
Rapport de stage individuel

4^{ème} année

Production des premières références Hauts-de-France « Biomasse
et Revenu arboré » en agroforesteries

Institut Polytechnique UniLaSalle Beauvais

19 rue Pierre Waguet BP 30313 60026 Beauvais cedex



Tuteur entreprise :

Olivier Rey : Ingénieur d'études

David Grandgirard : Enseignant chercheur

Basile Fleury

UIT

2021-2022

Tuteur académique :

José Serrano

Table des matières

Table des figures :.....	4
Table des tableaux.....	4
0 – Un stage en agroforesterie au sein du projet SAFARRI	5
0.1 – Un stage à UniLaSalle Beauvais	5
0.2 - L’agroforesterie : l’avènement de l’agroécologie	5
0.3 – Le développement de l’agroforesterie, une pratique entre de bonnes mains	6
0.4 – Le projet dans lequel j’interviens : SAFARRI.....	6
1 – Les tarifs sur des arbres en agroforesterie comme moyen d’encourager la plantation	7
2 – Les modèles d’estimation de biomasse : plutôt empiriste ou mécaniste ?	8
2.1 - Les modèles les plus simples à mettre en place : modèles empiriques.....	8
2.2 - Les modèles mécanistes : un modèle peut-être trop compliqué à développer	8
2.3 - Le modèle allométrique	8
3 – Les modèles allométriques de biomasse déjà existants en agroforesterie à ce jour.....	9
4 – Le développement des modèles allométriques en agroforesterie intra parcellaire.....	10
5 – La parcelle expérimentale d’agroforesterie d’UniLaSalle	10
6 – Comment construire des modèles allométriques ?	12
6.1 – Échantillonnage	12
6.1.1 - Sur combien d’arbres s’appuyer pour créer un modèle suffisamment puissant ?.....	13
6.1.2 Quels arbres ?.....	13
6.2 - Terrain	14
6.2.1 - Modèle allométrique standard d’estimation de la biomasse fraîche d’un arbre	14
6.2.2 - Modèles intermédiaires d’estimation de la biomasse fraîche des compartiments d’un arbre	15
6.3 Les difficultés rencontrées durant la phase de terrain	16
8 – Le modèle pour le noyer hybride	17
8.1 – Modèle allométrique du noyer	17
8.2 – Validation du modèle	19
8.3 – Modèles compartimentaux	19
8.3.1 - Modèle pour une branche O1	19
8.3.2 - Modèle pour le tronc	20
8.3.3 - Perspectives pour les modèles compartimentaux	20
8.4 - Discussions / limites des modèles :	21

9 – Déploiement du modèle chez des agriculteurs en avance sur leur temps	21
11 – Conclusion : les prémices de la recherche en agroforesterie	22
12 – Un premier stage marqué par la découverte du milieu professionnel de l'ingénieur	22
Bibliographie.....	24
Annexes :	27

Table des figures :

Figure 1 : schéma représentant les services (SE) et dis services (DES) écosystémiques associés aux espaces arborés (Blanco et al., 2021).....	6
Figure 2 : Carte des modèles allométriques publiés pour l'agroforesterie (Globalloometree, 2022).	9
Figure 3 : Photo d'agroforesterie intraparcellaire (Chambre d'agriculture France, 2021)	10
Figure 4 : Comparaison de la croissance des arbres du marquis en fonction du plus grand arbre de chaque essence de la parcelle.	11
Figure 5 : Design d'implantation des témoins agricoles et forestiers et des lignes d'arbres agroforestiers sur la parcelle Le Marquis	12
Figure 6: Boite à moustache du pourcentage de feuilles sur une branche O1.....	17
Figure 7: Régression linéaire de la masse fraîche sans feuilles des noyers hybrides en fonction du $DBH^2 \cdot H$	18
Figure 8 : Nuage de points représentant le $DBH^2 \cdot H$ d'un arbre en fonction de sa masse fraîche sans feuilles	18
Figure 9 : Cartes représentant les parcelles d'agroforesterie des agriculteurs rencontrés ainsi que la masse estimée de leurs noyers hybrides	22

Table des tableaux

Tableau 1 : Grille TBS : grille de vérification de l'état sanitaire d'un arbre	14
Tableau 2 : Modèle d'estimation de la masse fraîche totale des feuilles d'un arbre	18
Tableau 3: modèle d'estimation de la masse fraîche totale d'un arbre sans feuilles	18
Tableau 4: Modèle d'estimation de la masse fraîche d'une branche O1 avec feuilles	19
Tableau 5: Modèle d'estimation de la masse fraîche d'une branche O1 sans feuilles.....	20
Tableau 6 : Modèle d'estimation de la masse fraîche du tronc d'un arbre	20

0 – Un stage en agroforesterie au sein du projet SAFARRI

0.1 – Un stage à UniLaSalle Beauvais

Mon stage de quatrième année d'école d'ingénieur au département Aménagement et Environnement à Polytech Tours a eu lieu, du 25 avril au 15 juillet 2022, au sein de l'Institut Polytechnique UniLaSalle à Beauvais, une école d'ingénieur privée en agronomie située dans les Hauts-de-France. J'ai été encadré dans l'entreprise par Olivier Rey (Tuteur professionnel), David Grandgirard, le premier étant ingénieur d'étude débutant en agroforesterie et avec une expérience de cinq ans dans l'agroécologie. Le second est enseignant chercheur avec une expérience de douze ans dans l'agroforesterie. Du côté de l'université, j'ai été encadré par José Serrano, enseignant chercheur au département Aménagement et Environnement.

0.2 – L'agroforesterie : l'avènement de l'agroécologie

Selon sa publication au Journal Officiel de la République Française (JORF) n°0190 du 19 août 2015 l'agroforesterie est "mode de production agricole associant sur une même parcelle des plantations d'arbres à d'autres cultures, dans la perspective d'effets bénéfiques réciproques"(Commission d'enrichissement de la langue française, 2015).

L'agroforesterie est l'avènement de l'agroécologie, qui consiste en une intensification écologique des pratiques et des systèmes agricoles. Cette évolution dans la gestion de la ferme est nécessaire et ce depuis la course à la production initiée dans les années 50 en France. Produire une agriculture durable est indispensable pour faire face aux enjeux agricoles de demain (Guyomard et al, 2013). L'agroforesterie est un des modèles possibles à développer pour effectuer ce changement de pratiques agricoles (Guyomard, 2013). Le schéma ci-dessous représente les services écosystémiques apportés par les espaces arborés, mais aussi les dix services écosystémiques associés à ces espaces. Mais attention tous ces services ne sont pas valables ou alors ne sont que valables dans certaines conditions très précises. On retrouve beaucoup d'idées reçues dans les services écosystémiques apportés par l'agroforesterie et tous n'ont pas été scientifiquement démontrés. (Dupraz, 2018).

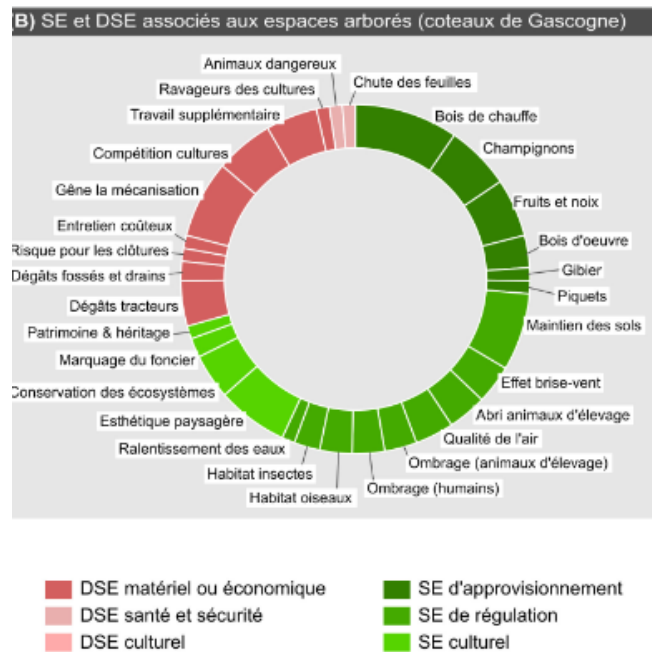


Figure 1 : schéma représentant les services (SE) et dis services (DES) écosystémiques associés aux espaces arborés (Blanco et al., 2021).

