

Avec le soutien de :

Avec
la contribution
financière du compte
d'affectation spéciale
développement
agricole et rural
CASDAR



**MINISTÈRE
DE L'AGRICULTURE
ET DE LA SOUVERAINETÉ
ALIMENTAIRE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Resp^{haies}

Rapport n°3

Évaluation des stocks et flux de biomasse et carbone des haies

Partie 1 :

Vers la création d'un référentiel national de cubage et
de productivité des haies bocagères

Rapport final — Mai 2023



Auteurs :

Catherine Moret – Afac-Agroforesteries
Sylvain Betolaud – SCIC Bois Bocage Énergie

Table des matières

PARTIE 1 — PROBLEMATIQUE ET OBJECTIF	3
1.1— Problématique	3
1.2— État de l'Art	3
1.2.1 — Les données actuelles et les manques	3
1.2.2 — Les méthodes existantes aujourd'hui à l'échelle des territoires	5
1.3 — Objectifs	7
PARTIE 2 — METHODOLOGIE ET REALISATIONS	9
2.1 — Méthodologie	9
2.1.1 — Collecte, gestion et analyse des données	9
2.1.2 — Échantillonnage	11
2.2 – Déroulé du projet	13
2.2.1 — Organisation mise en place	13
2.2.2 — Étapes	14
PARTIE 3 – RESULTATS	16
3.1 — Base de données Access : construction et contenu	16
3.2 — Caractérisation générale de l'échantillon de haies - y compris « gabarit des haies hauteur, largeur...»	16
3.2.1 — Caractérisation de gabarits de haies	17
3.2.2 — Caractérisation de la productivité des haies	18
3.3 — Référentiels et éléments de conversion	20
3.3.1 — Régression linéaire entre les volumes et tonnages verts	21
3.3.2 — Régression linéaire entre tonnages verts et tonnages anhydres	21
3.4 — Modèles de cubage	22
3.5 — Proposition des méthodes simplifiées de cubage et d'obtention des référentiels	28
3.6 — Résultats de biomasse carbone	29
3.7 – Liste et descriptif des livrables	30
PARTIE 4 – PERSPECTIVES	32
4.1 — Suites envisagées	32
4.2 – Éléments évaluatifs	34
4.2.1 — Difficultés rencontrées	34
4.2.2 — Analyse d'impact du projet sur les différents publics cibles	34
4.2.3 — Indicateurs de suivis	34
4.2.4 — Indicateurs de résultats	34
PARTIE 5 – ANNEXES	36
Bibliographie	36
Table des figures	37
Table des tableaux	37
Sigles et acronymes	38

PARTIE 1 — PROBLEMATIQUE ET OBJECTIF

1.1— Problématique

Malgré la dégradation qualitative et la très forte régression des linéaires de haies qui ont accompagné l'accroissement de la mécanisation (1,4 millions de haies supprimées en France depuis 1960 – Pointereau Solagro 2002), la haie reste le système agroforestier prépondérant. Dans certaines régions, l'attachement culturel à la haie reste très fort. Cette dernière est donc un sujet d'intérêt majeur pour le développement de l'agriculture française, ce dont témoigne le plan de développement de l'agroforesterie qui souligne l'intérêt agronomique et environnementale des haies. D'autres part, la trame verte et bleue se déploie partout en France à travers les schémas régionaux de cohérence écologique. Les haies et les structures associées constituent un enjeu essentiel de « reconquête de la biodiversité » dans les espaces ruraux (loi du 8 août 2016). Un autre enjeu important porte sur les nouvelles opportunités pour la biomasse issue des haies. L'émergence et le développement de la filière bois énergie d'origine bocagère présente le risque d'exercer une pression accrue sur la ressource bocagère (Douet et Lemarchand, 2016).

Afin d'accompagner la transition énergétique en cohérence avec les scénarios envisagés sur le recours à la biomasse bocagère, il demeure indispensable de poursuivre le travail d'acquisition de connaissances, de suivi et d'analyses de la ressource disponible. En effet, la fabrication de bois déchiqueté pour les chaudières bois ne doit pas s'accompagner d'une destruction du bocage par excès de prélèvement, par mauvaise conduite des haies, ou par non-maîtrise du marché.

Leur préservation et leur maintien sont aussi une solution pour stocker davantage de carbone dans les parcelles. Cependant, les données disponibles aujourd'hui sont faibles et ne permettent pas de réaliser des scénarios fiables pour valoriser ces services. Les partenaires de cette étude s'associent pour engager un premier travail d'évaluation de la biomasse bocagère et du carbone dans les compartiments aériens et sols de différentes situations pédoclimatiques caractéristiques. Ce rapport porte sur l'évaluation de la biomasse et du carbone dans les compartiments aériens des haies. Au-delà de la production de premières données de références, l'objectif principal de cette étude est de tester une méthode qui puisse être déployée sur l'ensemble des bocages en France à des échelles fines pour aider les orientations des politiques publiques sur les haies et de préciser les conditions techniques et matérielles de ce déploiement. La problématique de cette partie est d'étudier comment il est possible de caractériser les haies en tant que ressources territoriales en élaborant un référentiel national de productivité et de cubage des haies et de vérifier des références utilisées aujourd'hui par les opérateurs de terrain.

1.2— État de l'Art

1.2.1 — Les données actuelles et les manques

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

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

1.2.2 — 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.

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 :

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.

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.

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.

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 décimètre 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.

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 terrains. 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.

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.

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.

1.3 — Objectifs

L'objectif général de ce projet est de concevoir, à terme, une méthode de calcul des stocks et des flux de biomasse et de carbone dans les compartiments aériens des haies :

- applicable de manière cohérente aux échelles nationales, régionales et territoriales,
- produisant des résultats par zones présentant des types de haies et d'accroissements annuels identiques (pas de prédictions locales), permettant d'avoir des synthèses de données à des échelles régionales,
- valorisant au maximum les informations disponibles (DSB, MNS, IFN, cartes pédologiques, cubage, chantiers, etc.),
- associant les structures institutionnelles et les professionnels des territoires,

- permettant de simuler des scénarios d'évolution de gestion et de conditions de croissance en fonction des évolutions climatiques des haies.

Pour aboutir à cet objectif à plus long terme, il est préalablement nécessaire de :

- Concevoir et tester une méthode simplifiée de calcul des stocks et des flux de biomasse et de carbone dans les compartiments aériens et sols des haies sur des zones d'études expérimentales. En effet, si certaines méthodes de cubage existent, elles sont souvent difficilement adaptables au contexte bocager ou très complexe à mettre en œuvre et chronophage.
- Vérifier des références existantes à partir de données terrains valorisables. En effet, de nombreuses références utilisées aujourd'hui se basent sur des données vieillissantes et parfois issus d'approximations voire d'imprécisions. Il s'agit en particulier de coefficients de conversion entre différentes unités utilisées. Ces données ont vocation de servir de support de croisement avec d'autres partenaires.
- En parallèle, ce travail va permettre de produire des premiers éléments de références chiffrés de biomasse et de stock de carbone dans les compartiments aériens et sols dans 4 situations de contextes pédoclimatiques différents en France : Normandie, Haut de France, Bourgogne- Franche-Comté, Pays de la Loire et en liant ces références à des accroissements annuels (âges des haies).

PARTIE 2 — METHODOLOGIE ET REALISATIONS

2.1 — Méthodologie

2.1.1 — Collecte, gestion et analyse des données

La première partie du projet a été de regrouper les acteurs travaillant sur la thématique afin d'évaluer les différentes méthodes de cubage. Cette étape de concertation a permis de définir dans un protocole les mesures à prendre sur le terrain et de le valider en l'expérimentant. Le choix des données à relever a été fait d'ans l'objectif de répondre aux quatre objectifs suivants :

- Mesurer le volume de bois extrait des haies
- Vérifier des volumes par suivi des chantiers d'exploitation
- Mesurer l'âge des bois
- Mesurer le poids anhydre

Collectes de données

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.

Dans le cadre de nos travaux, une haie étudiée doit être caractérisée par des données faisant référence à 3 passages de relevés.

Le protocole introduit ci-dessus peut être considéré comme le protocole de référence. Une méthode de prise de mesures pour chaque variable y est indiquée, ainsi que l'objectif de la mesure et le matériel nécessaire et/ou préconisé.

Ce document est cependant trop exhaustif pour un usage professionnel. C'est pour cette raison que deux autres

documents en ont découlé. Chacun d'eux avait un but précis, pour répondre aux demandes des professionnels de terrain, mais garde la même structure que le protocole initial.

Une fois le protocole réalisé, relu, et révisé après son application pour deux haies dans l'Orne, des fiches de prises de notes de terrain ont été créées (Annexe 3). Leur structure n'est pas figée, elle comporte simplement tous les éléments à relever pour chaque passage. Elles ont été communiquées aux structures collaboratrices à titre d'exemple, et complétées pour la totalité des haies de référence identifiées. A la suite d'une réunion de terrain, une nouvelle fiche donnant une idée de cheminement de récolte des données leur a également été transmise (Figure 1).

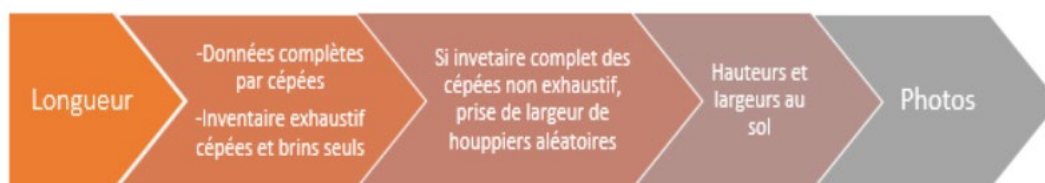


Figure 1 : idée de cheminement de récolte des données.

Cette prise de données s'est effectuée à plusieurs échelles (Figure 2) :

- Au lieu de localisation : données GPS, pluviométrie, pente...
- A l'abattage : mesures des tas, âge des souches (au minimum sur 50 % des cépées)
- La haie : plusieurs mesures effectuées à des points différents de la haie : hauteur, largeur au sol, largeur à 1,30 m, largeur du houppier, longueur, nombre de cépées, nombre de brins seuls, inventaire exhaustif de tous les individus et taille estimée...
- L'individu (au minimum 1 cépée tous les 25 mètres linéaires) : hauteur, largeur au sol, largeur à 1,30 m, largeur du houppier, longueur au sol, nombre de brins, diamètres à 1,30 m de tous les brins
- Le chantier d'exploitation : tonnage précis en tonnes humides, dimensions des bennes...

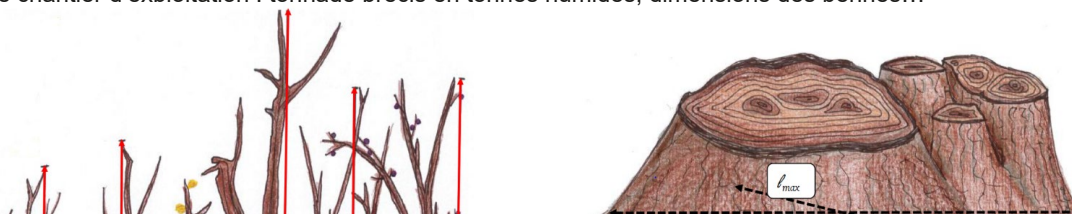


Figure 2 : schéma de certaines données à mesurer sur le terrain.

Pour réaliser cette prise de données 3 passages étaient nécessaires correspondant aux périodes suivantes :

- Avant abattage ;
- Après abattage ;
- Pendant déchiquetage.

