dans le document*) :

- De l'**Individu** (seuil arbitraire : au minimum **1 cépée tous les 25 mètres linéaires**) ;
- De la **Haie** ;
- Du **Lieu de localisation** ;
- De l'**Abattage** ;
- Du **Chantier d'exploitation**.

Informations préliminaires

∴ Localisation géographique de la haie

- ∴ Se référencer au numéro de haie de l'IGN en corrigeant la couche source si nécessaire comme dans l'outil PGDH. L'outil développé sur QGIS vient s'accrocher la couche de l'IGN.

Identification du chantier

- ∴ Numéro de la haie du PGDH s'il y a
- ∴ Auteur et structure affiliée
- ∴ Année (saison végétative)
- ∴ Nom du gestionnaire de la haie
- ∴ Numéro de téléphone
- ∴ Localisation de la zone d'étude et/ou adresse du propriétaire
- ∴ Code postal et Commune

- ∴ **Topographie** Regarder en fonction des ruptures géographiques sur le terrain, si la haie est :

- Sur plateau/ en haut de versant / sommet ;
- Sur un versant ;
- En fond de vallon.

- ∴ **Pente** A l'aide de l'outil *profil altimétrique de Géoportail*, relever la valeur de la pente en pourcentage :

- <7% : « pente peu significative »
- ≥7% : « pente significative » (noter alors sa valeur).

- ∴ **Orientation par rapport à la pente** Indiquer si la haie se situe **parallèlement**, **perpendiculairement**, ou **en travers** de la pente.

PAR	Parallèle à la pente
OB	Oblique par rapport à la pente
PER	Perpendiculaire à la pente
SO	pas de pente

∴ Interface

- ∴ En se référant au référentiel PGDH, indiquer si la haie se situe au niveau d'une :

PPIR	Parcelle / Parcelle interparcellaire
BPI	Parcelle / Parcelle, intraparcellaire les 2 parcelles étant gérées par le même exploitant
BBO	Parcelle / Bois
PVE	Parcelle / Verger et pré-verger
BP	Parcelle / parcelle enfrichée
BVR	Parcelle / voirie Route

BVC	Parcelle / voirie Chemin
BEAU	Parcelle / cours d'eau
BBA	Parcelle / Bâti
PSNC	Parcelle/ligne SNCF
VV	Voirie / Voirie
VE	Voirie / Eau
VBO	Voirie / Bois
BABO	Bâti / Bois
BAV	Bâti / Voirie
BABA	Bâti / Bâti

∴ **Assolement parcelle 1**

Il sera indiqué la culture bordant la parcelle 1

∴ **Assolement parcelle 2**

si agricole sinon autre interface

∴ **Nature du sol**

Indiquer la **profondeur** du sol

- Sol superficiel (<20 cm) ;
- Sol peu profond (40 à 80 cm) ;
- Sol profond (>80 cm).

Et le **taux d'hydromorphie**:

- Hydromorphie absente ;
- Hydromorphie temporaire ;
- Hydromorphie permanente.

∴ **Exposition au vent** Indiquer les **vents d'exposition latérale** à la haie :

- Nord / Sud ;
- Ouest /Est ;
- Nord-Ouest / Sud-Est ;
- Nord-Est / Sud-Ouest.

∴ **Forme du linéaire**

Décrire la **forme du linéaire** de la haie :

- Droit ;
- Courbé ;
- Sinueux ;
- Brisé.

∴ **Position au sol**

∴ En se référant au référentiel PGDH, indiquer la position de la haie au sol :

CR	Creux
HP	haie à plat
BI	Billon (< 30 cm - l < 1 m)
TMB	Talus Marche bas (0,30 m < h < 0,75 m)
TMH	talus marche haut (h > 0,75 m)
TB	talus bas (0,3 m < h < 0,75 m * l < 1 m)
TH	talus haut (h > 0,75 m * l > 1 m)

∴ **Typologie de la haie** Cf Référentiel National de Typologie des Haies

31	cépées d'arbustes
32	cépées d'arbres
42	cépées d'arbres et d'arbustes
53	alignements de têtards
62	hauts jets avec têtards
72	hauts jets avec cépées d'arbustes
73	hauts jets avec cépées d'arbres
74	hauts jets avec cépées d'arbres et d'arbustes
75	têtards avec cépées d'arbustes et d'arbres taillées sur les trois faces
76	têtards et cépées d'arbustes
77	têtards et cépées d'arbres
78	têtards avec cépées d'arbustes et d'arbres
79	hauts jets et têtards avec cépées d'arbres et d'arbustes

∴ **Dernière exploitation en date** (hors exploitation au temps t) en nombre d'année

∴ **Productivité des essences** (Vus les typologies et les critères concernant la conduite des haies, les références sont composées d'essences *par défaut* productives ; dans ce cas, noter RAS. Néanmoins, si la productivité de la haie semble anormale, il convient de le noter :

∴

Croissance plus faible que la moyenne
entretien d'emprise 1 côté
entretien d'emprise 2 côtés
abrouissement

Pré-requis : si un outil d'entretien a été passé, il ne faut pas que son passage ait engendré d'impacts volumétriques. Si tel est le cas, il n'est pas nécessaire de poursuivre les relevés, la haie ne sera pas une bonne référence.