0.3 – Le développement de l'agroforesterie, une pratique entre de bonnes mains

En France, le développement de l'agroforesterie est soutenu par le Plan National pour l'Agroforesterie (PNF). Il a été initié à Paris en 2015 par le ministère de l'agriculture, de l'agronomie et des forêts et comporte cinq grands axes d'actions qui visent à promouvoir son développement en France et à l'international (Ministère de l'agriculture, 2015). Au niveau européen, les Hauts-de-France bénéficient d'un financement FEADER qui incite à la plantation d'arbres les agriculteurs de la région., que ce soit pour des alignements agroforestiers intraparcellaires ou pour des haies (Appel à projets « Plantons des haies et des arbres agricoles », 2022).

Suite au développement financier de l'agroforesterie, plusieurs fédérations regroupant les énergies de l'agroforesteries ont vu le jour. Le Réseau Mixte Technologique (RMT) Agroforesterie est un réseau de partenaires professionnels regroupant plusieurs domaines (conseillers, pépiniéristes, paysans, formateurs, techniciens, scientifiques, etc.) (RMT Agroforesteries, 2022). Il existe aussi des associations fédératives régionales, l'association française arbres champêtres et agroforesteries (AFAC – agroforesteries) qui possède un réseau associatif sur toute la métropole (AFAC Agroforesteries, 2022).

0.4 – Le projet dans lequel j'interviens : SAFARRI

Le projet SAFARRI (2021-2024) est un projet européen régionalisé de type Go PEI financé par les fonds FEADER et régionaux (Hauts-de-France, Agences de l'eau

AEAP/AESN) coordonné par UniLaSalle et Junia, qui est destiné en région à produire une gamme de références locales non encore existantes destinées à soutenir le développement des agroforesteries par la montée en compétences des acteurs locaux (Grandgirard, 2022 – communication personnelle). Mon travail s'inscrit au sein du work package (WP) n°2 coordonné par AAAT (Atelier Agriculture Avesnois-Thiérache) et UniLaSalle Beauvais. Mon stage s'inscrit donc au sein de deux objectifs :

- (i) La participation à l'élaboration et au déploiement d'une méthode fiable et rapide d'estimation par mesures allométrique (tarifs, abaques...) de la biomasse arborée des systèmes agroforestiers.
- (ii) La conduite d'une réflexion autour d'un moyen sûr d'estimer à maturité d'exploitation la biomasse arborée finale des SAF.

1 – Les tarifs sur des arbres en agroforesterie comme moyen d'encourager la plantation

Aujourd'hui il est important, entre autres, que les systèmes agricoles, de culture et d'élevage soient plus résilients. L'avènement des labels bas carbone en est une preuve. C'est un label qui encourage et récompense les entreprises qui réduisent leurs émissions de gaz à effet de serre (Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, 2022). De fait, plusieurs manières de parvenir à des systèmes moins émetteurs et/ou à potentiel de stockage de carbone accru est envisagé. L'agroforesterie en est une. En effet, par rapport à des arbres forestiers, les arbres agroforestiers produisent trois fois plus de biomasse par arbre, ceci est dû entre autres à la fertilisation des cultures, la faible concurrence entre eux (Gavaland and Burnel 2005).

Mais dans la démarche des labels bas carbone, il est nécessaire de quantifier l'état à date comme d'estimer le potentiel biomasse (carbone) disponible et exploitable dans le compartiment « arbre agricole » des systèmes agroforestiers. L'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe), via son projet Carbocage, a déjà effectué cette démarche pour des systèmes agroforestiers en haies. Leur but était à la fois d'évaluer le carbone stocké dans les haies mais aussi la valeur marchande (production de bois) et non marchande (services écosystémique) apportées par les haies (Colombie et al., 2020).

En foresterie, la pratique la plus courante pour estimer sur pied ou sur grumes abattues les volumes de biomasse arborée est l'usage de « barèmes / tarifs de cubage ». Il en existe sous plusieurs formes ; un tableau appelé table de cubage, un graphique ou encore une équation. Ce tarif de cubage fournit le volume d'un arbre à partir de caractéristiques dendrométriques simples comme la hauteur de l'arbre ou le diamètre à hauteur de poitrine (DBH ; Diameter at breast height). La validité de ce tarif repose sur plusieurs conditions de similitudes entre les arbres, notamment au niveau de l'essence, l'âge et les conditions de croissance (Massenet, 2016).

Et donc pour aider les agriculteurs à valider leur démarche label bas carbone, comme pour prouver à ces agriculteurs comme aux autres que l'agroforesterie est bien un modèle agroécologique performant et résilient, des tarifs adaptés à nos contrées et à nos essences bocagères sont nécessaires.

2 – Les modèles d'estimation de biomasse : plutôt empiriste ou mécaniste ?

Il existe deux grands types de modèles qui permette d'établir une relation entre deux variables, ici la biomasse d'un arbre et ses caractéristiques dendrométriques, il s'agit des modèles empirique ou mécanistes.

2.1 – Les modèles les plus simples à mettre en place : modèles empiriques

Un modèle empirique est un modèle qui permet d'établir une relation statistique entre deux variables, ce modèle a l'avantage de faire des prédictions même sans comprendre le fonctionnement d'un système (Girondot, 2019). Un tel modèle possède une forte précision et un fort pouvoir prédictif à condition de rester dans le domaine de validité de la relation (conditions climatiques, sols, essences similaires à celles utilisées pour établir la relation) (Davi, 2004).

2.2 – Les modèles mécanistes : un modèle peut-être trop compliqué à développer

Le second type de modèle s'intitule mécaniste. Il s'agit, selon le chercheur Hendrik Davi (2004), d'un modèle qui examine et cherche à comprendre tous les processus qui relient les deux variables. Ce modèle a l'avantage d'être au plus proche du fonctionnement du système mais peut être compliqué à mettre en place à la vue du nombre de paramètres à prendre en compte (Girondot, 2019).

2.3 – Le modèle allométrique

L'allométrie cherche à estimer une mesure d'un arbre (la biomasse par exemple) en fonction d'une ou plusieurs autres mesures simples et/ou facilement capturables (la hauteur et le DBH par exemple). Un modèle allométrique est une formule qui « formalise de manière quantitative cette relation » (Picard & Henry, 2012). Nicolas Picard utilise dans son rapport le terme de corrélation entre les accroissements des mensurations des arbres pour définir l'allométrie. Il s'agit donc d'un modèle empirique qui donne la biomasse (masse sèche ou fraîche) d'un arbre à partir de caractéristiques dendrométriques simples comme la hauteur, le DBH ou le diamètre de la couronne.

3 – Les modèles allométriques de biomasse déjà existants en agroforesterie à ce jour

Les modèles allométriques sont très répandus en foresterie, mais au contraire plus rares en agroforesterie et quasi inexistantes (ou non publiés) pour des systèmes agroforestiers non tropicaux et pour des essences communes européennes.

Or la croissance d'un arbre n'est pas du tout comparable entre un système agroforestier et une forêt, à âge égal un arbre issu de l'agroforesterie contient trois fois plus de biomasse qu'un arbre issu d'une forêt (Gavaland and Burnel 2005).

La figure n° 2 montre les équations allométriques déjà recensées dans le monde, et on ne retrouve aucune donnée publiée pour l'hémisphère Nord. Pour l'hémisphère Sud, on retrouve des modèles allométriques développés pour des individus du même genre que ceux que nous sommes susceptibles de retrouver en Europe mais pas de la même espèce. Par exemple Globalloometree répertorie une équation pour la biomasse d'un noyer de Mandchourie développée en Chine par Wang (2006) :

$$\text{Biomasse} = 0.466 + 1.662 * (\text{Log}_{10}(\text{DBH}))$$



Figure 2 : Carte des modèles allométriques publiés pour l'agroforesterie (Globalloometree, 2022).

Il existe des modèles qui n'ont pas été publiés et donc non présents sur la carte de Globalloometree ci-dessus. Maxime HAVAS (in Boucheny, 2010) a développé un modèle allométrique sur des noyers hybrides et communs avec une méthode différente de celle présentée plus tard dans ce rapport. Un modèle pour le noyer noir a aussi été développé en Charente Maritime (Van Lerberghe et al., 2015). Aux États-Unis, des chercheurs ont

mis au point un modèle permettant d'estimer le volume des feuilles d'un noyer noir (Zellers et al., 2012).