Lorsque le protocole était bien maîtrisé et connu, la prise de données après abattage pouvait être réalisée en même temps que celle pendant le déchiquetage pour diminuer le nombre de déplacements. Le nombre de variable décrit dans le protocole ne facilite pas leur organisation (Annexe 4). Aussi, l'absence de temps entre les périodes de rédaction et de terrain n'a pas laissé la possibilité d'élaborer un outil de saisie commun à toutes les structures pour la récolte des données sur le terrain. C'est un objectif à poursuivre dans les perspectives du projet pour collecter les données et simplifier le travail terrain.

Stockage des données

L'un des livrables du projet est de constituer une base de données qui pourra continuer à être alimentée avec les données produites lors de chantiers futurs, en appliquant la même méthodologie de cubage et de productivité. Au-delà de ce livrable, il est très rapidement apparu nécessaire de construire une base de données. Le besoin s'exprimait notamment en considérant que les données récoltées devaient être analysées sous format numérique, permettre l'utilisation par les autres partenaires du projet, mais également pour garantir une sécurité et une optimisation de leur stockage.

Le protocole a été la base de constitution des premiers groupes de variables. Ce travail préalable, et surtout nécessaire à la construction d'une base de données, se traduit par un Modèle Conceptuel de Données (MCD). Ce dernier a été réalisé sur le logiciel Looping pour sa mise en forme. Effectivement, il s'agit d'un outil très didactique.

D'un MCD, il est possible de passer au Modèle Logique de Données (MLD) (Annexes 5 et 6). Il en est de même pour générer les lignes de codes à intégrer au Système de Gestion de Base de Données (SGBD) pour la création des tables. Ensuite, il a fallu choisir le SGBD en question, qui permettra de stocker le jeu de données complet. La base de données a été créée sur Microsoft Access. Par une succession de requêtes de création, la base de données a pris forme.

Afin de faciliter la reproductibilité de ce travail, et d'être en mesure d'apporter une meilleure compréhension pour des intervenants externes, un document intitulé Stockage des données relevées sur le terrain - Fiche descriptive des correspondances entre attributs et scripts a été écrit.

Pour chaque classe des modèles conceptuel et logique de données figurent :

- La correspondance entre les variables de l'étude et leur nom 'codé' dans les modèles ;
- La nature de la variable écrit littéralement puis avec sa correspondance en nomination Access ;
- Le code pour la création de la table généré par Looping ;
- Le code ajusté pour la création de la table dans 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.

2.1.2 — Échantillonnage

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, furetage) au cours de la saison hivernale 2020-2021.	Des haies peuvent potentiellement être exploitées dans le courant de l'été 2021, début septembre dernier délai.
Typologie	La haie est de type simple. Autrement dit, sa typologie figure dans la liste suivante : <ul style="list-style-type: none"> - 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.

De plus, les haies mesurées sont des haies intégrées à un cycle de gestion et donc non dégradées par des outils mécaniques d'entretien d'emprise.

Le choix s'est tourné de travailler spécifiquement sur le cubage des haies de cépées et têtards qui composent la grande majorité du bois valorisé en bois énergie aujourd'hui. Par ailleurs, il est possible de mettre en relation les données de mesures des haies et celles issues des exploitations car les haies sont exploitées complètement en coupe rase. Un travail spécifique est à conduire sur les hauts jets avec un protocole adapté (en se tournant vers certaines des méthodes présentées en II.2).

Pour l'ensemble des structures réalisant la saisie de données, une difficulté pour trouver des chantiers adaptés a été notée. Pour cela, plusieurs haies ont été mesurées malgré le fait qu'elles ne correspondaient pas à une des typologies mentionnées. Cependant, elles n'ont pas été intégrées par la suite dans l'analyse de données. En effet, le cubage des hauts-jet est plus complexe et il a souvent été difficile d'inventorier les arbres coupés et ceux laissés sur pied.

Localisations

Les données ont été obtenues dans des zones pédoclimatiques différentes. Les références proviennent de 5 régions métropolitaines : la Normandie, les Hauts-de-France, la Bourgogne-Franche-Comté, les Pays de la Loire et l'Auvergne Rhône Alpes.

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
- Le Nord du département de la Nièvre et le Sud du département de l'Yonne pour la SRPM, devenu depuis le CPIE Yonne et Nièvre
- L'Auvergne pour Mission Haie
- La Mayenne pour la SCIC Mayenne Bois Energie

Cependant, pour l'Auvergne, il a été difficile de mobiliser les acteurs du territoire et trouver des chantiers correspondant à la méthode. Ainsi, si des mesures ont été effectuées, aucune n'a pu être intégrée dans la base finale. Cependant, ces données ont été conservées et pourront servir à posteriori, si les mesures sont terminées pour les chantiers encore en cours, ou pour valider le modèle si des données suffisantes peuvent être exploitées. Dans tous les cas, l'application de ce protocole a permis de poser des questions sur les conditions nécessaires pour la prise de mesures. De manière générale, il a été remonté plusieurs difficultés rencontrées sur la prise de références qui sont à prendre en compte dans les perspectives données à cette étude :

- Plusieurs haies retenues pour le protocole n'ont finalement pas pu être récoltées dans les délais de l'étude ou certaines haies prévues ont finalement été annulée. Les périodes de coupe et d'exploitation sont parfois très difficiles à prévoir.
- Il est difficile d'engager un protocole de ce type dans des territoires n'ayant pas déjà un groupe d'agriculteurs constitué et habitués à de tels chantiers.
- De nombreux agriculteurs n'ont pas respecté les consignes de coupe et les marquages initialement prévus.

En tout, ce sont 98 haies qui sont enregistrées dans la base de données :

35 pour l'Orne pour la SCIC BBE

52 pour le département de l'Aisne le département du Nord pour l'AAAT

3 pour le département de la Nièvre et l'Yonne pour la SRPM

8 pour la Mayenne pour la SCIC Mayenne Bois Energie

Les cartes ci-dessous représentent les localisations des haies entrées dans la base. Les cartes seront remises en annexe pour une meilleure visualisation (Figure 3) (Annexe 7).

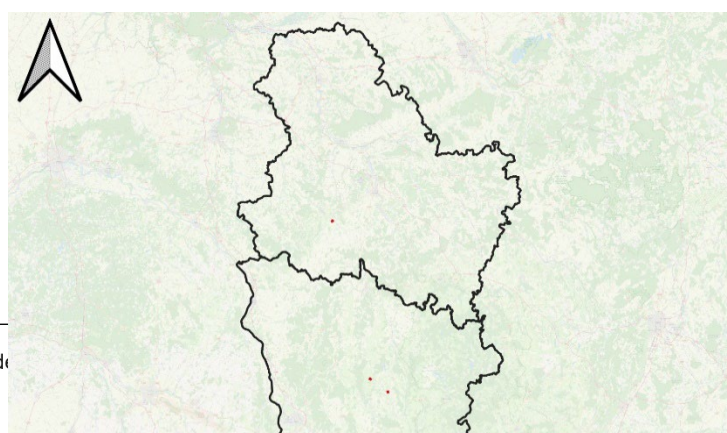
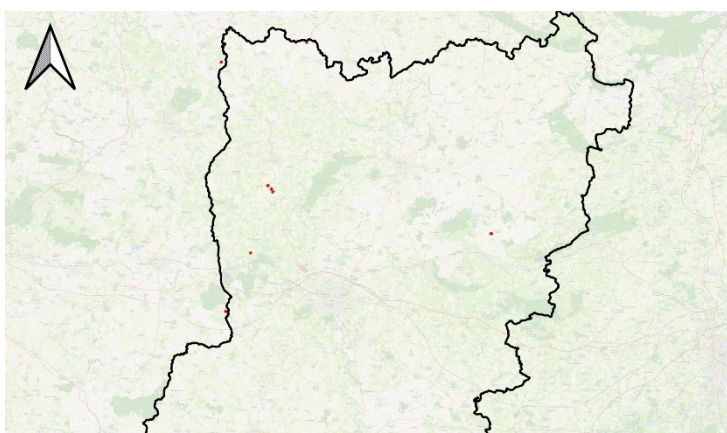
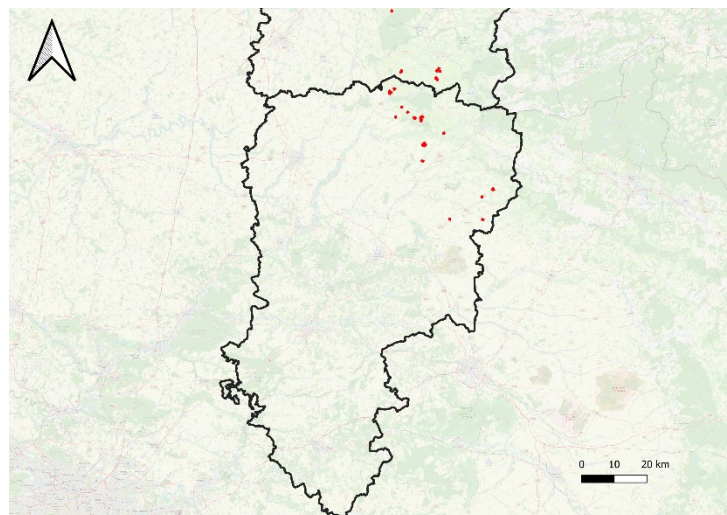
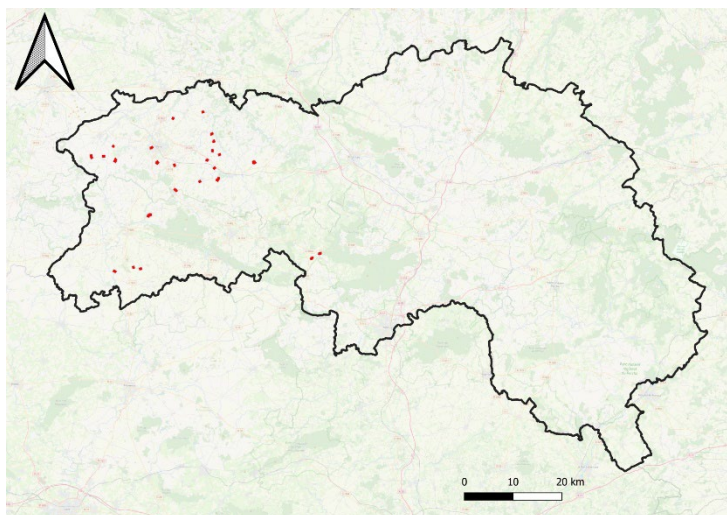


Figure 3 : Carte des haies mesurées respectivement pour l'Orne, les Hauts de France, la Mayenne et la Bourgogne

Ce protocole implique de récupérer un très grand nombre de données et de les saisir sur la base de données Access. Une estimation des coûts a été réalisée pour l'application du protocole pour 10 haies, de l'obtention des références jusqu'à la saisie des données (Figure 4). Cette estimation est réalisée par la SCIC Bois Bocage Energie, et peut varier sur certains aspects selon les opérateurs. Ainsi, il est estimé une nécessité de 61 jours pour la mesure de 10 haies. De plus, l'application du protocole est simplifiée lors de la prise des mesures en étant à deux opérateurs. Ce protocole est donc lourd à réaliser mais permet une saisie d'un grand nombre de variables. L'objectif principal du projet est de simplifier ce protocole à la prise des données essentielles pour les modèles.