1^{er} passage : Avant abattage

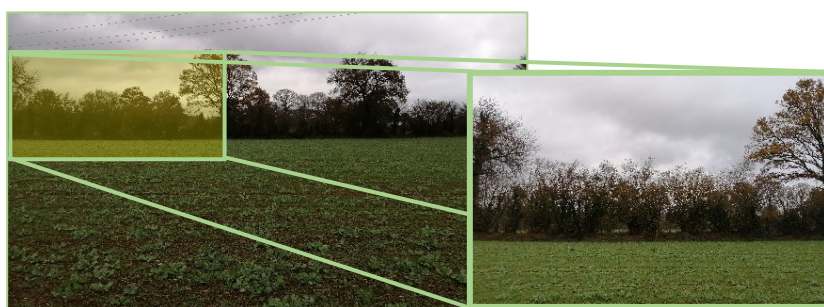
∴ **Date du jour de relevés**

∴ **Photos de face¹**

Prendre une photo face à la haie (i.e. sur sa longueur), au mieux dans son entièreté, sinon représentative de l'ensemble. **bien numéroté**

∴ **Photos latérales¹**

Prendre une photo latéralement à la haie (i.e. sur sa largeur), au mieux dans son entièreté, sinon représentative de l'ensemble. **bien numéroté**



¹ Selon la configuration de terrain, le protocole peut ne pas s'appliquer. Notifier le schéma s'identifiant le plus au visuel.

∴ **Longueur de haie**

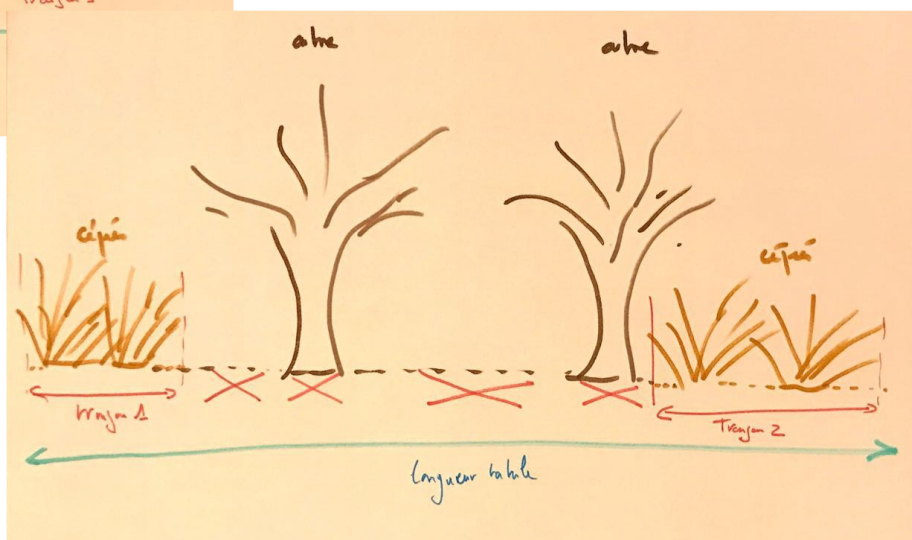
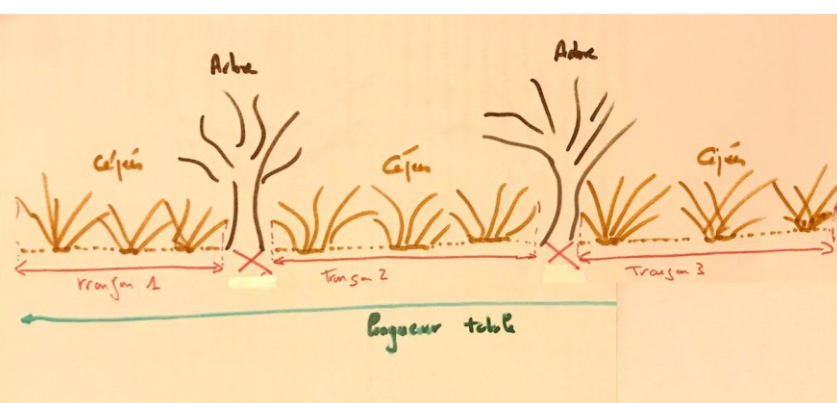
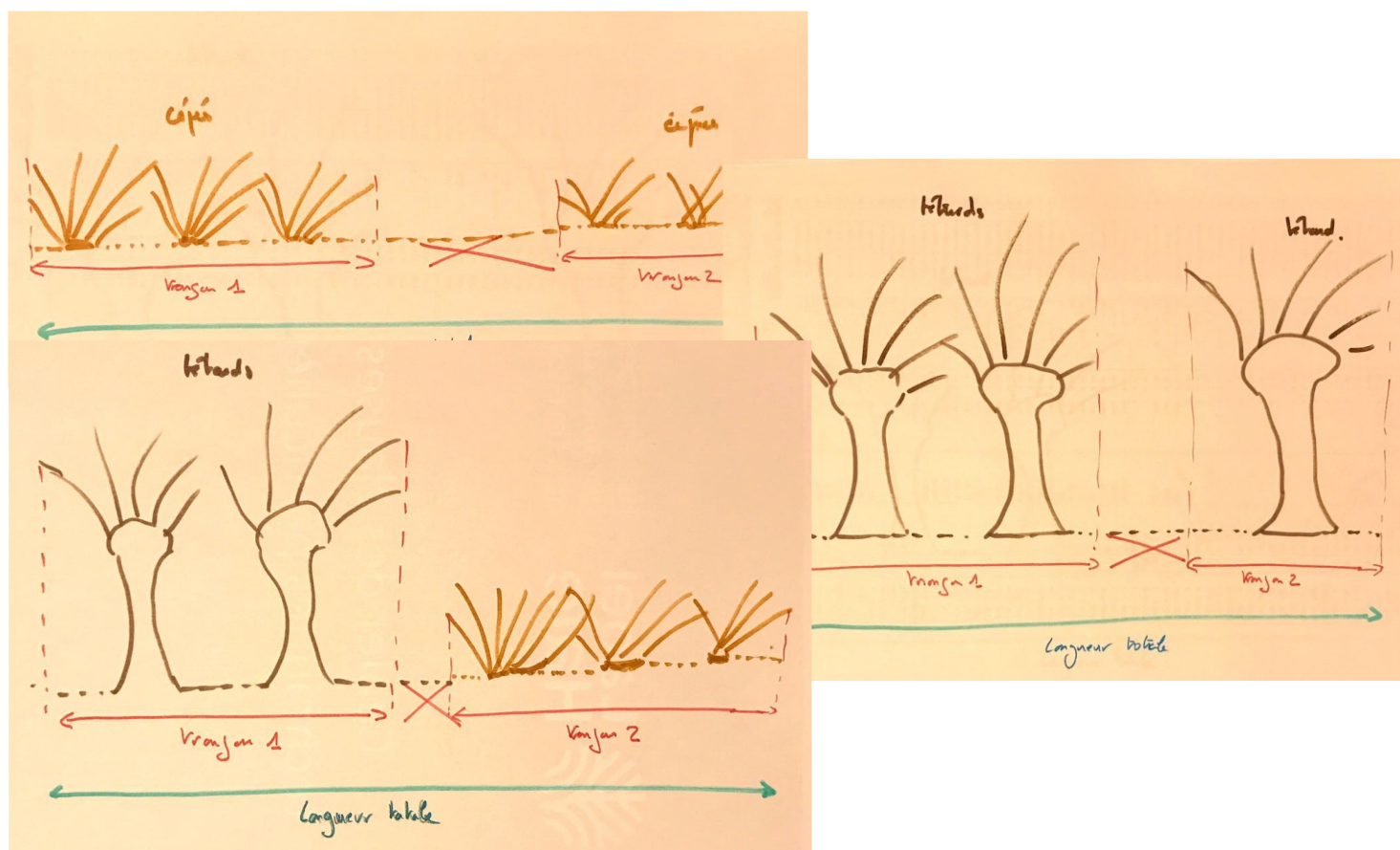
Mesurer la distance aux sections extrêmes de la haie, à l'aplomb des houppiers. Il s'agit de la longueur totale.