On pourrait se demander pourquoi un modèle établi sur la même espèce mais pas au même endroit ne pourrait pas être valable, pourquoi son utilisation est-elle limitée à une zone géographique ? Les modèles allométriques sont des modèles empiriques et donc ne sont qu'applicables dans des conditions similaires à celles où ils ont été développés. Même au sein des Hauts-de-France on observe plusieurs climats, ces équations devraient donc être construites et validées localement.

4 – Le développement des modèles allométriques en agroforesterie intra parcellaire

Le Work Package n°2 du projet SAFARI est divisé en deux groupes, la première est gérée par UniLaSalle Beauvais se concentre sur l'agroforesterie intra parcellaire (voir photo ci-contre). Le second coordonnée par l'AAAT n'intéresse qu'au bocage, l'agroforesterie de haie.



Figure 3 : Photo d'agroforesterie intraparcélaire (Chambre d'agriculture France, 2021)

5 – La parcelle expérimentale d'agroforesterie d'UniLaSalle

Le protocole présenté qui va être présenté dans les parties suivantes a été mis en place sur la parcelle expérimentale d'UniLaSalle Beauvais. Le Marquis (N49°28,23'78" / E2°03,53'43") est une parcelle agricole de 33 hectares convertie à l'agroforesterie en 2009. Cet espace présente trois enjeux environnementaux majeurs ; (i) l'érosion de ses sols, (ii) les risques de lessivage des nitrates et de pollution azotée des eaux captées en aval, (iii) la discontinuité des éléments du paysage et des biocorridors potentiels (Grandgirard, 2021). En effet, la parcelle se situe entre deux zones boisées au Nord et au Sud (25 et 45 hectares) et permet d'étudier les déplacements de la faune. On observe 5% de pente ce qui rend le terrain propice au ruissellement de surface et à l'érosion. Elle se situe également en amont d'un bassin de captage pour l'eau Beauvaisienne et permet donc d'observer facilement l'effet sur le piégeage des nitrates. C'est pour répondre à ces problèmes que les lignes d'arbres ont été implantées à la fin des années 2000.

Les sols du Marquis sont majoritairement argilo-limoneux et présentent une gamme allant d'argile dominant à limono-argileux dominant. L'annexe n°1 présente les différents sols de la parcelle et l'emplacement des arbres. Les études de sols réalisées sur toute la parcelle ont permis de définir l'emplacement de plantation des différents arbres en fonction de leurs appétences. La figure n°4 représente la croissance des différents arbres en fonction de leur emplacement. C'est un pourcentage pour chaque essence de la hauteur d'un arbre par rapport au plus grand arbre de cette même essence sur la parcelle. On peut ainsi aisément comparer la croissance de tous les arbres du Marquis en fonction de leur localisation et donc des sols présents.

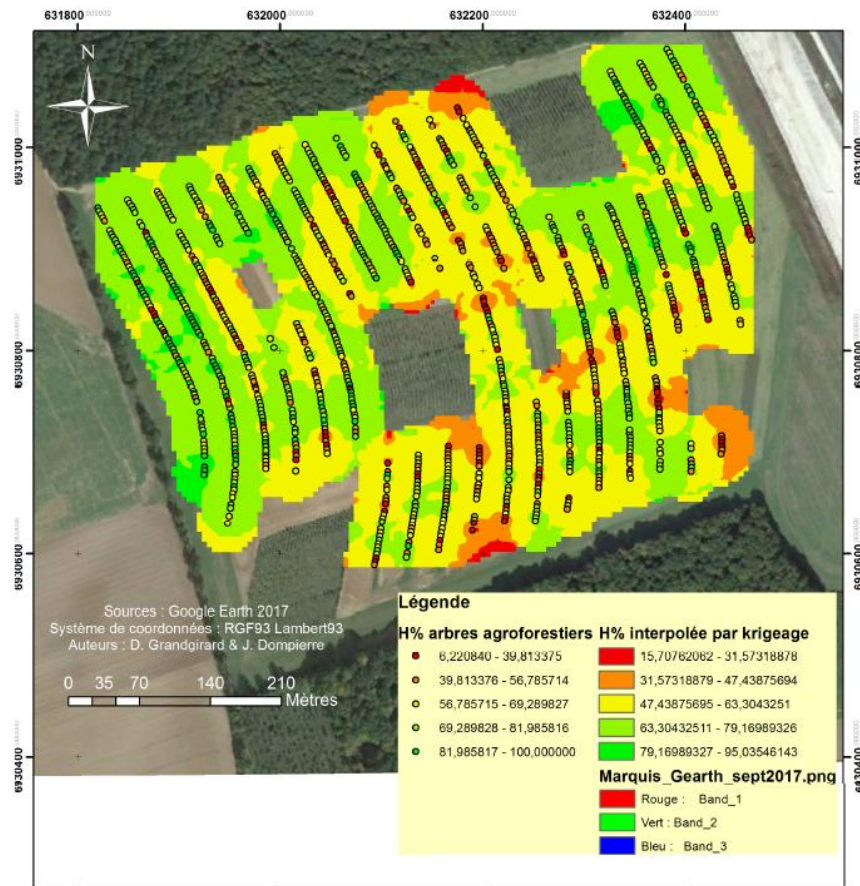


Figure 4 : Comparaison de la croissance des arbres du marquis en fonction du plus grand arbre de chaque essence de la parcelle.

Au final, ce sont près de 3500 arbres qui ont été implantés pour un total de dix essences ; pommier, noyer commun, noyer hybride, érable plane, érable sycomore, merisier, alisier torminal, cèdre de l'atlas, poirier et orme de Lutèce. Ils suivent une séquence bien particulière qui se répète sur toute la parcelle. Dans l'annexe n° 2 vous trouverez un tableau qui récapitule les arbres plantés ainsi que leur nombre et la séquence. Les lignes d'arbres sont espacées de 30 mètres et les arbres entre eux de quatre mètres, la carte ci-dessous illustre le design de la parcelle du Marquis. Les témoins agricoles (pas d'arbres) et forestiers (densité plus élevée : 833 arbres / hectare contre 83) ont été mis en place pour comparer les systèmes de production.

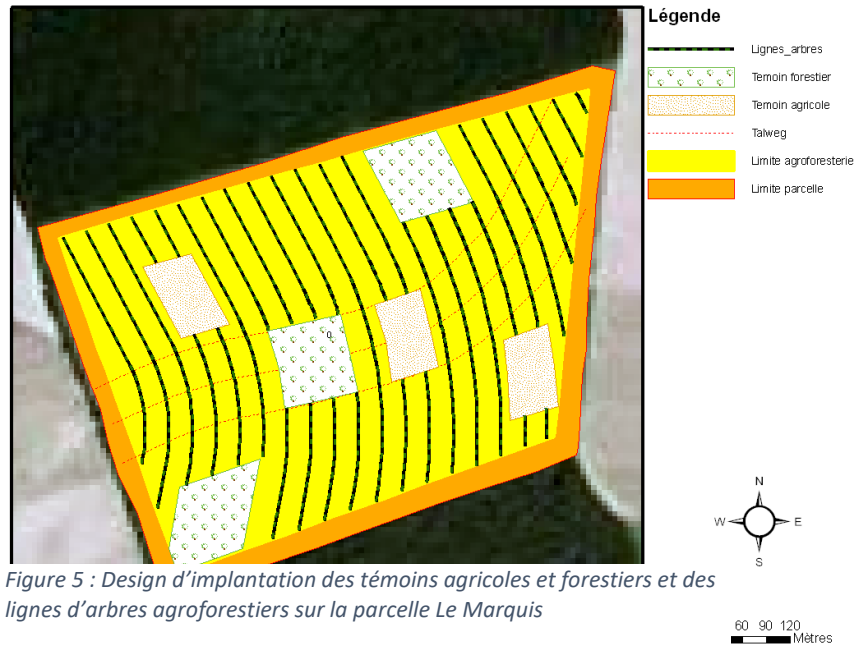


Figure 5 : Design d'implantation des témoins agricoles et forestiers et des lignes d'arbres agroforestiers sur la parcelle Le Marquis

Cette parcelle expérimentale appartient à UniLaSalle et a été plantée dans des objectifs de recherche. C'est dans ce cadre que rentre le projet SAFARRI. Le tarif présenté dans la partie précédente va pouvoir être réalisée sur cette parcelle. Elle possède volontairement une densité d'arbres assez élevée (83 arbres / hectare) pour permettre la coupe d'arbres et le développement de tarifs.