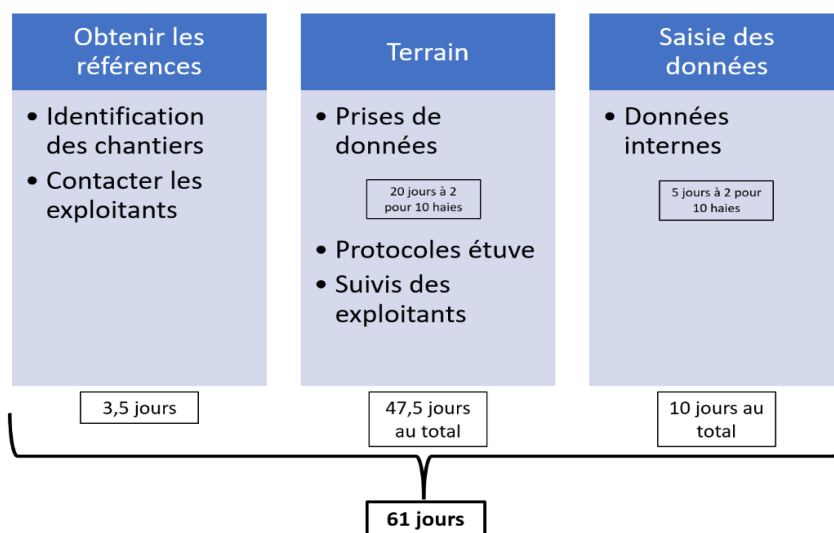


Figure 4 : Représentation des coûts journalier pour la mesure et la saisie de 10 haies.

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 29 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 46 haies. L'analyse de la situation géographique des haies et de leur représentativité pédoclimatique sur les territoires a été réalisée dans la partie 3 de cette présente étude par SOLAGRO.

2.2 – Déroulé du projet

2.2.1 — Organisation mise en place

La SCIC Bois Bocage Energie était en charge, avec l'AFAC-Agroforesteries de la réalisation de la partie : Quantification de la biomasse des haies et leur capacité de stockage de carbone dans la partie aérienne par des mesures de cubage

L'AFAC Agroforesteries avait un rôle de coordination des acteurs et de l'action, mise en forme et rédaction de certaines parties du rapport. Participation et animation des différents temps d'échange entre les partenaires de l'action.

SCIC Bois Bocage Energie : **Moyen humain** : Dans un premier temps, un salarié était responsable de l'animation et du suivi du projet. De plus, ce projet a permis l'obtention d'un apprentissage, permettant son suivi par une personne dédiée au projet pendant 1,5 ans. Ensuite, un salarié a pris le relais sur la deuxième moitié du projet. Le temps passé est récapitulé dans la figure 4.

Travail réalisé :

- Participation à la réalisation du protocole de prise de données terrain.
- Prise de données terrain sur deux années d'exploitation. Matériel utilisé : compas forestier, télémètre, roulette de mesure, location de pesons.
- Création de la base de données.
- Analyse statistique et création des méthodes et modèles de cubage.
- Présentation et valorisation des résultats et participation aux temps d'échange.

SCIC Mayenne Bois Energie : Prise de mesures terrain de haies sur une année d'exploitation et participation à des temps d'échange.

CPIE Yonne et Nièvre : Prise de mesures terrain de haies sur deux années d'exploitation et participation à des temps d'échange.

AAAT : Prise de mesures terrain de haies sur deux années d'exploitation et participation à des temps d'échange.

2.2.2 — Étapes

Cette partie a débuté en octobre 2020. Initialement, les prises de mesures devaient s'étaler sur une seule saison hivernale.

	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08
Échantillonnage		Choix des sites d'étude et recherche des haies échantillonnées (avec gestion et chantier)										
Biomasse et Carbone aérien			Mesures de cubage				Synthèse des données					

Finalement, à la suite d'un avenant signé avec l'ADEME co-financeur de l'étude, la prise de données a pu être élargie à 2 saisons hivernales.

Calendrier final :

Année	2020			2021												2022												
Mois	19/10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08	09	19/10			
Échantillonnage	Choix des sites d'étude et recherche des haies échantillonnées (avec gestion et chantier)											Échantillonnage des haies complété et ajout territoire Mayenne														Rédaction rapport et restitution des résultats		
Biomasse et Carbone aérien				Mesures de cubage						Construction base de données et analyse des données et premiers modèles de cubage et référentiels				Mesures de cubage chantiers 2021 et nouveaux chantiers				Analyse des données et confortation des résultats			Rédaction rapport et restitution des résultats							

PARTIE 3 – RESULTATS

3.1 — Base de données Access : construction et contenu

L'élaboration de la base de données sous Access a amené la possibilité de créer un outil de saisie facilitant les relevés de données sur le terrain. En plus de sa capacité à stocker un grand nombre de données, le logiciel Microsoft Access présente des modalités permettant d'élaborer des formulaires. La visibilité des relations entre les tables et donc entre les variables a été facilitée par le MCD. Ensuite, les lignes de codes établies et associées à chaque bouton de commande, et la mise en page des formulaires effectuées ont permis de créer un outil pratique et utilisable sur le terrain (Figure 5).



Figure 5 : Illustration de l'outil de saisie sur Access.

L'ensemble des données sont stockées dans différentes tables. Cet outil permet d'extraire ces tables sous différents formats facilitant leur analyse statistique. Comme précisé précédemment, la base de données contient actuellement 98 haies. Un identifiant différent, nommé *id_haie*, est associé à chaque haie et permet de faire le lien entre chaque table.

3.2 — 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 6). Cela aurait nécessité un travail d'une ampleur énorme et beaucoup plus couteux en termes de temps de travail et d'organisation.



Figure 6 : Chantier d'abattage de bois avec tri de chaque partie des arbres (source : L.Nevoux).

3.2.1 — 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 5). 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 5 : Résultats du nombre de haies par typologie et par région.

	4 Taillis simple, cépées d'arbustes	5 Taillis simple, cépées d'arbres	6 Taillis simple, fureté de Hêtres	11 Futaie régulière, alignement de têtards	8 Taillis mixte, cépées d'arbres et d'arbustes	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 et cépées d'arbustes	22 Taillis sous futaie, hauts jets avec têtards et cépées d'arbres et d'arbustes
Orne	19	6	3	1	2	0	0	1	0	0	0
Mayenne	0	1	0	0	3	0	0	4	0	0	0
Bourgogne	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0
Nord	1	0	0	7	5	1	0	12	7	12	7

Les données permettent également d'obtenir des gabarits de haies en fonction de leur typologie (Tableau 6). Ces gabarits sont obtenus par des mesures sur 95 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 11 mètres, des largeurs au sol de 1,59 mètres et des largeurs au houppier d'environ 8 mètres. Pour les taillis mixtes, les dimensions moyennes sont un peu supérieures à celles des cépées d'arbres.

Hypothèse : Cela peut être dû à la région de prises de données. En effet, les accroissements annuels ne sont pas les mêmes dans chaque région. En présence de têtards, les hauteurs moyennes sont situées autour de 13 mètres pour des largeurs au houppier plus proche des 10 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 (6, 16 et 17), il est impossible d'obtenir des estimations satisfaisantes car trop peu de données ont été relevées.

Tableau 6 : Résultats des gabarits de haies en fonction de leur typologie.

	3 Taillis simple, cépées d'arbustes	4 Taillis simple, cépées d'arbres	5 Taillis simple, fureté de Hêtres	10 Futaie régulière, alignement de têtards	7 Taillis mixte, cépées d'arbres et d'arbustes	15 Taillis sous futaie, hauts jets avec cépées d'arbustes	16 Taillis sous futaie, hauts jets avec cépées d'arbres	17 Taillis sous futaie, hauts jets avec cépées d'arbres et d'arbustes	18 Taillis sous futaie, têtards avec cépées d'arbustes taillés sur les 3 faces	19 Taillis sous futaie, têtards et cépées d'arbustes	21 Taillis sous futaie, hauts jets avec têtards et cépées d'arbres et d'arbustes
hauteur moy	7,54	11,13	11,09	12,95	12,38	15,00	12,00	11,39	13,14	13,22	11,75
hauteur médiane	7,41	10,00	12,28	12,70	11,70	15,00	12,00	10,84	13,93	13,67	11,23
larg_sol moy	0,96	1,59	1,51	1,14	1,14	1,80	1,40	1,33	1,07	1,36	0,85
larg_sol médiane	0,74	1,57	1,20	1,18	1,22	1,80	1,40	0,86	1,00	0,90	0,72
larg_houp moy	7,13	8,22	7,95	10,18	8,35	14,87	8,80	7,81	9,80	9,00	9,79
larg_houp médiane	7,08	7,66	8,80	11,05	7,61	14,87	8,80	6,86	9,70	9,30	8,52

3.2.2 — Caractérisation de la productivité des haies

Enfin, ces données permettent des premières 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 67 haies. En effet, Sur les 95 haies précédentes, les mesures liées au déchiquetage n'ont pas pu être relevées, soit parce que le chantier avait été annulé ou reporté, par absence de technicien lors du déchiquetage pour relever le tonnage, ou soit par non-respect des marquages lors de la coupe.

Par ces données, on obtient **qu'en moyenne sur les sites de références de l'étude, les haies produisent 18,43 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 7). **On note donc que 100 mètres de cépées d'arbustes produit en moyenne 13,5 tonnes de plaquettes vertes alors que 100 mètres de cépées d'arbres en produisent le double (26,5 tonnes).** Cependant, les médianes sont assez proches entre elles. Cela peut être dû au fait d'essences différentes ou de cycles de productions différents créant des valeurs plus grandes. Nous relevons cependant qu'un taillis mixte produit la même quantité de bois qu'un taillis d'arbustes.

Hypothèse : Cela peut être dû à une concurrence entre les cépées (ombrage des cépées d'arbres ou les têtards sur les cépées d'arbustes) qui fait qu'en moyenne, on se rapproche plus du taillis d'arbustes. Cela peut également être dû à des essences différentes. Pour les haies de têtards, il est observé que 100 mètres de haie produit en moyenne 20 tonnes de plaquettes vertes.

Tableau 7 : Productivités moyennes et médianes des haies en bois déchiqueté en tonne humide pour 100 ml en fonction de leur typologie.

	3 Taillis simple, cépées d'arbustes	4 Taillis simple, cépées d'arbres	5 Taillis simple, fureté de Hêtres	10 Futaie régulière, alignement de têtards	7 Taillis mixte, cépées d'arbres et d'arbustes	15 Taillis sous futaie, hauts jets avec cépées d'arbustes	16 Taillis sous futaie, hauts jets avec cépées d'arbres	17 Taillis sous futaie, hauts jets avec cépées d'arbres et d'arbustes	18 Taillis sous futaie, têtards avec cépées d'arbustes taillés sur les 3 faces	19 Taillis sous futaie, têtards et cépées d'arbustes	21 Taillis sous futaie, hauts jets avec têtards et cépées d'arbres et d'arbustes
masse humide moyenne pour 100 m	13,47	26,54	9,44	17,84	13,44	19,37	22,80	22,99	20,11	19,10	20,06
masse humide médiane pour 100 m	13,99	14,01	9,44	19,01	9,20	19,37	22,80	22,20	18,33	16,39	20,31

Enfin, on a observé la productivité des haies en fonction de la zone géographique étudiée (Tableau 8).

Tableau 8 : Productivités moyennes et médianes pour 100 ml de haie en fonction de la région.