∴ *Si la haie n'est pas rectiligne, procéder par tronçons en additionnant les valeurs.*



P1 : Projection au sol de l'extrémité externe du houppier de l'extrémité 1 de la haie
P2 : Projection au sol de l'extrémité externe du houppier de l'extrémité 2 de la haie
L : Longueur de la haie

Longueur additionnelle des tronçons homogènes avec des cépées et ou des têtards : les tronçons à mesurer sont uniquement composés d'arbustes ou de têtards. Sont exclus les arbres et les trouées.



- ∴ Si têtards et Cépées : multiplier les mesures suivantes par deux (pour les deux formes) sauf pour la largeur à 1.30 m qui ne sera faite que pour les cépées

∴ **Hauteur moyenne de la haie**

- ∴ **Mesure d'une hauteur** : L'intérêt se porte sur la hauteur totale moyenne de la haie. La mesure devra démarrer à la tête de chat/ pied de la cépée, et se poursuivre jusqu'à la plus haute partie de la coiffe du houppier.

Itération pour le calcul de moyenne : Mesurer les hauteurs :

- Du premier individu aux deux extrémités de la haie ;
- Du dernier individu aux deux extrémités de la haie ;
- De 2 des plus grands individus ;
- De 2 des plus petits individus. *la moyenne des valeurs obtenues précédemment sera calculée lors de l'enregistrement de vos données.*

∴ **Largeur moyenne au sol ou à la tête de chat pour les têtards de la haie, notée ℓ_1 moy**

Mesure d'une largeur au sol : A la base de l'arbre / de la cépée, mesurer la largeur ℓ_1 du tronc de l'arbre / de la cépée le plus large visible.

Itération pour le calcul de moyenne : Réaliser cette mesure pour les individus aux 2 extrémités de la haie, de 2 des plus grands individus ; de 2 des plus petits individus.

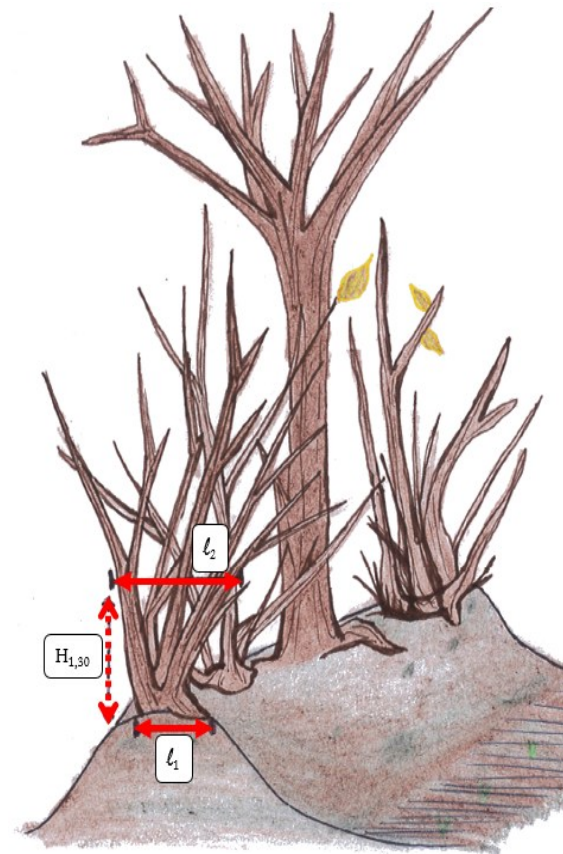
La moyenne des valeurs obtenues précédemment sera calculée lors de l'enregistrement de vos données.