Sur les dix essences présentes sur la parcelle, ce rapport va se concentrer sur le noyer, hybride et commun étant donné la difficulté de les différencier lorsque l'arbre n'a pas débourré. Ce choix a été fait par David Grandgirard. Ce choix c'est porté sur cette essence en raison de la présence de tarifs déjà existants pour cette essence, pas au même âge ni au même endroit mais cela reste un point de comparaison.

6 – Comment construire des modèles allométriques ?

Les étapes suivantes vont décrire le processus de création d'un modèle allométrique d'estimation de biomasse pour un arbre issu d'un système agroforestier. C'est un modèle empirique, il ne sera donc applicable qu'à une essence et dans des conditions climatiques et pédoclimatiques similaires à celles dans lequel il a été créé.

6.1 – Échantillonnage

La première étape pour créer un tel modèle est la réalisation d'un plan d'échantillonnage. En effet, les méthodes que nous allons appliquer par la suite sont destructives, on ne peut donc pas se permettre de couper tous les arbres d'une parcelle. C'est à la fois une question de temps de travail et de gestion du système agroforestier, un

arbre peut croître pendant des dizaines d'années. De nombreuses questions vont alors se poser, avec combien d'arbres le modèle peut-il être créé, parmi un peuplement, quels arbres sélectionner...

6.1.1 - Sur combien d'arbres s'appuyer pour créer un modèle suffisamment puissant ?

Pour construire un tarif, Jean Padré et Jean Bouchon (1988) ont établi des recommandations en fonction de la superficie de la parcelle, pour un peuplement unique et homogène ils conseillent de réaliser le tarif avec la base d'un échantillon de 30 arbres (pour une essence). C'est sur ce nombre que nous allons nous appuyer pour la suite de la construction du modèle allométrique.

6.1.2 Quels arbres ?

Le but du plan d'échantillonnage est que le domaine de validité du modèle soit le plus grand possible, même s'il s'agit d'un modèle empirique, le modèle doit représenter la plus grande galle de variables d'entrées possible (Picard & Henry, 2012). La ventilation va s'effectuer à partir de données dendrométriques simples de toute la population pour trouver l'échantillon représentatif.

La réalisation d'une stratification est nécessaire pour ne ventiler au « hasard », ce qui manquerait d'efficacité et d'optimisation (Picard & Henry, 2012). Ces strates d'échantillonnage homogènes auront pour but d'améliorer la précision du modèle.

Effectuer des mesures sur toute la population de noyer hybride serait très chronophage, heureusement la hauteur et le DBH de ces arbres ont déjà été récupérées sur la parcelle en 2018. Nous allons analyser ces données afin d'effectuer le plan d'échantillonnage et non celle des arbres actuellement en 2022.

Ensuite, le but va être de répartir les différents individus de noyer hybride dans plusieurs classes. Cette répartition doit être effectuée de la manière suivante pour répondre aux conditions évoquées plus haut, il doit y avoir une forte homogénéité intra-classe et une forte hétérogénéité inter-classe. La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) est une des techniques statistiques permettant de réaliser cet échantillonnage. Le principe est de rassembler, selon des critères définis (DBH, hauteur et largeur du houppier), des individus de manière itérative en les comparant à l'aide de la distance euclidienne deux à deux. Cette classification répartit les arbres de la parcelle en trente classes. L'arbre qui sera positionné le plus proche du centroïde de chaque classe sera sélectionné pour faire partie de l'échantillon.

A partir de cette étape, 30 individus sont sélectionnés mais il est arrivé que certains triplets d'arbres plantés aient deux arbres dans la sélection. Celle-ci va donc être modifiée de façon à n'avoir au final qu'un seul arbre par triplet. Ce changement est effectué tout en prenant en compte la CAH et les clusters créés.

La dernière étape de l'échantillonnage est la confirmation du choix des arbres via l'état sanitaire de chaque arbre. Cette étape va être réalisée via une grille de lecture TBS. Les arbres sont parcourus et leur état sanitaire est noté en fonction de plusieurs caractéristiques. Ainsi pour chaque arbre un calcul est fait pour savoir la destination préférentielle de l'arbre en fonction de ses caractéristiques. Il est soit catégorisé dans « à couper », soit dans « production bois biomasse » (PBB) ou dans « production bois d'œuvre » (PBO). Le tableau n°1 représente la grille TBS d'un arbre catégorisé dans « productions bois d'œuvre ». Cette grille est appliquée à tous les arbres composant l'échantillon. Le but est qu'il y ait une répartition à peu près égale des trois catégories. Il est important d'avoir un échantillon représentatif des arbres présents sur la parcelle, il ne faut pas sélectionner tous les « bons » arbres mais pas tous les moins « bons » non

Linéaire			Ramification				Fût			
Courbure	Décroissance	Méplat	Codominanc	Verticille	Branche fort	Apex mort	Frottis	Groumands	Gerçures	Cicatrices
n		n	n	n	o	n	n	n	n	o
Linéaire	Ramification	Fût	Total	Linéaire	Ramification	Fût	Total	PBO		
800	400	100	1300	400	120	100	620			
Score PBO				Score PBB				Décision		

Tableau 1 : Grille TBS : grille de vérification de l'état sanitaire d'un arbre

plus. Si la répartition n'est pas égale, l'échantillon est alors modifié en prenant toujours compte la CAH et les clusters créés.

Cela nous donne une population de 30 noyers hybrides de toutes tailles et état sanitaire répartis sur la parcelle du Marquis

La dernière étape est la sélection d'un sous échantillon, il sera constitué de cinq arbres parmi les 30 qui composent l'échantillon. Le choix a été fait en fonction de la structure de l'arbre. Pour les manipulations qui vont suivre il faudra bien pouvoir distinguer les différents compartiments de l'arbre. Cette sélection est donc effectuée dans cet objectif, les arbres présentant une fourche ou ayant un tronc difforme ont été écartés. Avec ces caractéristiques, cinq arbres sont choisis parmi les trente pour composer le sous échantillon.

6.2 - Terrain

6.2.1 - Modèle allométrique standard d'estimation de la biomasse fraîche d'un arbre

Cette méthode va être réalisée sur les trente arbres sélectionnés via le plan d'échantillonnage. La première étape sera la prise des principales mesures

dendrométries, DBH, hauteur de l'arbre et diamètre du houppier pour les trente arbres de la sélection.

Ensuite, vient la coupe de l'arbre et la mesure de sa masse fraîche. Ensuite on peut modéliser la relation entre les paramètres dendrométriques et la masse fraîche des arbres, le but étant d'estimer cette masse pour des arbres qu'on ne peut pas couper. C'est le tarif le plus simple à mettre en place, même s'il nécessite la coupe de 30 arbres les mesures s'effectuent rapidement par rapport au tarif présenté dans la partie 6.2.2.

Le problème majeur de ce modèle est qu'il n'estime pas le carbone stocké dans l'arbre mais la masse fraîche de celui-ci. Or pour connaître le carbone stocké il faut la masse sèche de l'arbre. L'humidité du bois n'est pas la même dans tous les compartiments de l'arbre, il est donc nécessaire de créer un tarif plus développé, qui prend en compte l'humidité de l'arbre, pour répondre correctement à la problématique. De plus, le modèle créé prend en compte les feuilles de l'arbre, mais elles ne doivent pas être comptabilisées pour calculer le carbone stocké dans un arbre. En effet, elles tombent à chaque automne et le carbone stocké est donc restitué dans l'air.

6.2.2 - Modèles intermédiaires d'estimation de la biomasse fraîche des compartiments d'un arbre

Cette méthode est supposée beaucoup plus précise mais est aussi très fastidieuse et énergivore. Le but va être d'estimer la biomasse dans chacun des compartiments d'un arbre (Tronc, branches principales, brindilles etc) pour ensuite déboucher sur sa biomasse totale à partir de paramètres simples.

Cette méthode est beaucoup trop longue pour la mettre en place sur les trente arbres de l'échantillon. Ce tarif va donc être effectué sur un sous-échantillon de cinq arbres, ce chiffre est choisi en fonction du temps qu'il m'était disponible pour réaliser les manipulations. Les arbres sont choisis parmi les trente de l'échantillon afin qu'il soit facile de définir les différents compartiments du tronc (troncs en fourche évités par exemple).

6.2.2.1 - Estimation de la biomasse sèche du tronc

Cette partie consiste à estimer la biomasse sèche du tronc. Une fois coupé, le tronc est élagué puis découpé en tronçons d'environ un mètre et pesé. On obtient ainsi sa masse fraîche. Un échantillon de tronc est prélevé à sa base (on utilise le cône d'abattage) et pesé pour obtenir sa masse fraîche. Il est ensuite mis à l'étuve pendant une semaine à 103 °C (L'Hostis, 2020). La masse sèche est obtenue pour l'échantillon, et avec une simple règle de trois il est facile de trouver la masse sèche des différents tronçons de tronc.