	Orne	Mayenne	Bourgogne	Nord

Nombre de haies	20	8	3	36
Masse humide moyenne (en tonne) pour 100 ml de haie	17,92	23,47	10,94	18,02
Masse humide médiane (en tonne) pour 100 ml de haie	14.36	23.19	5.07	17.29

L'analyse est réalisée sur 67 haies. On observe des rendements plus importants en Mayenne et très inférieure en Bourgogne. La productivité entre l'Orne et le Nord est identique. Cependant, les données sont à relativiser en Bourgogne car l'analyse se base sur 3 haies. Des données doivent compléter ces résultats pour plus de significativité.

Cependant, si cette comparaison permet d'avoir des informations intéressantes sur les productivités moyennes des haies en fonction des régions, on s'est intéressé à l'accroissement annuel (Tableau 9). 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 33 haies car tous les âges n'ont pas pu être récupérés lors des mesures terrain.

Tableau 9 : Productivité annuel en bois décheté en tonne humide pour 100 ml en fonction de la région.

	Orne	Mayenne	Bourgogne	Nord
Accroissement annuel moyen en tonne humide pour 100 ml de haie	1,05	1,18	?	0,97
Accroissement annuel médian en tonne humide pour 100 ml de haie	1,00	1,20	?	0,98

Nous n'avons pas pu obtenir l'accroissement en Bourgogne car l'âge n'a pas été relevé et le nombre de résultat n'est pas assez important. Il est observé que l'accroissement annuel en Mayenne est très légèrement supérieur à celui de l'Orne qui est lui-même très légèrement supérieur à celui du Nord. Or, la productivité pour 100ml était supérieure pour le Nord par rapport à l'Orne. On en déduit que les haies du Nord ont été récoltées à des âges plus importants que celles de l'Orne.

Hypothèse : La Mayenne a déjà terminé son premier cycle de gestion et les haies mesurées sont des haies déjà exploitées et recépées suivant les bonnes conduites permettant d'augmenter la bonne reprise des brins (estimation dans la bibliographie d'une productivité accrue de 20%). Cela pourrait expliquer un accroissement légèrement supérieur.

Ces résultats confirment les cycles de production de 10-15 ans qui sont aujourd'hui utilisés dans les Plans de Gestion de Haies. Cela donne des références et des pistes pour compléter ces données par des accroissements dans d'autres régions de France afin d'ajuster les cycles de production.

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 1,8 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.

RÉPARTITION DES POINTS AUTOUR DE LA MOYENNE DE L'ACCROISSEMENT ANNUEL POUR LES 3 RÉGIONS CONCERNÉES

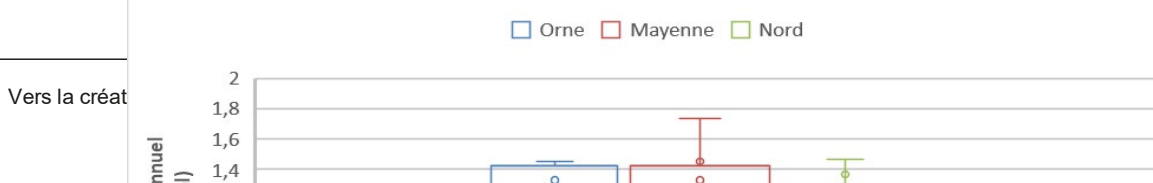


Figure 7 : Répartition des points autour de la moyenne de l'accroissement annuel pour les 3 régions concernées.

Ces données correspondent à des données d'observation issues de mesures terrain. Nous avons donc obtenu ces résultats d'accroissements annuel pour chaque typologie de haie (Tableau 10). Les données obtenues par l'étude antérieure dans le Grand Ouest était de 0,34 tonnes humide / an / 100 ml de haie pour les taillis d'arbustes et de 0,8 pour les taillis d'arbres. Ces données sont très éloignées pour les taillis d'arbustes. Cela pose la question de la typologie des haies. Nous ne savons pas ce qui était considéré comme de l'arbuste. Dans nos données, on observe que les taillis d'arbustes et d'arbres ont des accroissements proches. Cela signifie qu'en moyenne, les cycles de productions sont identiques. Pour les cépées d'arbres, il y avait plus de valeurs extrêmes en termes de production. Nous ne retrouvons pas ces valeurs extrêmes pour l'accroissement. Cela signifie que pour certains taillis d'arbres, la récolte s'est faite sur des cycles plus longs. L'influence du contexte géographique doit être vérifié dans la partie réalisée par Solagro sur l'influence du contexte pédoclimatique sur les haies.

Tableau 10 : Accroissements annuels moyens et médians en tonne humide pour 100 ml de haie par typologie de haie.

	3 Taillis simple, cépées d'arbustes	4 Taillis simple, cépées d'arbres	5 Taillis simple, fureté de Hêtres	10 Futaie régulière, alignement de têtards	7 Taillis mixte, cépées d'arbres et d'arbustes	15 Taillis sous futaie, hauts jets avec cépées d'arbustes	16 Taillis sous futaie, hauts jets avec cépées d'arbres	17 Taillis sous futaie, hauts jets avec cépées d'arbres et d'arbustes	18 Taillis sous futaie, têtards avec cépées d'arbustes taillés sur les 3 faces	19 Taillis sous futaie, têtards et cépées d'arbustes	21 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	1,09	1,21	0,45	0,86	0,89	NA	NA	1,32	1,18	1,12	NA
Accroissement annuel median en tonne humide pour 100 ml de haie	1,10	1,03	0,45	0,95	0,90	NA	NA	1,30	1,18	1,17	NA

3.3 — Référentiels et éléments de conversion

Un des objectifs de ce travail est de vérifier les référentiels sur lesquels la majorité des opérateurs se basent. Comme indiqué en Etat de l'art, ces données sont vieillissantes et présentent des limites dans leur méthode d'obtention. Les deux éléments de conversion que cette étude à la capacité de vérifier sont les conversions des tonnages en m3 en tonnes de

bois vert et la conversion des tonnages de tonnes vertes en tonnage anhydre (0 % d'humidité). Il s'agit des données indiquées dans le tableau suivant (Tableau 11) :

Tableau 11 : Tableau utilisé pour les coefficients de conversion entre unités et coefficients vérifiées indiqué par des cercles.

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

Il aurait été possible de vérifier également les éléments de conversion concernant le m3 de bois sur pied. Cela n'a pas été réalisé par manque de temps et complexité de mise en place. Ce projet s'est penché sur les unités principalement utilisées par les opérateurs de terrain. Les données contenues dans la base peuvent permettre d'estimer le cubage de m3 de bois sur pied en reprenant les méthodes utilisées dans le tarif de l'IGN.

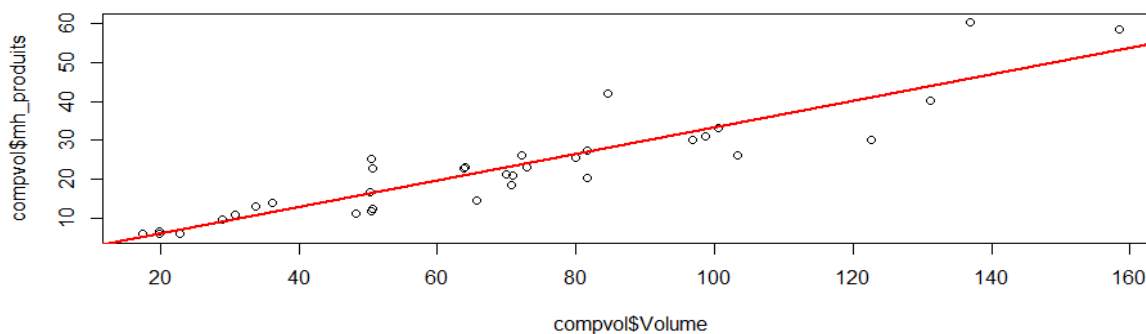
3.3.1 — Régression linéaire entre les volumes et tonnages verts

La comparaison est réalisée ici entre le tonnage pesé directement après le déchiquetage (en tonnes) et les volumes de bois à partir de la mesure des volumes de bennes. L'analyse est réalisée sur 34 données. En effet, la base de données a été ajustée car pour de nombreuses haies, nous ne disposons pas toujours soit des tonnages soit des volumes.

En réalisant un modèle permettant d'évaluer la corrélation entre ces deux variables, on obtient un modèle satisfaisant (Figure 8). Celui-ci fait ressortir un R² de 0,83 ce qui montre une bonne corrélation entre les volumes et les tonnages vert. La P_value, très inférieure à 0,05 permet de justifier d'une bonne significativité de ce résultat. De plus, l'analyse des résidus permet de justifier que le modèle est cohérent (Résidus indépendants, homogènes et qui suivent une loi normale) (Annexe 8). On obtient donc la formule suivante :

$$m_{humide} = 0,34025 \times Volume$$

L'ancienne référence utilisée était 0,33. Les résultats obtenus dans notre étude est proche de ce coefficient de conversion. En effet, les données mesurées dans les deux études sont assez proches car il s'agit de mesures chantiers.



P_value	R ²	Coefficient de corrélation
6.412e-14	0.8263	0.34025

Figure 8 : Graphique et modèle de corrélation entre la masse humide en tonnes humides de bois déchiqueté et le volume de bois déchiqueté en MAP.

3.3.2 — Régression linéaire entre tonnages verts et tonnages anhydres

La comparaison est réalisée ici entre le tonnage pesé directement après le déchiquetage (en tonnes) et les tonnages calculés à partir du taux d'humidité mesuré sur des échantillons. En effet, durant la prise de mesures, des échantillons de plaquettes ont été récupéré par chantier et mis à l'étuve afin d'obtenir un échantillon avec 0% d'humidité. Ce protocole permet de mesurer le taux d'humidité des plaquettes. L'analyse est réalisée sur 47 données. En effet, la base de données

a été ajustée car pour de nombreuses haies, nous ne disposons pas toujours soit des tonnages verts soit d'échantillons permettant de calculer le tonnage anhydre.

En réalisant un modèle permettant d'évaluer la corrélation entre ces deux variables, on obtient un modèle très satisfaisant (Figure 9). Ce dernier fait ressortir un R^2 de 0,98 ce qui montre une corrélation presque parfaite entre les tonnages vert et tonnages anhydres. La p_value très inférieure à 0,05 permet de justifier d'une bonne significativité de ce résultat. De plus, l'analyse des résidus permet de justifier que le modèle est cohérent (Résidus indépendants, homogènes et qui suivent une loi normale) (Annexe 9).

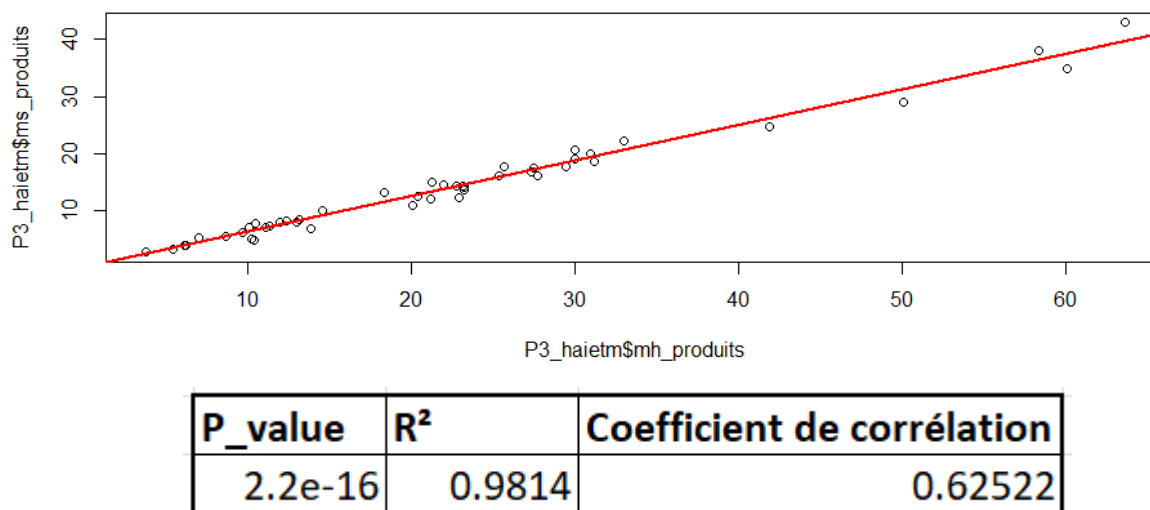


Figure 9 : Graphique et modèle de corrélation entre la masse anhydre en tonnes anhydres de bois décheté et la masse humide de bois décheté en tonnes humides.