∴ **Largeur moyenne de la haie à H=1,30m, notée ℓ_2 moy**

Mesure d'une largeur à 1,30m : A 1,30m de hauteur depuis la base de l'arbre / de la cépée, mesurer la largeur ℓ_2 du tronc de l'arbre / de la cépée le plus large visible.

Itération pour le calcul de moyenne : Réaliser cette mesure pour les individus aux 2 extrémités de la haie, de 2 des plus grands individus ; de 2 des plus petits individus.

La moyenne des valeurs obtenues précédemment sera calculée lors de l'enregistrement de vos données.



$H_{1,30}$ Hauteur à laquelle doit s'effectuer la mesure de ℓ_2 , c'est-à-dire à 1,30m du niveau du sol où la cépée / l'arbre est.

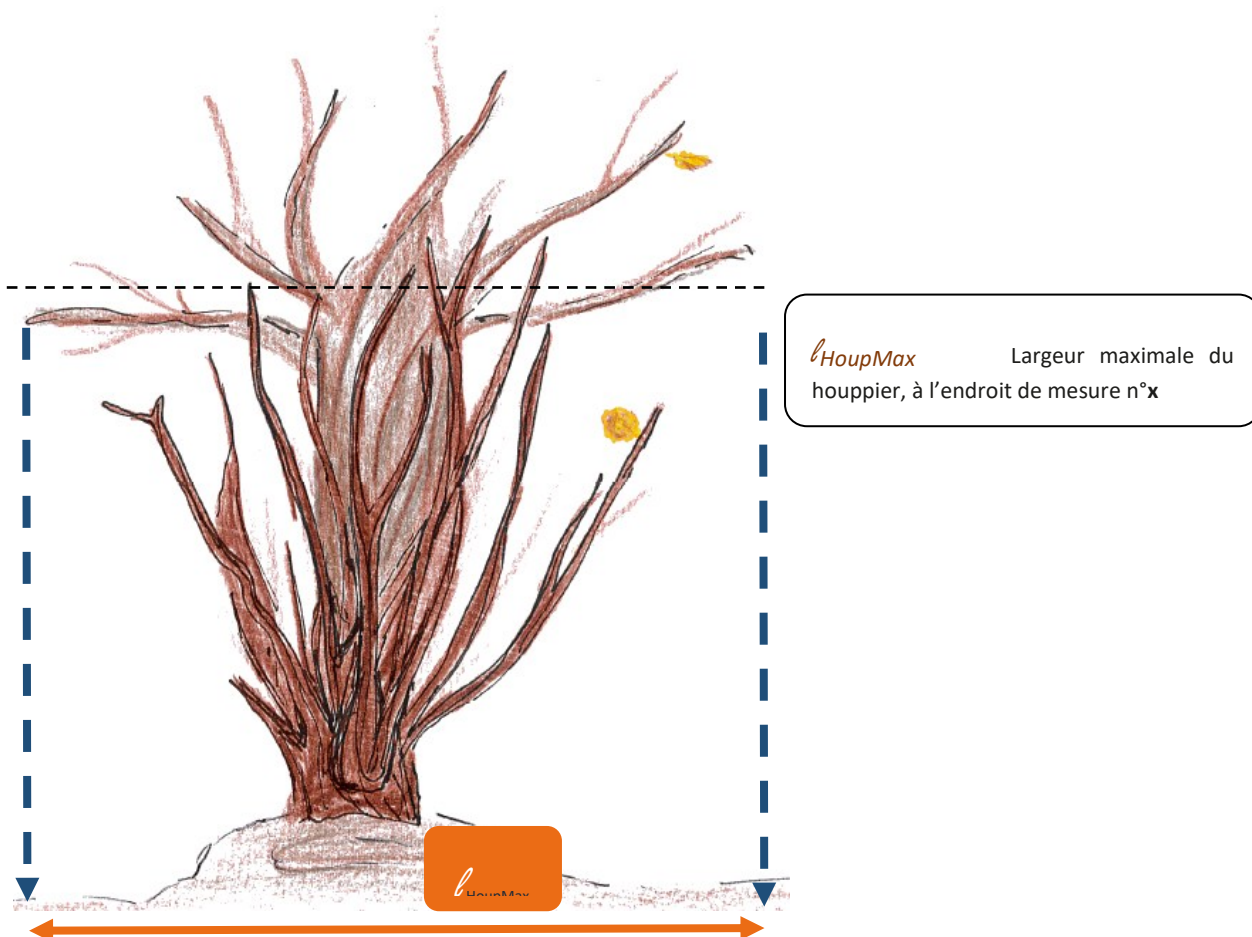
ℓ_1 Largeur au sol de la cépée / de l'arbre. Cette mesure correspond finalement à une partie de l'emprise au sol de l'individu.