6.2.2.2 - Estimation de la biomasse des branches O1

Les branches O1 sont celles qui partent directement du tronc. Au début de l'élaboration du protocole cette étape était réalisée en deux fois, la première pour la branche O1 jusqu'au premier point d'insertion feuillu et la deuxième concernait le reste des branches et brindilles de la branche. Après un court test sur le terrain, le protocole a été changé en raison de temps que cela prenait (il peut y avoir jusqu'à cinquante branches O1 sur un arbre). Après cette modification une branche O1 concerne toute la branche.

Après élagage du tronc, les branches sont mesurées (diamètre basal et hauteur) et leur masse fraîche est mesurée. De la même manière que pour le tronc, une branche est prélevée afin de déterminer l'humidité du bois dans ce compartiment et en déduire la biomasse sèche de la branche. Pour des contraintes de temps, cette étape ne sera réalisée que sur trois branches.

6.2.2.3 - Estimation de la biomasse des feuilles

Étant donné que les feuilles ne sont pas à prendre en compte dans le calcul du carbone stocké, il est nécessaire de soustraire la masse des feuilles à la biomasse fraîche totale de l'arbre.

L'idéal serait d'effeuiller tout l'arbre, ce qui est très fastidieux. Cette étape sera réalisée sur trois branches représentatives des branches de l'arbre en termes de taille. La masse fraîche des feuilles est ensuite pesée.

6.3 Les difficultés rencontrées durant la phase de terrain

Durant la période de mon stage, plusieurs facteurs ont fait que la phase terrain a dû, au fur et à mesure, s'allonger jusqu'à la fin de mon stage. Dans un premier temps les étapes de terrain étaient très chronophages. Pendant mon stage j'ai travaillé en duo avec Dimitri Marti, un autre stagiaire mais lui était en stage de fin d'études et son travail portait sur sept des dix essences de la parcelle. Les étapes décrites ci-dessus ont donc dû être appliquées à toutes les essences, pas seulement le noyer hybride. Au total, il a fallu prendre les mesures de 210 arbres.

Ensuite, la météo a beaucoup fait changer notre planning. En effet s'il pleuvait les arbres regorgeaient d'eau et donc cela alourdissait l'arbre et faussait le modèle. Nous avons attendu au moins 24 heures après chaque épisode pluvieux pour prendre les mesures de masse.

Le dernier contretemps que nous avons pu rencontrer est d'ordre de l'humain. Le Marquis est utilisé comme parcelle expérimentale par UniLaSalle mais aussi comme parcelle de production pour la ferme d'application de l'école, c'est une prairie de fauche. C'est un support pédagogique pour les élèves-ingénieurs (et stagiaires) mais qui doit tout de même être rentable. Notre planning a dû être adapté au leur, au niveau des moments de fauche par exemple. Ensuite nous avons besoin d'un tracteur pour

effectuer nos manipulations, ces tracteurs sont leurs outils de travail, ils en ont besoin. Ça n'a pas été évident pour eux de nous le laisser, surtout que nous le demandions pour une durée assez longue.

Tous ces éléments ont retardé les différents chantiers jusqu'à quasiment la fin de mon stage, ce qui a entraîné quelques répercussions sur les résultats produits dans la prochaine partie.

8 – Le modèle pour le noyer hybride

Pour les différentes équations indiquées dans les parties qui vont suivre, la masse est indiquée en kilogrammes tandis que les longueur en centimètres et les aires et centimètres carrés.

8.1 – Modèle allométrique du noyer

Comme nous avons effectué les étapes de terrain en deux parties, la phénologie des arbres a évolué entre les semaines qui ont séparé ces parties. En effet sur les noyers hybrides, les feuilles n'avaient pas encore débourré lorsque les 25 premiers arbres ont été abattus. Mais les feuilles étaient présentes à la coupe des 5 arbres du sous-échantillon (qui sert aussi à construire le modèle). Le premier modèle à créer est un modèle d'estimation de la masse des feuilles totale d'un arbre en fonction d'un paramètre dendrométrique simple. Cela a pour but de soustraire la masse des feuilles pour les cinq arbres traités plus tardivement.

Ce modèle est réalisable grâce aux branches effeuillées du sous-échantillon, elles sont au nombre de trois par arbre. Grâce à cet échantillon. La figure n°6 représente la boîte à moustache du pourcentage de la masse d'une branche qui est dédié aux feuilles sur le sous échantillon (n=15). La valeur moyenne est 38,519% et c'est cette valeur qui va être utilisé. On peut ainsi trouver la masse totale des feuilles de l'arbre en sommant celle de toute les branches et régresser cette masse par un paramètre simple.

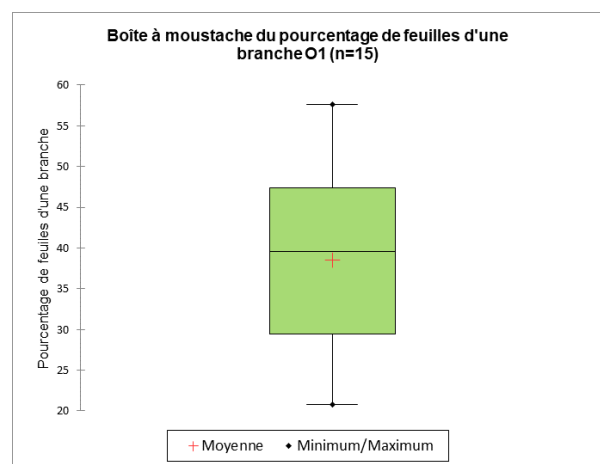


Figure 6: Boîte à moustache du pourcentage de feuilles sur une branche O1

En regardant les différentes corrélations, celle de la masse fraîche des feuilles d'un arbre son aire du tronc à hauteur de poitrine (ABH). J'ai choisi une ordonnée à l'origine pour ne pas avoir de problème avec des masses de feuilles négatives. Le tableau n° 2 représente le modèle d'estimation de la masse fraîche totale des feuilles d'un arbre en fonction de l'aire de son tronc à 1m30.

Tableau 2 : Modèle d'estimation de la masse fraîche totale des feuilles d'un arbre

M feuilles d'un arbre [kg]	$0,182 \cdot ABH \text{ [cm}^2\text{]}$	$R^2 = 0,979$	n=5
----------------------------	---	---------------	-----

Ce modèle ne sera appliqué qu'au cinq arbres qui composent le sous-échantillon.

Figure 7: Régression linéaire de la masse fraîche sans feuilles des noyers hybrides en fonction du $DBH^2 \cdot H$

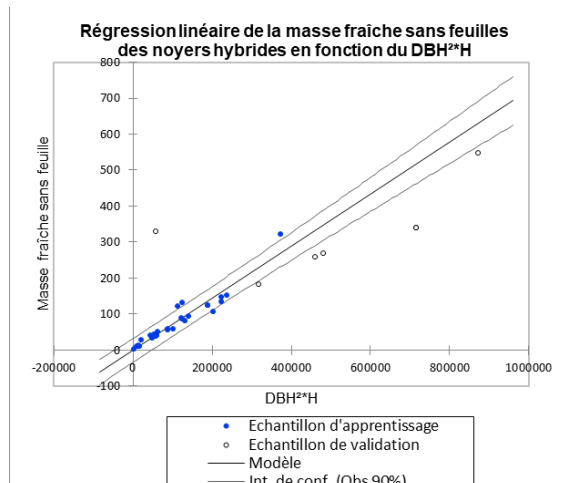
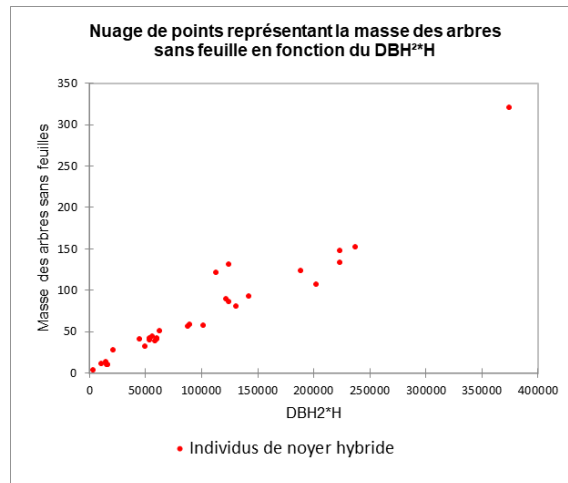


Figure 8 : Nuage de points représentant le $DBH^2 \cdot H$ d'un arbre en fonction de sa masse fraîche sans feuilles



Une fois les 30 arbres coupés, leur masse fraîche pesée, les données rentrées sur Excel et la masse des feuilles soustraite aux cinq arbres du sous-échantillon, le plus gros du travail est fait pour ce premier modèle. Pour savoir à partir de quelle variable d'entrées le modèle va-t-il être créé, il faut regarder la corrélation entre ceux-ci et la masse de l'arbre. Rapidement on remarque que la plus grande corrélation se trouve entre le $DBH^2 \cdot H$ et la masse.