On obtient donc la formule suivante :

$$manhydre = 0,62522 \times mhumide$$

L'ancienne valeur utilisée était 0,65. On obtient par notre étude un coefficient inférieur. Cela est dû au fait que l'ancienne étude utilisait la tonne sèche comme unité. Il s'agissait d'un bois à environ 25% d'humidité. Notre étude utilise des tonnes anhydres. L'utilisation de cette unité permet une meilleure précision. En effet, le taux d'humidité pour un bois anhydre est de 0% de manière certaine. Le bois sec, sur laquelle se base les anciens coefficients, peut avoir un taux d'humidité variable.

3.4 — Modèles de cubage

Un des objectifs principaux de ce travail est également de trouver une méthode simplifiée de cubage. Par la réalisation de modèles avec le logiciel de statistique R, on recherche des corrélations entre la masse humide obtenu 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. Il s'est avéré complexe de cuber les arbres de hauts-jet car difficile de prévoir les arbres exploités et ceux laissés sur pied. Dans les perspectives, il est à prévoir de compléter le travail par une méthode sur les hauts-jet.

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, nombre de brins seuls (cette dernière correspond à des éventuels hauts-jet non exploités, un type de haie n'étant jamais parfait). 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 29 haies. L'analyse de la figure 10 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.

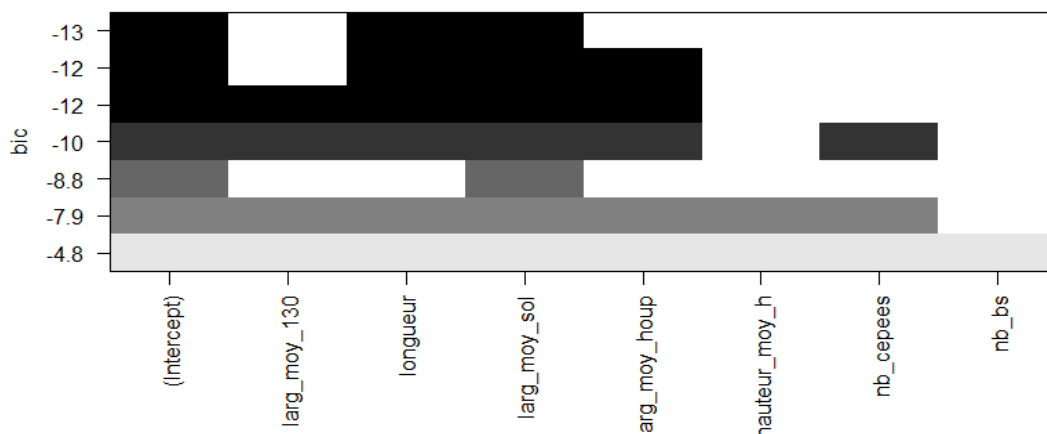


Figure 10 : Comparaison du niveau d'explication des variables par rapport à la masse humide par le critère BIC pour le modèle 1 des cépées basses.

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 et la longueur. La p_value est inférieure à 0,05, le résultat est donc significatif au seuil de 95% (Tableau 12). On obtient un R² de 0,47. Cela signifie que le modèle explique 47 % des valeurs de masse humide. Ainsi, pour ce premier modèle incluant uniquement les cépées : on obtient la formule suivante :

$$m_{humide} = 17,83503 \times larg_{sol} + 0,05601 \times longueur$$

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

Variable du modèle	Nombre de haies concernées	Variabes significatives	P value	R ²	Formule
Masse, larg_sol, larg 1.30, long, larg_houp, haut	29	Larg_sol, long,	0.0001218	0,4749	Masse = 17,83503 * larg sol + 0,05601 * longueur

Évaluation de la validité du modèle

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

Adaptation du modèle

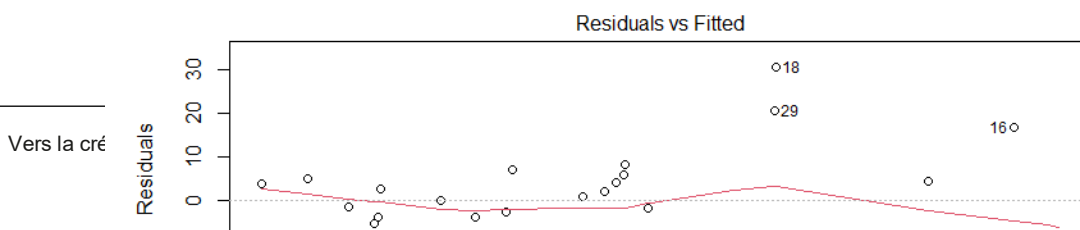


Figure 11 : Analyse de l'adaptation du modèle 1 avec les cépées basses.

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 11), 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.

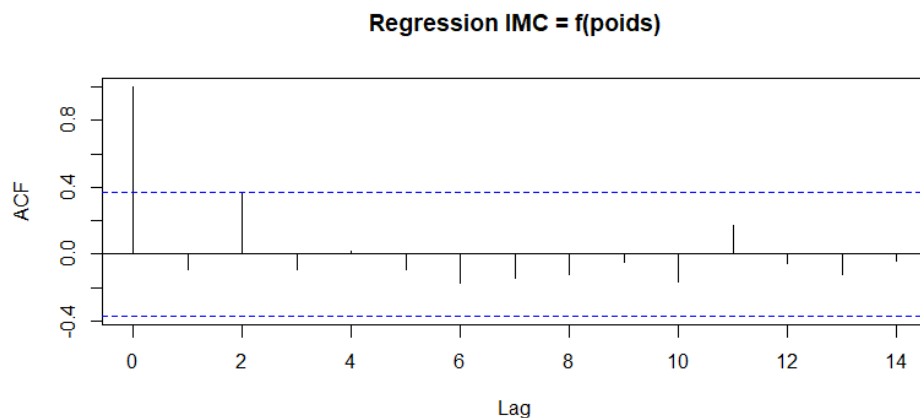


Figure 12 : Analyse de l'indépendance des résidus pour le modèle 1 des cépées basses.

Pour cela, on observe le graphique (Figure 12). 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 13).

Shapiro-wilk normality test

```
data: residuals(MF2_H5)
w = 0.94494, p-value = 0.1476
```

Figure 13 : 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 14).

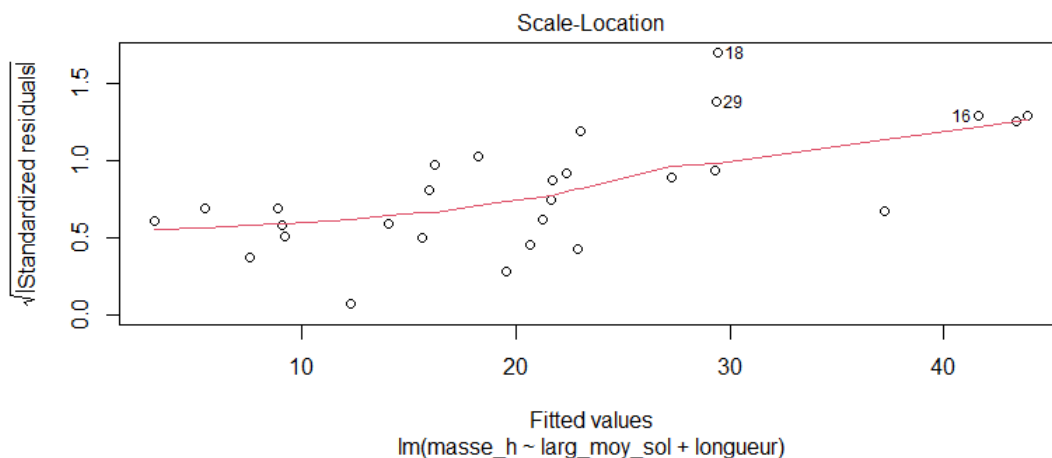


Figure 14 : Analyse de l'homogénéité des résidus pour le modèle 1 des cépées basses.

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

Nous pouvons donc conclure que notre modèle est valide.

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 46 haies. L'analyse de la figure 15 permet de comparer le niveau d'explication de chaque variable vis-à-vis de la masse humide et la significativité.

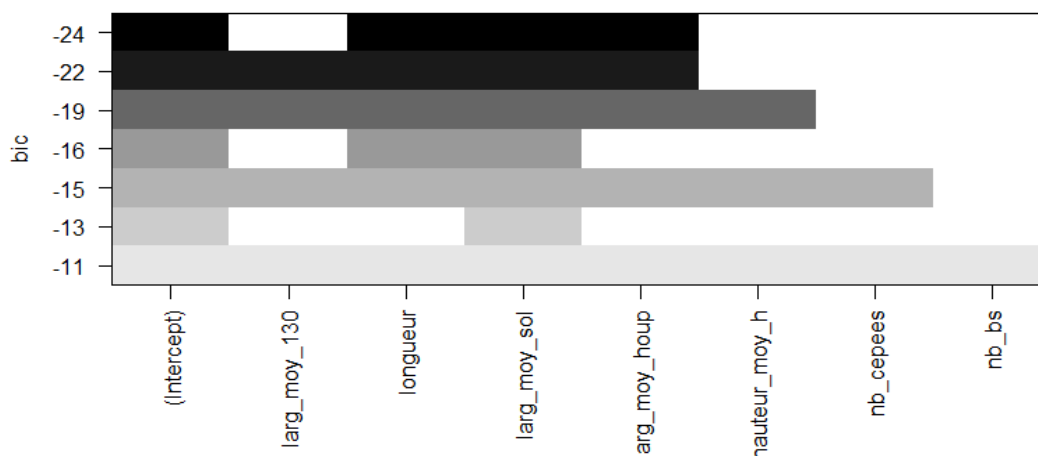


Figure 15 : Comparaison du niveau d'explication des variables par rapport à la masse humide par le critère BIC pour le modèle 3 des cépées basses et hautes.