Largeur moyenne de la haie au houppier

- ∴ **Mesure d'une largeur au houppier** : Placer un jalon sur le plan de projection de la partie la plus large du houppier étudié, et effectuer la mesure à partir du plan de projection de son extrémité opposée.

Itération pour le calcul de moyenne : Réaliser cette mesure pour les individus aux 2 extrémités de la haie, de 2 des plus grands individus ; de 2 des plus petits individus.

La moyenne des valeurs obtenues précédemment sera calculée lors de l'enregistrement de vos données.



- ∴ **Nombre d'arbres de hauts jets** Compter le nombre d'arbres **hauts-jets HJ** total.

Attention : Au moment de l'exploitation, s'ils font partis de la coupe, les arbres de hauts jets doivent être séparés des mesures de cubage au moment du broyage

2^{ème} passage : Après abattage

∴ **Date du jour de relevés**

∴ **Photos de face**

Prendre une photo face à la haie (i.e. sur sa longueur), au mieux dans son entièreté, sinon représentative de l'ensemble.

∴ **Photos latérales**

Prendre une photo latéralement à la haie (i.e. sur sa largeur), au mieux dans son entièreté, sinon représentative de l'ensemble.

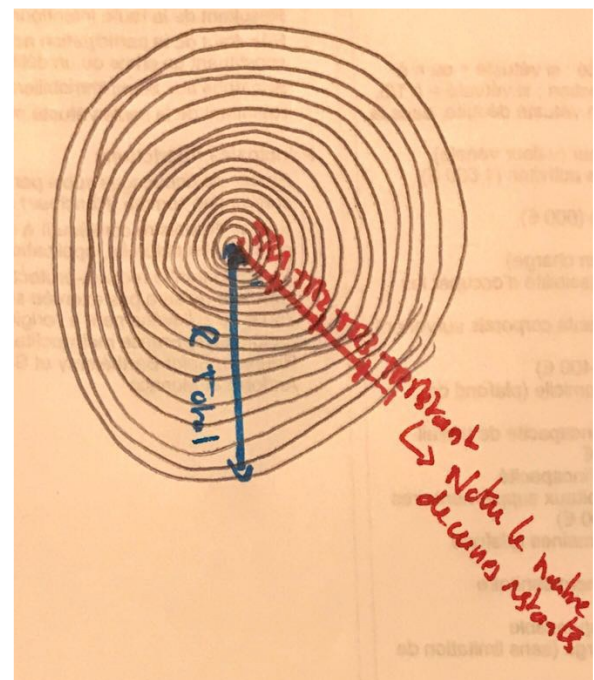


- ∴ **Age moyen de la haie** Compter, sur 4 cépées toutes les 25 m des individus de la haie, les cernes les plus foncés de chaque brin (correspondant au bois de printemps, donc un cerne par an). Compter sur 3 brins les plus représentatifs. *Remarque : S'il y a des difficultés d'observation des cernes pour les essences de bois blancs, noter la durée écoulée depuis la dernière date d'exploitation. Donner le nombre de cernes.*

Largeur des cernes toutes les 5 cernes

Mesurer la largeur entre les cernes par tranche de 5 cernes.

Ces éléments permettant de tracer une courbe de croissance des individus



2^{ème} (ou 3^{ème}) passage : Pendant chantier de déchiquetage

∴ **Date du chantier**

∴ **Volume des bennes**

Cas 1 : Relever les longueur L , largeur l , et hauteur h de la benne pleine

Appliquer la formule de volume d'un parallélépipède droit :

$$V = L \times l \times h$$

∴ **Cas 2 : L'exploitant connaît le volume, ou celui-ci est indiqué explicitement sur la benne :**

Indiquer le volume marchand de la benne.

∴ **Nombre de bennes pleines :** cette donnée permettra de compter le volume des bennes pleines ou bien le tonnage si qu'une seule pesée des bennes pleines.

Volume de la dernière benne non remplie complètement : Dans tous les cas il est nécessaire d'avoir les données de la dernière benne si elle n'est pas remplie complètement – attention au mélange de chantier – si la dernière est complètement pleine indiquer zéro pour garantir la fiabilité de la donnée.

∴ **Masse à vide de chaque benne**

Indiquer la masse à vide (i.e. la tare) de la benne par lecture des résultats de pesée (pesons ou *via* bons de livraisons). *Remarque : Obtenir au moins une donnée chiffrée pour chaque benne différente.*

∴ **Masse des bennes chargées**

Indiquer la masse totale par lecture des résultats de pesée (pesons ou *via* bons de livraisons).

Masse de la dernière benne non remplie complètement : Dans tous les cas il est nécessaire d'avoir les données de la dernière benne si elle n'est pas remplie complètement – attention au mélange de chantier – si la dernière est complètement pleine indiquer zéro pour garantir la fiabilité de la donnée.

∴ **Taux d'humidité** Prendre 3 échantillons de plaquettes, d'environ 5 litres chacun et issus d'une même benne. *Remarque : Penser à bien fermer hermétiquement les sachets de collecte.*

Suivre les étapes du protocole d'obtention du taux d'humidité.