La figure n° 8 représente le nuage de point de la masse des arbres sans feuilles en fonction du paramètre $DBH^2 \cdot H$. Ensuite le modèle est conçu via une régression linéaire (figure n°7) et l'équation est représentée dans le tableau n° 3.

Tableau 3: modèle d'estimation de la masse fraîche totale d'un arbre sans feuilles

M fraîche totale sans feuilles [kg]	$-0,486 + 7,217e-04 \cdot DBH^2 \cdot H$ [cm ²] * [cm]	$R^2 = 0,918$	n=30
-------------------------------------	---	---------------	------

8.2 – Validation du modèle

La validation du modèle va s'appuyer sur les travaux de Maxime Havas réalisés en 2011 sur des noyers hybrides. A partir de tarifs de cubage il a estimé la biomasse aérienne ligneuse mais sans feuilles de six arbres. Ce sont les points blancs de la figure n° 7. Le coefficient de détermination de Pearson est de 0,398 pour la validation du modèle. Ce nombre est assez bas, cela peut s'expliquer en partie par le fait que son modèle a été développé à Montpellier où les conditions climatiques et pédoclimatiques sont bien différentes de celle des Hauts-de-France. De plus, comme le montre la figure n° 7, les arbres de l'échantillon de validation ont des dimensions bien plus importantes que les arbres de la parcelle du Marquis. Or un modèle empirique est fait pour être appliqué dans la même gamme de valeur d'entrées que celles utilisées pour le construire, ce n'est pas vraiment le cas ici.

8.3 – Modèles compartimentaux

On considère pour l'élaboration de ce modèle que l'arbre est composé d'un côté du tronc et de l'autre les branches O1, celles qui sont directement reliées au tronc. Les ramifications secondaires seront considérées comme des parties des branches principales.

8.3.1 – Modèle pour une branche O1

La croissance d'une branche O1 est comparable à celle d'un arbre. La variable $D_{base}^2 * L$ est utilisé pour construire le modèle, avec D_{base} , le diamètre à la base de la branche et L sa longueur.

Le nombre d'individus utilisé est $n=82$, il s'agit du nombre de branche total des cinq arbres qui composent le sous-échantillon.

Tableau 4: Modèle d'estimation de la masse fraîche d'une branche O1 avec feuilles

$M_{\text{branche O1 avec feuilles}} [\text{kg}]$	$0,773 + 5,521e-04 * D_{base}^2 * L$ [cm] ² * [cm]	$R^2 = 0,777$	$n=82$
---	--	---------------	--------

Cette équation (tableau n° 4) donne une masse fraîche avec feuilles, or grâce aux trois branches par arbres qui ont été effeuillé, et à la boîte à moustache (figure n° 6), il est facile de passer d'une masse avec feuille à une masse sans feuilles (tableau n° 5).

Tableau 5: Modèle d'estimation de la masse fraîche d'une branche O1 sans feuilles

M branche O1 sans feuilles [kg]	$0,580 + 3,465e-04 * Dbase^2 * L$ [cm] ² * [cm]	R² = 0,796	n=82
--	---	------------------------------	-------------

8.3.2 - Modèle pour le tronc

La deuxième partie de ce modèle par compartiment consiste en l'estimation de la masse sèche du tronc. La variable qui est le plus corrélée à la masse du tronc est le DBH. Le modèle est créé à partir des cinq arbres du sous-échantillon (n=5).

Tableau 6 : Modèle d'estimation de la masse fraîche du tronc d'un arbre

M tronc [kg]	$-33,080 + 6,043 * DBH$ [cm]	R² = 0,549	n=5
---------------------	------------------------------	------------------------------	------------

Ce modèle (tableau n° 6) est, encore une fois, valide que dans la gamme des variables d'entrées qui ont servi à le construire. C'est-à-dire qu'ici il ne sera pas valable pour des tout petits arbres, comme le montre l'ordonnée à l'origine négative (environ -33 kg). Le coefficient de détermination est assez bas, cela peut s'expliquer que le traitement du tronc n'a pas toujours été réalisé de la même manière pendant la phase de terrain. En effet, les arbres n'ont pas été élagués depuis plusieurs années et il était souvent difficile de différencier une branche O1 du tronc par exemple. A de nombreuses reprises l'arbre poussait avec une fourche au milieu. Ce modèle n'est pas fiable à 100% à cause de cette variable.

8.3.3 - Perspectives pour les modèles compartimentaux

Ce modèle avait initialement pour objectif d'être plus développé qu'il n'a été ici. La phase de séchage à l'étuve des échantillons de bois est d'environ une semaine et le bois n'a pas eu le temps de sécher avant que mon stage ne se finisse. Je ne pourrais donc pas exploiter ces résultats dans ce rapport. Le but était, grâce aux échantillons de bois récupérés sur chaque arbre, de déterminer l'humidité du bois. O

Ensuite grâce à l'humidité du bois, il est facile de passer via une simple règle de trois de la masse fraîche de l'arbre à sa masse sèche. Cette relation est vraie si et seulement si l'humidité du bois est la même dans tous les compartiments de l'arbre, chose que je ne pourrai pas vérifier non plus avant la fin de mon stage.

A partir de la masse sèche, il est possible de déterminer le carbone stocké dans l'arbre. Lamblom & Savidge (2003) ont déterminé le taux de carbone pour des essences nord-américaines dont le noyer noir, il s'agit de l'essence qui se rapproche le plus du noyer hybride (étant le croisement entre le noyer commun et noir). Le carbone stocké dans l'arbre représente donc 49,17% de sa masse sèche totale.

Malheureusement ces étapes n'ont pas pu être traitées lors de mon stage par faute de temps.

8.4 – Discussions / limites des modèles :

La principale limite des modèles empiriques comme ceux présentés précédemment est son domaine de validité. En effet dans notre cas ces modèles sont applicables pour des arbres d'une dizaine d'années dans des conditions climatiques et pédoclimatiques similaires à celles des Hauts-de-France et de la parcelle du Marquis. Mais ces modèles peuvent tout de même donner une estimation de la biomasse d'un arbre sans avoir à le couper.

Pendant la phase de terrain, en plus de faire attention à soi, il est difficile de faire attention à effectuer toutes les manipulations de la même manière. En effet, tous les arbres abattus n'ont pas été coupés à la même hauteur. Cela peut paraître insignifiant mais il peut y avoir un impact non négligeable qui est impossible à quantifier.

9 – Déploiement du modèle chez des agriculteurs en avance sur leur temps

L'étape suivant la création et la validation du modèle allométrique pour le noyer hybride est le déploiement de celui-ci. L'objectif est de créer une base de données des arbres des systèmes agroforestiers intraparcellaires dans les alentours de Beauvais (environ 50 km). Au sein du projet MOCA (Méthodes et Outils pour une Conception en Agroforesteries) une base de données a été créée contenant les coordonnées des agriculteurs qui ont passé au moins une de leurs parcelles en agroforesterie. Grâce à cet outil, il est facile de recenser les agriculteurs ayant une parcelle d'agroforesterie intraparcellaire située aux alentours de Beauvais. Une condition supplémentaire est qu'il faut qu'il ait planté des noyers hybrides, c'était quasiment à chaque fois le cas, les essences sont similaires sur chaque parcelle du département.