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 R^2 de 0,51. Cela signifie que le modèle explique 51 % 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 premier modèle incluant uniquement les cépées : on obtient la formule suivante :

$$mhumide = 10,04251 \times larg_{sol} + 0,06809 \times longueur + 0,82625 \times larg_{houppier}$$

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

Variable du modèle	Nombre de haies concernées	Variabes significatives	P value	R ²	Formule
Masse, larg_sol, larg 1.30, long, larg_houp, haut	46	Larg_sol, long, larg_houp	4.326e-07	0,5087	Masse = 10.04251 * larg sol + 0.06809 * longueur + 0.82625 * larg houppier

Évaluation de la validité du modèle

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

Adaptation du modèle

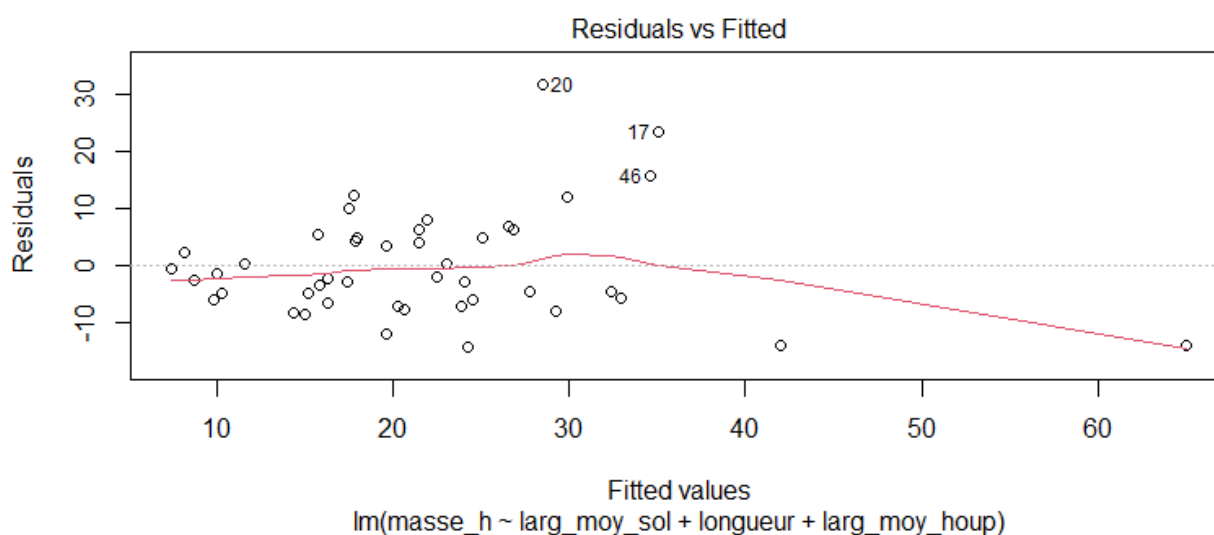


Figure 16 : Analyse de l'adaptation du modèle 2 avec les cépées basses et hautes.

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 16), 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 17). Il y a adéquation du modèle de régression si la p-value est supérieure à 0,05.

Rainbow test

```
data: MF3_H5
Rain = 1.1286, df1 = 23, df2 = 18,
p-value = 0.4015
```

Figure 17 : 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.

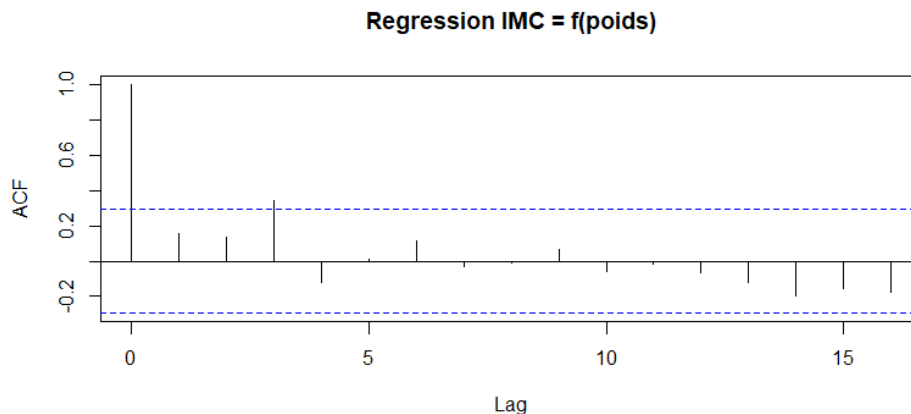


Figure 18 : Analyse de l'indépendance des résidus pour le modèle 2 des cépées basses et hautes.

Pour cela, on observe le graphique (Figure 18). 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 19). Il faut **une p-value supérieure à 0,05** pour avoir indépendance.

Durbin-watson test

```
data: MF3_H5
DW = 1.6305, p-value = 0.09592
alternative hypothesis: true autocorrelation
is greater than 0
```

Figure 19 : Test de Durbin-Watson pour tester l'indépendance des résidus du modèle.

C'est tout juste 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 20).

shapiro-wilk normality test

```
data: residuals(MF3_H5)
W = 0.92514, p-value = 0.00634
```

Figure 20 : Test de Shapiro pour tester la normalité des résidus pour le modèle 2 des cépées basses et hautes.

On obtient une p_value très légèrement inférieure à 0,05. Ce résultat est donc acceptable bien que non optimal.

Homogénéité des résidus

On observe enfin si les résidus sont homogènes. Pour cela, on observe le graphique 21.

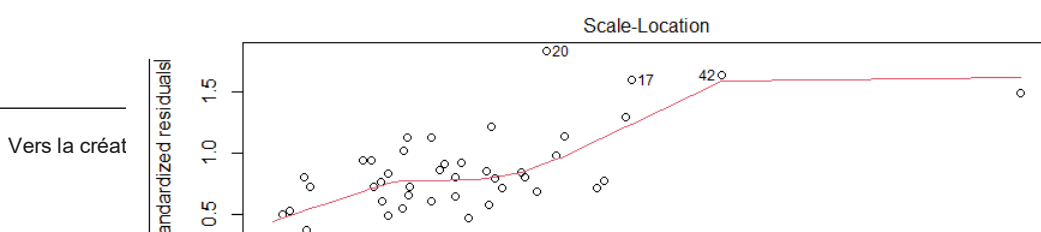


Figure 21 : Analyse de l'homogénéité des résidus pour le modèle 2 des cépées basses et hautes.

Pour qu'il y ai homogénéité, il faut que la courbe rouge soit le 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 le modèle.

Nous pouvons donc conclure que notre modèle est valide, mais nécessiterais des ajustements, par la prise de plus de données. En effet, avec plus de données, cela lisserait les erreurs de mesures et éventuellement nous permettrait d'éliminer certaines données aberrantes sans avoir un risque sur le nombre de données restantes.

3.5 — Proposition des méthodes simplifiées de cubage et d'obtention des référentiels

Le protocole de départ se voulait le plus complet possible du fait d'un très grand nombre de variables à mesurer sur le terrain. Cela était nécessaire car, au début du projet, le modèle souhaité n'était pas encore déterminé. L'objectif est bien d'obtenir une méthode de cubage simple sur pied. Avec les résultats obtenus, une méthode simplifiée apparait. En effet, avec une mesure de volume sur pied des haies avant abattage, il serait possible d'estimer la masse humide de plaquettes après déchiquetage. Les variables à mesurer serait donc la largeur au sol de la haie, la longueur et la largeur au houppier. Des ajustements pourront être réalisés en fonction de la facilité d'avoir les données. En effet, la largeur au houppier étant très corrélée à la hauteur de la haie, il serait possible de remplacer la prise de la largeur du houppier par la hauteur de la haie.

Nous avons finalement obtenu deux modèles. Un ne comprenant que les taillis bas et le deuxième incluant les taillis bas et les têtards. Les schémas suivants (Figure 22) présentent les variables qui seraient à mesurer sur le terrain avec la nouvelle méthode de cubage simplifiée.

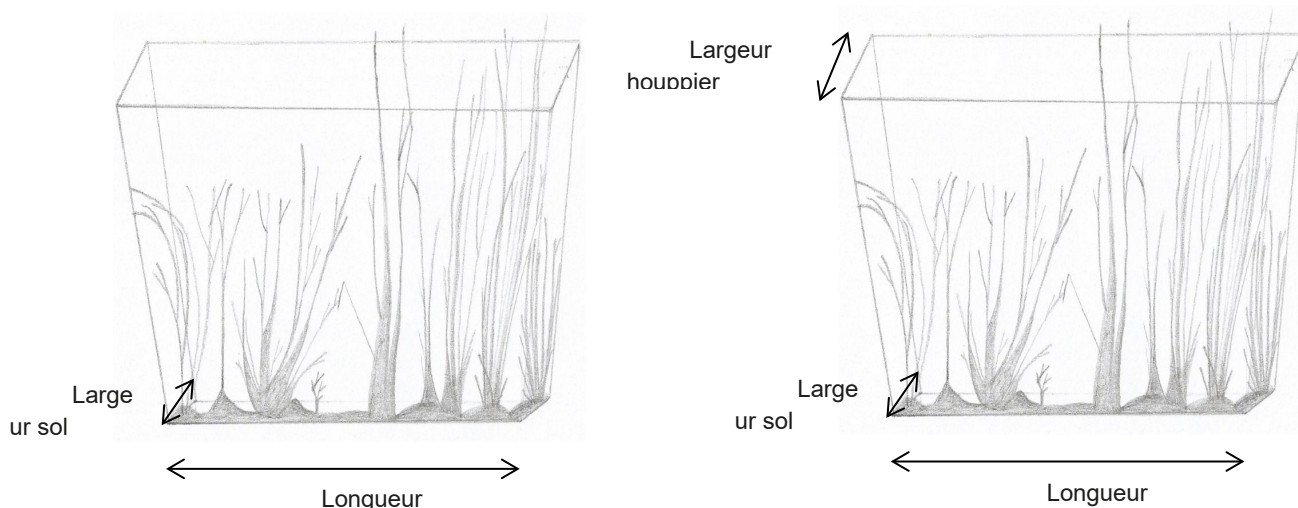


Figure 22 : Schémas de haies avec les mesures à prendre respectivement pour le modèle 1 avec les cépées basses (à gauche) et celui pour le modèle 2 avec les cépées basses et hautes (à droite).

Afin de continuer la validation de nos modèles, la méthode simplifiée doit continuer d'intégrer la prise du tonnage humide après déchetage. Enfin, pour la continuation de la validation des référentiels, la méthode doit également intégrer la prise des volumes et la prise des taux d'humidité sur des échantillons.

3.6 — Résultats de biomasse carbone

Il n'a pas été possible dans le temps imparti de vérifier les coefficients de conversion entre les MAP humide déchetés et les m3 de bois plein sur pied. Nous avons donc utilisé le coefficient 0,33 de l'étude Bouvier. Ensuite, à partir de ces données nous avons appliqué la méthode présentée dans la figure 23. Elles sont issues de l'étude Climafor de 2017 reprise dans la méthodologie Label Bas Carbone Haies.

CALCULER EQUIVALENCE EN CO2

(Source : Diagnostic carbone forêt, Étude de faisabilité Climafor 2017)

Vt : le volume total aérien en (m3)

$$Vt = _ \text{ m3}$$

Di : l'infradensité de l'essence i considérée (tMS/m3)

La valeur française de l'infradensité retenue pour les feuillus dans Carbofor est de (0,546 tMS/m3)

$$di = \frac{\text{Masse de bois anhydre}}{\text{volume de bois frais}} = _ \text{ tMS/m3}$$

Ba : la biomasse aérienne en tonnes de matière sèche (tMS)

$$Ba = Vt * di = _ \text{ tMS}$$

tC : le taux de carbone

Le rapport Carbofor (Loustau et al. 2004) préconise d'utiliser un coefficient de (0,475 tC/tMS)

$$Ba * tC = _ \text{ Tonne de carbone}$$

Qco2 : Equivalence en quantité de CO2

Multiplier le tonnage carbone par la masse molaire d'une molécule de CO2 (soit 44/12 soit environ 3,67).

$$Qco2 = tC * Ba * \frac{44}{12} = _ \text{ Tonne de co2}$$

Calculer (Qco2) directement via le volume total aérien (Vt)

$$Qco2 = Vt * di * tC * \frac{44}{12} = _ \text{ Tonne de co2}$$

$$Qco2(\text{moy feuillus}) = 1 * 0,546 * 0,475 * \frac{44}{12} \\ = 0,951 \text{ tonne de co2/m3}$$

Figure 23 : Méthode de calcul de la quantité de CO2 par m^3 de bois plein.