6.2. Annexe 2 – Tableaux de renseignements des données

Données générales

Numéro de haie IGN	Numéro de haie PGDH	Auteur donnée	structure affiliée	Année	Exploitant	Adresse	code postal	commune	Téléphone
--------------------	---------------------	---------------	--------------------	-------	------------	---------	-------------	---------	-----------

Topographie POS_TOPO	Pente	Orientation /pente	Interface	Assolement parcelle 1	Assolement parcelle 2	profondeur du sol	Nature du sol	Exposition au vent	forme de la haie	Position au sol - POS_SOL_LOCAL	Type de haie	Dernière exploitation en nombre d'années	Impacts sur la productivité
----------------------	-------	--------------------	-----------	-----------------------	-----------------------	-------------------	---------------	--------------------	------------------	---------------------------------	--------------	--	-----------------------------

Mesures des haies avant abattage

Numéro de haie IGN	Date	Longueur totale (m)	Nombre d'arbres de hauts jets	Longueur tronçons homogènes 1 avec cépées et/ou tétards	Longueur tronçons homogènes 2 avec cépées et/ou tétards	Longueur tronçons homogènes 3 avec cépées et/ou tétards	Longueur tronçons homogènes 4 avec cépées et/ou tétards	Longueur tronçons homogènes 5 avec cépées et/ou tétards
--------------------	------	---------------------	-------------------------------	---	---	---	---	---

cépée 1 - extrémité début				cépée 2 - Individu min 1				cépée 3 - Individu min 2				cépée 4 - Individu max 1				cépée 5 - Individu max 2				cépée 6 - Individu extrémité fin			
Hauteurs (m) cépées	Largeur au sol (m) cépées	Largeur à 1,30 m (m) cépées	Largeurs houppiers (m) cépées	Hauteurs (m) cépées	Largeur au sol (m) cépées	Largeur à 1,30 m (m) cépées	Largeurs houppiers (m) cépées	Hauteurs (m) cépées	Largeur au sol (m) cépées	Largeur à 1,30 m (m) cépées	Largeurs houppiers (m) cépées	Hauteurs (m) cépées	Largeur au sol (m) cépées	Largeur à 1,30 m (m) cépées	Largeurs houppiers (m) cépées	Hauteurs (m) cépées	Largeur au sol (m) cépées	Largeur à 1,30 m (m) cépées	Largeurs houppiers (m) cépées	Hauteurs (m) cépées	Largeur au sol (m) cépées	Largeur à 1,30 m (m) cépées	Largeurs houppiers (m) cépées

tétard 1 - individu min 1			tétard 2 - individu min 2			tétard 3 - individu min 3			tétard 4 - individu min 4			tétard 5 - individu min 5			tétard 6 - extrémité fin		
Hauteurs (m)tétard	Largeur à la tête (m) tétard	Largeurs houppiers (m) tétards	Hauteurs (m)tétard	Largeur à la tête (m) tétard	Largeurs houppiers (m) tétards	Hauteurs (m)tétard	Largeur à la tête (m) tétard	Largeurs houppiers (m) tétards	Hauteurs (m)tétard	Largeur à la tête (m) tétard	Largeurs houppiers (m) tétards	Hauteurs (m)tétard	Largeur à la tête (m) tétard	Largeurs houppiers (m) tétards	Hauteurs (m)tétard	Largeur à la tête (m) tétard	Largeurs houppiers (m) tétards

Mesures des haies après abattage

Numéro de haie IGN	Date	Mesures des cernes Cépée 1 (en cm)										Mesures des cernes Cépée 1 (en cm)										Mesures des cernes Cépée 1 (en cm)									
		Brin 1										Brin 2										Brin 3									
		essence	tronçon 1 de rayon 5 cernes	tronçon 2 de rayon 5 cernes	tronçon 3 de rayon 5 cernes	tronçon 4 de rayon 5 cernes	tronçon 5 de rayon 5 cernes	rayon dernières cernes	nombre de cernes dernier rayon	rayon total	nombre de cernes totales	essence	tronçon 1 de rayon 5 cernes	tronçon 2 de rayon 5 cernes	tronçon 3 de rayon 5 cernes	tronçon 4 de rayon 5 cernes	tronçon 5 de rayon 5 cernes	rayon dernières cernes	nombre de cernes dernier rayon	rayon total	nombre de cernes totales	essence	tronçon 1 de rayon 5 cernes	tronçon 2 de rayon 5 cernes	tronçon 3 de rayon 5 cernes	tronçon 4 de rayon 5 cernes	tronçon 5 de rayon 5 cernes	rayon dernières cernes	nombre de cernes dernier rayon	rayon total	nombre de cernes totales

Idem pour les autres cépées

Mesures des cernes Tétard 1 (en cm)										Mesures des cernes Tétard 1 (en cm)										Mesures des cernes Tétard 1 (en cm)									
Brin 1										Brin 2										Brin 3									
essence	tronçon 1 de rayon 5 cernes	tronçon 2 de rayon 5 cernes	tronçon 3 de rayon 5 cernes	tronçon 4 de rayon 5 cernes	tronçon 5 de rayon 5 cernes	rayon dernières cernes	nombre de cernes dernier rayon	rayon total	nombre de cernes totales	essence	tronçon 1 de rayon 5 cernes	tronçon 2 de rayon 5 cernes	tronçon 3 de rayon 5 cernes	tronçon 4 de rayon 5 cernes	tronçon 5 de rayon 5 cernes	rayon dernières cernes	nombre de cernes dernier rayon	rayon total	nombre de cernes totales	essence	tronçon 1 de rayon 5 cernes	tronçon 2 de rayon 5 cernes	tronçon 3 de rayon 5 cernes	tronçon 4 de rayon 5 cernes	tronçon 5 de rayon 5 cernes	rayon dernières cernes	nombre de cernes dernier rayon	rayon total	nombre de cernes totales