Malgré les informations disponible il n'est pas toujours évident de prendre contact avec les agriculteurs. Même s'ils pratiquent l'agroforesterie (ce qui est assez rare malgré tout) ils ne sont pas forcément toujours partant pour que des « inconnus » viennent sur leurs parcelles. Ils n'ont pas toujours envie de « perdre du temps » avec nous. Par contre ceux que nous avons pu rencontrer ont par contre toujours été accueillants et volontaire pour nous rendre service. L'idée était de prendre les mesures de hauteur et de diamètre sur leurs arbres, d'appliquer le modèle et en retour indiquer à l'agriculteur une estimation de la masse de ses noyers hybrides, en bel échange de service. Ces résultats leur ont été envoyé sous forme de cartes (figure n° 9) et sous forme de tableur avec la masse précise de chaque arbre. La masse négative de certains arbres s'explique par leur petite taille, ils ne correspondent pas à la gamme d'entrées du modèle sur laquelle le modèle a été construit. Les arbres « non applicables » sont ceux où le modèle n'a même pas été

appliqué en raison de leur petite taille. Ils ont été indiqués sur la carte pour aider l'agriculteur dans la réalisation d'un schéma de la parcelle.

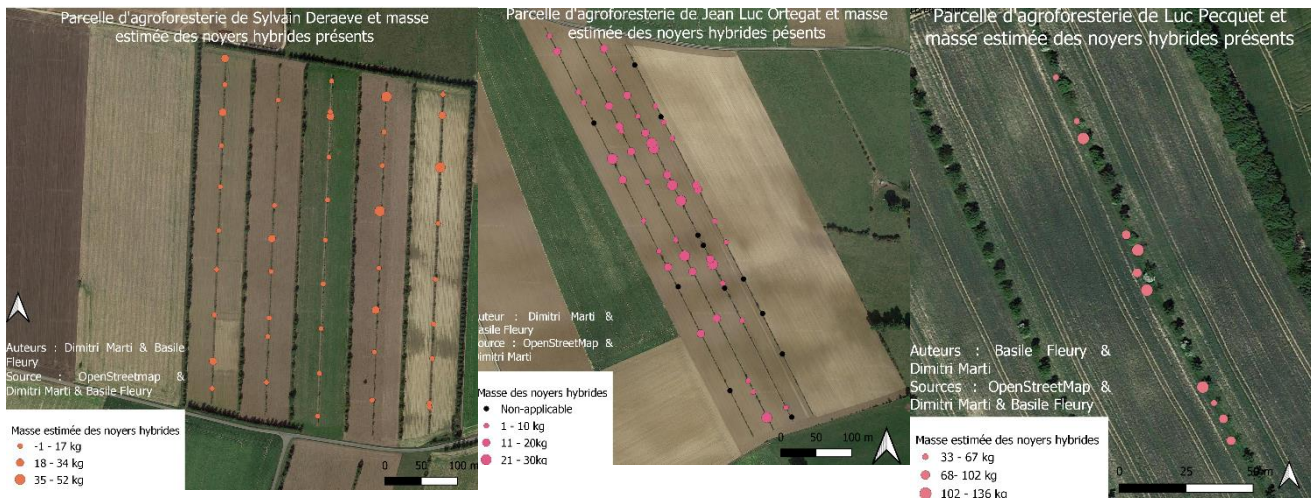


Figure 9 : Cartes représentant les parcelles d'agroforesterie des agriculteurs rencontrés ainsi que la masse estimée de leurs noyers hybrides

11 – Conclusion : les prémices de la recherche en agroforesterie

Le volet du projet SAFARRI présenté dans ce rapport ne représente qu'une petite partie de ce qu'est le projet global. L'aboutissement du projet et de ses différents Work Package (WP) est prévu pour 2024 et d'ici là de nombreux autres résultats vont être produits. Pour l'année 2022 et le WP2 l'AAAT ont créé un modèle d'estimation de la biomasse pour l'agroforesterie en haies. Tandis que Junia doivent produire les mêmes résultats qu'UniLaSalle mais pour l'ancienne région Nord-Pas-de-Calais. Sur les prochaines années il reste beaucoup de thématiques à aborder au sein de SAFARRI notamment la question financière ; est-ce rentable d'avoir une parcelle en agroforesterie par rapport à une parcelle en monoculture ? J'ai trouvé dommage de pas avoir pu pousser les modèles un peu plus loin ; jusqu'à l'obtention du carbone stocké dans un arbre.

L'agroforesterie et l'agroécologie sont des thématiques très récentes et la recherche scientifique en est à ses débuts, ce sont les prémices. Il reste beaucoup à faire pour continuer à motiver les agriculteurs à se lancer dans la plantation d'arbre.

12 – Un premier stage marqué par la découverte du milieu professionnel de l'ingénieur

Ce stage était pour moi la découverte du monde du travail en tant qu'ingénieur (ou plutôt apprenti ingénieur). J'ai découvert les réalités du travail et ses faces cachées ; la volonté de faire du profit, organiser un planning qui correspond aux attentes de chacun, travailler avec plusieurs acteurs issus de boîtes différentes pour se mettre d'accord (la ferme pédagogique vs UniLaSalle).

Le cadre de travail dans lequel j'ai évolué pendant ces douze semaines était agréable, j'étais dans un bureau lumineux (ce n'était pas le cas de tous les stagiaires) accompagné de trois autres stagiaires. Partager un bureau pousse au travail, c'est motivant de voir les autres travailler même si j'ai pu rencontrer des difficultés à me mettre au travail. C'est surtout dû au fait que j'ai perdu l'habitude de rester 35 heures par semaine derrière à bureau à travailler toute la journée, heureusement les phases de terrain ont permis de sortir un peu de ce quotidien.

La deuxième raison laquelle j'ai eu du mal à me mettre au travail est le fait Dimitri Marti, le stagiaire avec qui j'étais en duo sur le projet était en stage déjà un mois et demi avant que j'arrive. Au début de mon stage il avait déjà élaboré une grande partie du protocole, qui a bien sûr évolué depuis mais j'ai trouvé difficile de s'approprier le sujet que quelqu'un d'autre avait commencé, j'ai eu l'impression de servir de main d'œuvre par moments. Les phases de terrain n'étant clairement pas réalisables tout seul.

Concernant le stage en lui-même j'ai beaucoup apprécié travailler dans la recherche en agroécologie, il y a encore beaucoup à faire dans ce domaine et j'ai apprécié avoir contribué modestement au développement de l'agroforesterie dans les Hauts-de-France.

Toutes les expériences menées pendant ce stage ont été possible grâce à la parcelle expérimentale d'UniLaSalle. J'ai trouvé impressionnant le rôle que nous avons à jouer dans ce projet, les arbres ont été plantés il y a une dizaine d'année environ et c'est nous qui avons décidé lesquels couper. Si une erreur a été faite, il nous est impossible de revenir en arrière.

Avant mon stage, l'agronomie était un domaine qui m'attirait dans lequel je n'avais aucune connaissance. Je trouverai intéressant d'avoir au sein du DAE une matière initiant à l'agronomie. C'est un des domaines dans lequel nous sommes susceptibles de travailler plus tard et avoir un avant-goût au sein de notre formation pourrait être un plus selon moi.

Je n'ai donc pas pu utiliser beaucoup de compétences acquises au DAE pendant ce stage. Pour le traitement statistique j'ai utilisé XLStat, logiciel dont nous avons eu une initiation au premier semestre de la 3A (passé en distanciel), et j'avais donc oublié la plupart de ce que nous avons appris comme je ne l'ai pas ré utilisé depuis la janvier 2021. Les autres stagiaires avec qui je partageais le bureau utilisaient R et m'ont tous dit que c'était beaucoup plus pratique et reconnu pour les statistiques. Pendant ma recherche de stage j'ai vu passé plusieurs offres de stage où l'usage de R était requis et je trouve dommage

qu'au sein d'une formation comme le DAE on n'apprend pas à utiliser ce logiciel, langage de programmation qui semble être la norme dans les autres écoles et facultés.

La formation du DAE a pour avantage selon moi de posséder deux grands axes de formations, qui sont d'ailleurs dans son nom ; l'aménagement du territoire et l'environnement. Bien que certains stages, métiers rentrent dans les deux catégories à la fois, le contexte dans lequel j'ai évolué était très tournée vers l'environnement, l'agronomie même. Et je trouve important, avant d'être diplômé, de pouvoir toucher à toutes les facettes de mon futur métier potentiel. C'est pourquoi, pour mon stage de 5A, j'aimerais travailler dans un organisme plus axé sur l'aménagement, l'urbanisme.