D'après nos données, la biomasse moyenne en Carbone pour 100 ml de haie est de 5,87 tonnes de CO2. La première étape est de comparer ces données avec les résultats issus du projet Carbocage (Tableau 14 et 15).

Tableau 14 : Biomasse de carbone moyenne et médiane en tonne de CO2 pour 100 ml de haie et par an.

	Orne	Mayenne	Bourgogne	Nord
Biomasse de carbone moyen en tonne de CO2 pour 100 ml de haie et par an	1,00	1,13	??	0,92
Biomasse de carbone médian en tonne de CO2 pour 100 ml de haie et par an	0,96	1,14	??	0,93

Tableau 15 : Référence de biomasse de carbone en teqCO2/km/an en fonction des types de haies.

En teqCO2/km/an	Haie pluristrate (Hpl)	Haie taillis (Ht)	Haie futaie (Hf)	Haie arbustive (Hb)
Biomasse totale (Ctotp)	5,90	8,90	9,98	1,80
Biomasse racinaire (Crap)	1,8	3,2	2,7	0,4
Biomasse aérienne restant sur place (Cnexpp)	1,89	0	4,85	1,4
Biomasse aérienne exploitée (Cexpp) <i>en option si exploitation</i>	4,41	11,40	4,85	0,00

Nous observons que dans nos résultats, nous sommes entre 0,95 et 1,13 tonnes de CO2 par an pour 100 mètres soit entre 9,5 et 11,3 tonnes de CO2 par an pour 1 km. Ces résultats sont assez proches de ceux issus du projet carbocage.

De plus, ces premiers résultats montrent une différence de quantité de carbone selon leur localisation géographique. S'il n'apparaît pas de différence significative entre l'Orne et le Nord, il apparaît qu'en Mayenne, la quantité de carbone pour 100 m de haie est plus importante. Cela est dû à un accroissement annuel en biomasse supérieur identifié précédemment. Cette hypothèse sera à vérifier avec le développement du Label Haie dans les groupes d'agriculteurs référents.

Discussion des résultats

Deux modèles d'estimation de la biomasse humide ont été établis : un premier modèle qui peut être appliqué sur les haies de taillis constituées de cépées d'arbres et/ou d'arbustes et un deuxième modèle qui peut être utilisé sur des haies constituées de têtards avec ou sans taillis associé.

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).

En quelque sorte le houppier de la haie est compris dans un parallélépipède de la forme d'un « moule à cake ». Indépendamment de la taille des branches, de la forme de la cépée ou de l'espèce mesurée, le volume de biomasse produite est déterminé par la place disponible au sein de la cépée et entre les cépées pour développer des branches en fonction de la lumière accessible. La formule permet de calculer ce volume déduit du volume des vides entre les branches.

La collecte complémentaire de mesure de haies dans des études futures permettra de préciser les coefficients des modèles proposés au fur et à mesure d'un travail de terrain complémentaire pour compléter le jeu de données.

Par ailleurs le travail n'a pu s'intéresser qu'aux haies de taillis ou têtards. Il faut compléter l'étude sur les arbres de hauts jets pour disposer d'une méthode simplifiée complète qui pourra s'appliquer à tous les types de haies en France.

3.7 – Liste et descriptif des livrables

Résultats sur la globalité des données :

- Le rapport restituant l'ensemble des méthodes et des résultats de l'étude
- Un webinaire de présentation des méthodes et des résultats de l'action 2.4 intitulé « Évaluation des stocks et flux de biomasse et carbone des haies - Méthodologie et premières références dans quatre régions de France » qui s'est déroulé le 19 janvier 2023. Ce webinaire a rassemblé plus de 250 inscrits, et son enregistrement est disponible sur le site de l'Afac-Agroforesteries (<https://afac-agroforesteries.fr/webinaire-3/>);

Pour le transfert aux acteurs utilisant le modèle :

Au début du projet, l'objectif de rendre les données chiffrées et les méthodes accessibles aux opérateurs de terrain était défini. Un format de présentation sous forme de fiches a été choisi au cours du projet.

- Fiche présentation de l'ensemble de l'étude
- Fiche de présentation de la méthode simplifiée de cubage taillis et têtards : l'objectif de cette fiche est de décrire de manière précise les méthodes de cubage simplifiées obtenues dans cette étude pour les rendre accessibles et applicables facilement.
- Fiche des données référentiels : cette fiche résume de manière précise les principaux résultats chiffrés de mesures sur les haies, les mesures d'accroissement de biomasse et de carbone, ainsi que les coefficients de conversion obtenus.

Un livrable sous forme d'application de calcul rapide de biomasse était prévu. Cette dernière n'a pas pu être délivré à ce stade mais reste d'actualité ; notamment à intégrer dans l'application agriculteur PGDH.

Les supports chiffrés :

Dès le début du projet, l'importance de la transmission des données pour la continuité du projet avait été soulignée. Il s'agit de rendre disponible :

- La base de données des haies mesurées : Aujourd'hui, la base de données de l'ensemble des mesures est sur le logiciel Acces. L'objectif est de rendre accessible les données de l'étude sous un format à définir.
- Le script R des modèles : Celui-ci permet de continuer à développer les analyses statistiques déjà réalisées.

PARTIE 4 – PERSPECTIVES

4.1 — Suites envisagées

Un des premiers enjeux des suites de ce projet réside en la transmission des livrables. Ce travail est à réaliser à deux niveaux. Un premier sur la transmission et le rendu opérationnel des outils et un autre sur la vérification de nos référentiels et le développement de méthodes simplifiées. Ces perspectives sont résumées dans la figure 25.

- **Transmission des résultats**

Tout d'abord, au niveau du modèle final, l'objectif est de communiquer et restituer les résultats à large échelle. Cela consiste en la réalisation de webinaires, de formations ainsi que par le transfert de la méthode aux opérateurs terrain. Pour rendre opérationnel le projet, un outillage des opérateurs est indispensable. L'objectif sera de créer une base de données que chaque opérateur pourra faire vivre avec des mesures terrains. Un travail est donc nécessaire sur la manière d'héberger la base de données et de la partager pour la rendre accessible à tous. Une idée serait de passer par une application permettant la saisie directe de données et des calculs automatiques de biomasse et carbone. De plus, l'objectif serait d'associer cet outil de saisi à des outils déjà existants tel que l'outil de Plan de Gestion Durable des Haies (PGDH) déjà fonctionnel ou la Géohaie (géoplateforme de données référencées sur les haies) en cours de création avec l'IGN.

- **Poursuite du travail**

- **Acquisition de références France entière et poursuite travail méthodologie de cubage**

L'objectif étant d'obtenir une méthode simplifiée sur la biomasse et le carbone aérien et dans les sols, le premier travail doit être une continuation de la mise en relation avec les travaux de l'INRAE sur le carbone dans les sols. Leur travail se basant sur une sous partie de notre échantillon total, un travail commun, déjà débuté durant tout le projet, permettra d'arriver à des référentiels généraux et une méthode commune. Ensuite, par l'analyse et le lien avec le travail réalisé par SOLAGRO sur les contextes pédoclimatiques, une méthode d'échantillonnage simplifiée peut être déterminée pour développer ces modèles à l'échelle nationale, en déterminant des zones pédoclimatiques délimitées pour la saisie des données. L'objectif est ici de faire le lien entre la productivité en biomasse et carbone des haies avec leur contexte géographique. Enfin, il est nécessaire de continuer la prise de données pour compléter l'échantillon. On retrouve deux échelles de travail. La première consiste à obtenir plus de données complètes lorsque cela est possible afin d'affiner notre modèle et le rendre plus précis. Ce travail pourra se réaliser par des structures disposant déjà de groupes d'agriculteurs organisés et bien suivis, ce qui facilite la prise de données précises. Le deuxième niveau consiste à obtenir des mesures simplifiées afin d'appliquer notre modèle et le vérifier à large échelle. De plus, un élargissement est nécessaire. En effet, un travail similaire doit être réalisé sur les arbres de hauts-jets afin d'être en mesure de cuber l'ensemble des typologies de haies. Enfin, d'autres facteurs n'ont pas été pris en compte et devront être intégrés dans les futures méthodes. Il s'agit notamment de la prise en compte de la dégradation mécanique des haies, entraînant une perte de biomasse.

Pour élargir cette méthode, y compris géographiquement, il sera nécessaire également de mobiliser l'ensemble des acteurs en développant la capacité d'organisation et simplifier la mesure de chantiers. En effet, nous avons déterminé le coût journalier d'un tel protocole. La figure 24 détermine une estimation du coût journalier en appliquant la méthode simplifiée. La diminution du temps intervient surtout sur les mesures terrains (du fait du nombre plus faibles de données à récupérer), et sur la saisie des données qui sera facilitée par une application. Cependant, un temps de mobilisation des acteurs et de suivis des chantiers ne doit pas être négligé car c'est cela qui permet souvent la précision et complétude des données. En comparaison avec le protocole initial, ce protocole permettrait de diminuer le temps de travail de 40 % (37 jours au lieu de 61). Cette estimation ne prend pas en compte, pour les structures porteuses de projets, les temps de

coordination d'acteurs préalable et les temps de restitutions finaux. De plus, pour obtenir suffisamment de données

significatives, un travail sur un an est impossible. Ce protocole doit être mis en place idéalement sur 3 ans, minimum sur 2 ans.

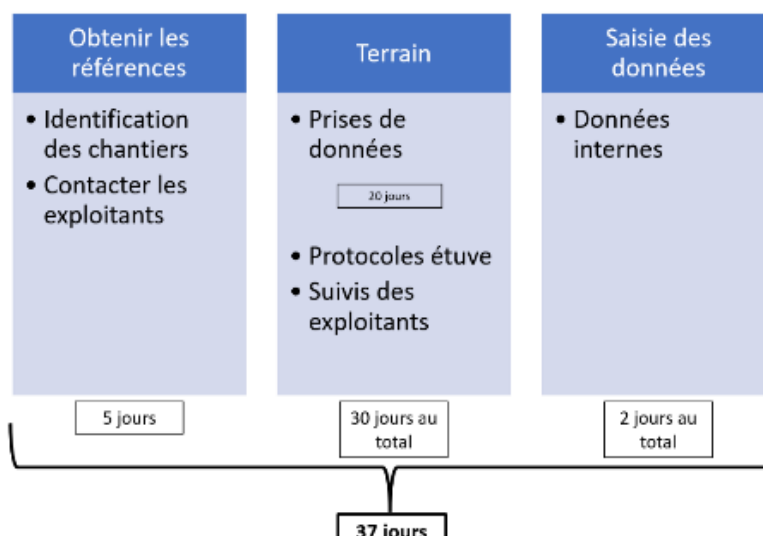


Figure 24 : Estimation du coût journalier en appliquant la méthode simplifiée pour la prise de mesure de 10 haies.