Idem pour les autres tétards

Volume chantiers

Numéro de haie IGN	Date du chantier	Benne 1							Benne 2							Benne 3							Masse totale communiquée par l'EA (en t)	taux d'humidité
		volume de la benne pleine (en m3)	nombre de bennes pleines complètes	volume dernière benne (en m3)	masse à vide benne (en t)	masse benne 1 pleine (en t)	masse benne 2 pleine (en t)	masse dernière benne 3 (en t)	volume de la benne pleine (en m3)	nombre de bennes pleines complètes	volume dernière benne (en m3)	masse à vide benne (en t)	masse benne 1 pleine (en t)	masse benne 2 pleine (en t)	masse dernière benne 3 (en t)	volume de la benne pleine (en m3)	nombre de bennes pleines complètes	volume dernière benne (en m3)	masse à vide benne (en t)	masse benne 1 pleine (en t)	masse benne 2 pleine (en t)	masse dernière benne 3 (en t)		

■ Table des figures

Figure 1 Modèle de cubage simplifié des haies de taillis et de têtards – étude 2022	2
Figure 2 :schémas des principales données à mesurer sur le terrain (se référer au protocole en annexe 1)8	
Figure 3 : Chantier d'abattage de bois avec tri de chaque partie des arbres (source : L.Nevoux).....	11
Figure 4 : Répartition des points autour de la médiane de l'accroissement annuel pour les 3 régions concernées.....	14
Figure 5 : Courbe de croissance des cépées de châtaignier en Mayenne	15
Figure 6 : : Courbe de croissance des têtards de charmes en Mayenne.....	16
Figure 7 : Courbe de croissance des jeunes noisetiers dans le Nord	16
Figure 8 : Comparaison du niveau d'explication des variables par rapport à la masse humide par le critère BIC pour le modèle 1 des cépées basses.....	17
Figure 9 : Analyse de l'adaptation du modèle 1 avec les cépées basses.....	18
Figure 10 : Analyse de l'indépendance des résidus pour le modèle 1 des cépées basses.....	18
Figure 11 : Test de Shapiro pour tester la normalité des résidus pour le modèle 1 des cépées basses.....	19
Figure 12 : Analyse de l'homogénéité des résidus pour le modèle 1 des cépées basses.....	19
Figure 13 : Comparaison du niveau d'explication des variables par rapport à la masse humide par le critère BIC pour le modèle 3 des cépées basses et hautes.....	19
Figure 14 : Analyse de l'adaptation du modèle 2 avec les cépées basses et hautes.....	20
Figure 15 : Test de Rainbow pour vérifier l'adéquation du modèle	21
Figure 16 : Analyse de l'indépendance des résidus pour le modèle 2 des cépées basses et.....	21
Figure 17 : Test de Durbin-Watson pour tester l'indépendance des résidus du modèle.....	21
Figure 18 : Test de Shapiro pour tester la normalité des résidus pour le modèle 2 des cépées basses et hautes.....	22
Figure 19 : Analyse de l'homogénéité des résidus pour le modèle 2 des cépées basses et hautes.....	22

■ Table des tableaux

Tableau 1 : Références utilisées aujourd'hui pour les changements d'unité.....	3
Tableau 2 : Synthèse des références de productivité des haies continues existantes dans l'Ouest (synthèse Bouvier 2008).	4
Tableau 3 : Ordre de grandeur de productivité des haies de l'Ouest – travaux CAREN et Bouvier 2008	4
Tableau 4 : Indicateurs et caractéristiques pour le choix des haies à mesurer	9
Tableau 5 : Synthèse du temps passé pour la mesure et la saisie d'une haie – exemple de l'AAT et MBE.10	
Tableau 6 : Résultats du nombre de haies par typologie et par région.	12
Tableau 7 : Résultats des gabarits des taillis ou des têtards des haies en fonction de leur typologie.	12
Tableau 8 : Productivités moyennes et médianes des haies en bois déchiqueté en tonne humide pour 100 ml en fonction de leur typologie.	13
Tableau 9 : Productivités moyennes et médianes pour 100 ml de haie en fonction de la région.	13
Tableau 10 : Productivité annuel en bois déchiqueté en tonne humide pour 100 ml en fonction de la région.....	13
Tableau 11 : Accroissements annuels moyens et médians en tonne humide pour 100 ml de haie (uniquement les cépées ou têtards) par typologie de haie.....	14
Tableau 12 : Présentation du modèle de cubage trouvé avec les cépées basses.	17
Tableau 13 : Présentation du modèle de cubage trouvé avec les cépées basses et hautes.....	20

■ Sigles et acronymes

AAAT : Atelier Agriculture Avesnois Thiérache
ACP : Analyse en Composante Principale
ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
AFAC-A : Association Française des Arbres Champêtres et Agroforesterie
DSB : Dispositif de Suivi des Bocages
IFN : Inventaire Forestier National
IGN : Institut National de l'information Géographique et forestière
MAP : Mètre cube Apparent
MCD : Modèle Conceptuel de Données
MLD : Modèle Logique de Données
PGDH : Plan de Gestion Durable des Haies
SCIC : Société Coopérative d'Intérêt Collective
SGBD : Système de Gestion de Base de Données
SRPM : Station Recherche Pluridisciplinaire Des Metz

■ Bibliographie

AFAC-A, 2017. Référentiel national sur la typologie des haies, modalités pour une gestion durable, 90P

BAZIN P., CHEVALIER D., 1985, Etude des potentialités et de la valorisation des ressources des haies bocagères de Basse – Normandie, 55 pages.