Bibliographie

André Gavaland, Laurent Burnel. Croissance et biomasse aérienne de noyers noirs en parcelle agroforestière à Les Eduts (Charente-Maritime). Dossiers "agroforesterie : produire autrement". Chambres d'Agriculture, 2005, pp.20-22. ([hal-02682216](#))

AFAC Agroforesteries. (2022). *AFAC Agroforesteries*. <https://afac-agroforesteries.fr/>

Boucheny, P. (2010). : *Améliorer l'efficacité agro-environnementale des systèmes agroforestiers en grandes cultures* (Action 4 : Etude des potentialités offertes par l'agroforesterie pour la production d'agrocaburant de 2nde génération; p. 60). Chambre d'Agriculture des Deux-Sèvres. https://www.agroforesterie.fr/CASDAR/20092011/documents/rapportcasdar_42.pdf

COLOMBIE, S., Laurence LIGNEAU, Bertille THAREAU, Valérie VIAUD, & Thomas COISNON. (2020). *CARBOCAGE VERS LA NEUTRALITE CARBONE DES TERRITOIRES* (p. 40). Ademe. <https://bibliothèque.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/36-carbocage-vers-la-neutralite-carbone-des-territoires.html>

Commission d'enrichissement de la langue française. (2015). Agroforesterie. In *FranceTerme*. https://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=26540681

Davi, H. (2004). *Développement d'un modèle forestier générique simulant les flux et les stocks de carbone et d'eau dans le cadre des changements climatiques*. 219.

Dupraz, C. (2018). *Les services écosystémiques pris en compte dans les systèmes agroforestiers*. [Présentation]. <https://youtu.be/jbmNihOvJDw>

Appel à projets « Plantons des haies et des arbres agricoles », n° Programme de Développement Rural 2014-2020 Nord – Pas de Calais (2022). https://europe-en-hautsdefrance.eu/fiche_programme/aap-2022-plantons-des-haies-et-des-arbres-agricoles/

Girondot, M. (2019). *Modèles empiriques et modèles mécanistes*. 17.

Globalloometree. (2022). *Globalloometree*. Globalloometree. http://www.globalloometree.org/data/allometric-equations/?q=agroforestry&Population=&Tree_type=&Vegetation_type=&Family=&Genus=&Species=&Country=&Zone_FAO=&Zone_Holdridge=&Ecoregion_Udvardy=&Ecoregion_WWF=&Division_Bailey=&Min_Latitude=&Max_Latitude=&Min_Longitude=&Max_Longitude=&Point_Latitude=&Point_Longitude=&Point_Distance=&Reference=&Reference_author=&Reference_year=&B=&Bd=&Bg=&Bt=&L=&Rb=&Rf=&Rm=&S=&T=&F=&Output=&page=1

Guyomard. (2013). *VERS DES AGRICULTURES A HAUTES PERFORMANCES. VOLUME 2*, 238.

Lamlom, S. H., & Savidge, R. A. (2003). A reassessment of carbon content in wood : Variation within and between 41 North American species. *Biomass and Bioenergy*, 25(4), 381-388. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00033-3](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00033-3)

Guyomard H. (sous la direction de). 2013. Vers des agricultures à hautes performances. Volume 1. Analyse des performances de l'agriculture biologique. Inra. 368 pages. Consulté le 07/06/2022 à l'adresse suivante : <https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/archives/rapport-INRA-pour-CGSP-VOLUME-1-web07102013.pdf>

L'Hostis, C. (2020). GUIDE DES SOLUTIONS DE SECHAGE DU BOIS BUCHE. *Institut technologique FCBA*, 40.

Massenet, J.-Y. (2016). <http://jymassenet-foret.fr/cours/dendrometrie/coursdendrometrieppt/versionspdfdespptdendro/dendrometriechap6ppt.pdf>

Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires. (2022). *Label bas-carbone : Récompenser les acteurs de la lutte contre le changement climatique*. [ecologie.gouv.fr. https://www.ecologie.gouv.fr/label-bas-carbone](https://www.ecologie.gouv.fr/label-bas-carbone)

Ministère de l'agriculture. (2015). *PLAN DE DÉVELOPPEMENT DE L'AGROFORESTERIE* (p. 4). <https://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/1602-ae-synthese-agroforesteriebd.pdf>

Pardé, J., & Bouchon, J. (1988). *Dendrométrie* (2e éd... refondue). École nationale du génie rural, des eaux et des forêts.

Picard, N., Saint-André, Laurent, & Henry, M. (2012). *Manual for building tree volume and biomass allometric equations from field measurement to prediction*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
<http://www.fao.org/docrep/018/i3058e/i3058e.pdf>

RMT Agroforesteries. (2022). *RMT Agroforesteries*. <https://rmt-agroforesteries.fr/>
Van Lerberghe, P., Malignier, N., & Cirou, E. (2015). *Research and Development Protocol for Walnut Trees on Arable Land in France* (p. 5).
https://www.agforward.eu/documents/WP4_F_Branches_Biomass_protocol.pdf

Wang, C. (2006). Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 222(1-3), 9-16.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.10.074>

Zellers, C. E., Saunders, M. R., Morrissey, R. C., Shields, J. M., Bailey, B. G., Dyer, J., & Cook, J. (2012). Development of allometric leaf area models for intensively managed black walnut (*Juglans nigra* L.). *Annals of Forest Science*, 69(8), 907-913.
<https://doi.org/10.1007/s13595-012-0215-2>

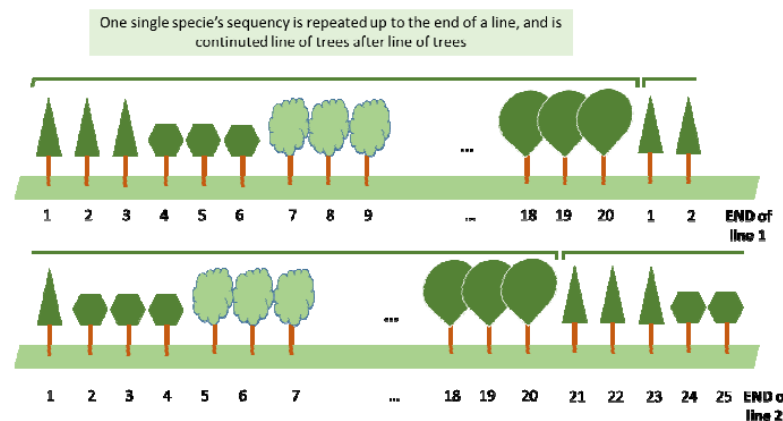
Annexes :



Annexe 1: Carte de la typologie des sols du Marquis

Tree species	Latin name	Populations size (Agroforestry / Forestry controls)
Lutecia elm	Ulmus Nanguen « Lutece »	167 / 233
Wild service tree	Sorbus torminalis L. Crantz	161 / 233
Atlas cedar	Cedrus Atlantica	57 / 216
Norway (plane) maple	Acer Platanoides	168 / 234
Sycamore maple	Acer Pseudoplatanus	170 / 256
Wild cherry	Prunus avium	169 / 228
Hybrid walnut tree	Juglans regia	332 / 179
Walnut tree	Juglans regia	44 / 215
Apple tree	Malus sylvestris	171 / 255
Pear tree	Pyrus communis	75 / 0
Hazel nut tree	Corylus avellana L.	Some in forestry controls

Annexe 2: Tableau récapitulatif des essences plantées et schéma de plantation





POLYTECH[®]
TOURS

35 ALLÉE FERDINAND DE LESSEPS
37200 TOURS



Basile Fleury

UIT

2021-2022

Production des premières références Hauts-de-France « Biomasse et Revenu arboré » en agroforesteries

Résumé : Ce rapport s'appuie sur mon stage de 4^{ème} année d'école d'ingénieur à Polytech Tours qui s'est réalisée entre avril et juillet 2022 à l'institut Polytechnique UniLaSalle Beauvais. La mission sur laquelle j'interviens est :

- La participation à l'élaboration et au déploiement d'une méthode fiable et rapide d'estimation par mesures allométrique (tarifs, abaques...) de la biomasse arborée des systèmes agroforestiers.

Abstract: This report is based on my 4th year engineering school internship at Polytech Tours, which took place between April and July 2022 at the Polytechnic Institute UniLaSalle Beauvais. The mission on which I intervene is:

- Participation in the development and deployment of a reliable and rapid method for estimating the tree biomass of agroforestry systems using allometric measurements.

Mots Clés : Agroforesterie, modèles allométriques, noyer hybride, estimation de biomasse fraîche

Tuteur entreprise :

Olivier Rey : Ingénieur d'études

David Grandgirard : Enseignant chercheur

Tuteur académique :

José Serrano