<p>Communication, formation avec la méthode de cubage simplifiés « taillis » construite dans projet Resp'haies-ADEME pour les valorisations actuelles :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Restituer largement les résultats - Mettre en place des journées d'échanges et de formation - Transfert méthode 	<p>Consolidation modèle de cubage simplifié des taillis et établissement d'un tarif sur les arbres de hauts jets :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Acquérir de nouvelles données exhaustives de comparaison cubages / chantiers - Voir si possible de simplifier la vérification données chantiers - Faire un travail similaire sur les arbres de hauts jets - Perte de biomasse / haies dégradées
<p>Référentiel France biomasse – production et accroissement :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Échantillonnage - localisation - Mobilisation des acteurs – capacité d'organisation - Phasage - Niveau de précision référentiel produit 	<p>Outillages des opérateurs et capitalisation des données:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Collecte de la données biomasse à différentes échelles de production fines (mesures maîtrisées) et générales (données chantier agriculteurs) - Hébergement, accès base de données - Création application calcul automatique

Figure 25 : Perspectives et suites à donner au projet Biomasse

- extrapolation évaluation de production total des haies en France

Un travail en partenariat avec l'IGN a été commencé dans ce projet. Celui-ci est à poursuivre et approfondir. Tout d'abord, le lien peut se poursuivre sur l'analyse statistique, notre base de données étant accessible. Ensuite, un travail doit être fait sur la comparaison entre les données obtenues dans notre projet et le tarif de cubage développé par l'IGN. Il serait également possible de réaliser le lien entre les caractéristiques des haies obtenues par leur méthode et les données mesurées dans notre échantillon. A partir de cela, une méthode de mesures en commun pourrait être développée, du fait que les données présentées dans nos modèles de cubage sont des données facilement relevables. De plus, des croisements de données seraient possible. Une collaboration est à étudier pour cuber les arbres de hauts-jet. De plus, à partir de notre projet, l'IGN serait en mesure d'intégrer l'accroissement annuel dans leur modèle. Enfin, un des enjeux principaux des suites du travail est que notre base de données puisse intégrer la base GéoHaie de l'IGN.

4.2 – Éléments évaluatifs

4.2.1 — Difficultés rencontrées

La prise de données ne pouvant se faire que sur la période d'exploitation soit sur la partie hivernale, la durée initiale était trop courte pour avoir un nombre suffisant de données. L'allongement du projet a permis d'obtenir un échantillon significatif de mesures.

De plus, il s'est avéré que les prises de données étaient facilitées dans des régions où un réseau d'agriculteurs était déjà bien construit et suivi. Dans certaines régions, une structuration était nécessaire au préalable. C'est pourquoi il y a peu de données dans la région Bourgogne Franche Comté mais ce projet a permis le développement d'un raisonnement autour de la haie.

De plus, même dans les régions ayant un réseau développé, les acteurs étaient soumis à des conditions météorologiques pas toujours favorables et parfois des annulations de chantiers d'exploitation. Enfin, la rotation de différents acteurs au sein des structures étaient également une difficulté.

4.2.2 — Analyse d'impact du projet sur les différents publics cibles

Ce projet sera utilisable par les opérateurs de terrains et les agriculteurs en remettant à jour leur référence de cubage et en fournissant une méthode rapide de cubage des haies de certaines typologies.

4.2.3 — Indicateurs de suivis

Indicateurs prévus dans le projet	Réalisations finales
4 territoires pédo-climatiques dans 4 régions de France	4 territoires dans trois régions étudiées : Normandie (Orne) Bourgogne (Nièvre et Yonne) Hauts de France (Aisne et Nord) Pays de Loire (Mayenne)
160 haies mesurées en biomasse sur 100 mètres linéaires de long	98 haies mesurées
Nombre d'acteurs rencontrés et de projets recensés;	5 méthodes trouvées : (Bretagne/côte d'Armor/Sarthe/Poitou/Normandie/Auvergne) + bibliographie existante
Nombre de réunions avec les principaux acteurs	17 réunions dont un séminaire de 2 jours pour présentation et échanges sur les résultats
Rapport de connaissances sur les outils utilisés	Réalisé – cf état de l'art

4.2.4 — Indicateurs de résultats

Livrables prévus	Livrables réalisés
L2.41 Rapport sur l'identification des intérêts et difficultés méthodologiques de l'évaluation du gisement de biomasse et stockage de carbone bocagers à partir des données disponibles (données issues de traitements numériques et de photo-interprétation, données descriptives et quantitatives de la biomasse et carbone collectées)	Réalisé
L2.42 Production d'un premier référentiel d'accroissement annuel de biomasse et stockage de carbone des haies dans différentes situations en France.	Produit avec fiche de synthèse de présentation des résultats rédigée
L1.11 Un guide méthodologique de cubage et de productivité des haies	Guide complet réalisé avec tableau de données - Méthode simplifiée avec fiche de synthèse de présentation rédigée
L1.12 cahier des charges d'une base de données qui pourra être alimentée avec les données produites lors de chantiers futurs, en appliquant la méthodologie de cubage et de productivité	<p>La base de données des haies mesurées : Aujourd'hui, la base de données de l'ensemble des mesures est sur le logiciel Acces. L'objectif est de rendre accessible les données de l'étude sous un format à définir.</p> <p>Le script R des modèles : Celui-ci permet de continuer à développer les analyses statistiques déjà réalisées.</p>

PARTIE 5 – ANNEXES

Bibliographie

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

Table des figures

Figure 1 : idée de cheminement de récolte des données.	13
Figure 2 : schéma de certaines données à mesurer sur le terrain.	14
Figure 3 : Carte des haies mesurées respectivement pour l'Orne, les Hauts de France, la Mayenne et la Bourgogne	18
Figure 4 : Représentation des coûts journalier pour la mesure et la saisie de 10 haies.	19
Figure 5 : : Illustration de l'outil de saisie sur Access.	20
Figure 6 : Chantier d'abattage de bois avec tri de chaque partie des arbres (source : L.Nevoux).	21
Figure 7 : Répartition des points autour de la moyenne de l'accroissement annuel pour les 3 régions concernées.	25
Figure 8 : Graphique et modèle de corrélation entre la masse humide en tonnes humides de bois déchiqueté et le volume de bois déchiqueté en MAP.	26
Figure 9 : Graphique et modèle de corrélation entre la masse anhydre en tonnes anhydres de bois déchiqueté et la masse humide de bois déchiqueté en tonnes humides.	27
Figure 10 : Comparaison du niveau d'explication des variables par rapport à la masse humide par le critère BIC pour le modèle 1 des cépées basses.	28
Figure 11 : Analyse de l'adaptation du modèle 1 avec les cépées basses.	29
Figure 12 : Analyse de l'indépendance des résidus pour le modèle 1 des cépées basses.	30
Figure 13 : Test de Shapiro pour tester la normalité des résidus pour le modèle 1 des cépées basses.	30
Figure 14 : Analyse de l'homogénéité des résidus pour le modèle 1 des cépées basses.	31
Figure 15 : 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.	31
Figure 16 : Analyse de l'adaptation du modèle 2 avec les cépées basses et hautes.	32
Figure 17 : Test de Rainbow pour vérifier l'adéquation du modèle.	33
Figure 18 : Analyse de l'indépendance des résidus pour le modèle 2 des cépées basses et hautes.	33
Figure 19 : Test de Durbin-Watson pour tester l'indépendance des résidus du modèle.	34
Figure 20 : Test de Shapiro pour tester la normalité des résidus pour le modèle 2 des cépées basses et hautes.	34
Figure 21 : Analyse de l'homogénéité des résidus pour le modèle 2 des cépées basses et hautes.	34
Figure 22 : Schémas de haies avec les mesures à prendre respectivement pour le modèle 1 avec les cépées basses (à gauche) et celui pour le modèle 2 avec les cépées basses et hautes (à droite).	35
Figure 23 : Méthode de calcul de la quantité de CO ₂ par m ³ de bois plein.	36
Figure 24 : Estimation du coût journalier en appliquant la méthode simplifiée pour la prise de mesure de 10 haies.	39
Figure 25 : Perspectives et suites à donner au projet Biomasse	39

Table des tableaux

Tableau 1 : Références utilisées aujourd'hui pour les changements d'unité.	7
Tableau 2 : Synthèse des références de productivité des haies continues existantes dans l'Ouest (synthèse Bouvier 2008).	7
Tableau 3 : Ordre de grandeur de productivité des haies de l'Ouest – travaux CAREN et Bouvier 2008	8
Tableau 4 : Indicateurs et caractéristiques pour le choix des haies à mesurer.	16
Tableau 5 : Résultats du nombre de haies par typologie et par région.	21
Tableau 6 : Résultats des gabarits de haies en fonction de leur typologie.	22
Tableau 7 : Productivités moyennes et médianes des haies en bois déchiqueté en tonne humide pour 100 ml en fonction de leur typologie.	23
Tableau 8 : Productivités moyennes et médianes pour 100 ml de haie en fonction de la région.	23
Tableau 9 : Productivité annuel en bois déchiqueté en tonne humide pour 100 ml en fonction de la région.	24
Tableau 10 : Accroissements annuels moyens et médians en tonne humide pour 100 ml de haie par typologie de haie.	25
Tableau 11 : Tableau utilisé pour les coefficients de conversion entre unités et coefficients vérifiées indiqué par des cercles.	26
Tableau 12 : Présentation du modèle de cubage trouvé avec les cépées basses.	29
Tableau 13 : Présentation du modèle de cubage trouvé avec les cépées basses et hautes.	32
Tableau 14 : Biomasse de carbone moyenne et médiane en tonne de CO ₂ pour 100 ml de haie et par an.	36
Tableau 15 : Référence de biomasse de carbone en teqCO ₂ /km/an en fonction des types de haies.	37

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 : l'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

Résumé :

Élaboration de méthodes simplifiées pour mesurer la production de biomasse et le stockage de carbone des haies en vue d'établir des références France entière.

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 sont faibles et ne permettent pas de réaliser des scénarios fiables pour valoriser ces services. Par ailleurs, pour collecter des références à grande échelle, les méthodes connues aujourd'hui sont souvent complexes et coûteuses à mettre en place. À partir d'un échantillon de 98 haies mesurées dans les 4 régions différentes (Normandie, Hauts-de-France, Pays de Loire et Bourgogne-Franche-Comté), les partenaires du projet ont modélisé des méthodes simplifiées de cubage des haies de taillis d'arbustes, d'arbres et de têtards, de mesure de stockage du carbone dans les sols des haies, et ont vérifié les coefficients de conversion utilisés par les opérateurs dans les mesures biomasse et ont étudié les facteurs (pédoclimatiques) qui influent sur les résultats afin de proposer des cadres d'échantillonnage. Par ailleurs, ils confirment ou apportent des données de références dans les territoires étudiés sur la productivité des haies (volume et accroissement, tonnage et compartiment de stockage de carbone).

À partir de ce travail, une diffusion d'une méthode simplifiée de mesure biomasse et carbone des haies peut être envisagé. Il est cependant nécessaire de poursuivre le travail pour affiner la robustesse des modèles, de compléter les méthodes biomasse sur les arbres de hauts jets et d'approfondir les mécanismes sur le stockage de carbone au pied des haies.

Pour citer ce rapport :

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

En savoir plus sur Resp'haies :

Le projet de recherche et développement RESP'HAIES (RESilience et Performances des exploitations agricoles liées aux HAIES) s'est déroulé de 2019-2022, avec la participation de onze organismes de la recherche, du développement et de l'enseignement dans l'objectif est de renforcer les connaissances sur la thématique des haies autour de quatre axes :

- **Action 1** - productivité et cubage des haies et apports de la géographie pour caractériser les haies,
- **Action 2** - services écosystémiques liés aux haies : biodiversité, ruissellement, carbone,
- **Action 3** - performances technico-économiques des exploitations agricoles liées aux haies,
- **Action 4** - conceptions et tests de séquences pédagogique sur les haies.

Retrouvez tous les résultats du projet sur <https://afac-agroforesteries.fr/resphaies/>

Projet soutenu par :



Le projet bénéficie également du soutien de :



Partenaires du projet :