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, 85 pages

CAROFF O., 2005. Valorisation du bocage en plaquettes bois énergie pour alimenter la chaudière de la piscine de SCAER. Mémoire en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur des Techniques de l'Agricultures, Institut national agronomique de Paris Grignon, 60 pages

COLOMBIE S. - CRA PdL ; LIGNEAU L. - CRA BhZ ; THAREAU B. - ESA-LARESS ; VIAUD V. - INRAE- SAS; COISNON T. ; DUPRAZ P. ; SEYNI N.A. – INRAE-SmartLereco ; THOMAS M. - CCI PdL ; MESSENGER O. - O2MConseil ; TREVISIOL A. - ADEME. 2020. CARBOCAGE, vers la neutralité carbone des territoires.40p.

DASSOT M., COMMAGNAC L., LETOUZE F., COLIN A., 2022. Stocks de bois et de carbone dans les haies bocagères françaises. 66 pages.

DOUET M., LEMARCHAND F., 2016. « Du bon usage du bocage : la haie bocagère au cœur des enjeux de développement durable », Belgeo [En ligne], 4 | : <http://journals.openedition.org/belgeo/19436> ; DOI : 10.4000/belgeo.19436

IFN, 2010. L'estimation du bois de haie mobilisable en « bois énergie » en Basse-Normandie, 24 pages

JEZEGOU M., 2008. Données relatives à la production de haies bocagères, 15 pages.

MEROT P., BRIDET-GUILLAUME F., 2006. Les bocages armoricains : repères sur l'évolution des thèmes de recherche depuis les années 1960, 7 pages.

MORENO G., AVIRON S., BERG S., CROUS-DURAN J., FRANCA A., GARCIA DE JALON S., HARTEL T., MIRCK J., PANTERA A., PALMA J.H.N., PAULO J.A., RE G.A., SANNA F., THENAIL C., VARGA A., VIAUD V., BURGESS P.J. Agroforestry systems of high nature and cultural value in Europe: provision of commercial goods and other ecosystem services, 2008.

POINTEREAU P. 2002 Les haies : évolution du linéaire en France depuis quarante ans. Le Courrier de l'environnement de l'INRA, Paris : Institut national de la recherche agronomique Délégation permanente à l'environnement.

SIMON M., LETOUZE F., COLIN A., 2018. Evaluation de la biomasse bocagère en Bretagne - Rapport d'étude – IGN Janvier 2018 – Etude ADEME

SIMON M., LETOUZE F., COLIN A., 2019. Evaluation de la biomasse bocagère en Normandie - Rapport d'étude – IGN Janvier 2019 – Etude ADEME

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 de la Cohésion des territoires, du ministère de l'économie, des finances et de la souveraineté industrielle et numérique et du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

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.



EVALUATION DES STOCKS ET FLUX DE BIOMASSE ET CARBONE DES HAIES

Les haies bocagères sont une source de biomasse pour développer les ressources renouvelables des territoires agricoles. Leur préservation et leur maintien sont aussi une solution pour stocker davantage de carbone dans les parcelles. Cependant, les données disponibles aujourd'hui sur le volume produit par les haies, leur accroissement annuel et leur capacité de stockage de carbone sont faibles et ne permettent pas de réaliser des scénarios fiables pour valoriser ces services. La majorité des méthodes qui existaient jusqu'à présent pour cuber les haies sont principalement des méthodes pour estimer le volume sur pied en m³ de bois rond. Les méthodes sont soit trop complexes à mettre en œuvre ou nécessitent déjà une certaine expérience, soit elles sont trop simplistes ou anciennes et ne permettent pas une précision suffisante. Elles s'appuient souvent sur des références forestières alors que la croissance des arbres n'est pas la même dans les haies.

Une première étude a été engagée de 2020 à 2022 soutenue par l'ADEME, les financements CASDAR (projet Resp'haies) et Ecotone sous la coordination de l'Afac en partenariat avec l'INRAE, la SCIC Bois Bocage Energie et Solagro afin de travailler à des modèles simplifiés permettant de construire des référentiels Biomasse-carbone des haies France entière.

Cependant avant d'engager un travail de transfert, il a semblé important de poursuivre la collecte de données pour conforter le modèle de cubage des taillis et têtards construit dans la précédente étude. Durant l'hiver 2023/2024, une trentaine de haies ont été mesurées, ce qui permet d'avoir un échantillon de 129 haies pour mettre à jour les résultats de l'étude précédente : données de références dans les territoires étudiés sur la productivité des haies (volume et accroissement en grand ouest), gabarit des haies, et modèles de cubage simplifié des haies de taillis d'arbustes, d'arbres et de têtards.

Le travail sera poursuivi en 2025/2026 pour compléter les méthodes de mesure de biomasse sur les arbres de hauts jets.

Essentiel à retenir

Elaboration d'une méthode simplifiée pour mesurer la production de biomasse des haies de taillis et têtards

