

Chapitre 1 : Modélisation de la croissance
juvénile de plusieurs essences cultivées selon
différents traitements de préparation du site

I. Introduction

I.1. La préparation de site

I.1.1. Introduction aux préparations de sites

En foresterie, des méthodes de préparation du site sont utilisées pour créer des conditions optimales de germination (Löf et al. 2012; Aleksandrowicz-Trzcińska et al. 2017) principalement en limitant la compétition par les espèces concurrentes pour la lumière, pour l'eau et les nutriments (Nilsson et Örlander 1999).

De nombreuses recherches ont montré que le processus de régénération dépend de facteurs tels que la compétition herbacée, les attaques de ravageurs ou de microsites (Peterson et Pickett 1990; Brang 1998; Senn et Schönenberger 2001; Senn et al. 2002; Kupferschmid-Albisetti 2003; Rammig et al. 2007). La compétition pour les éléments nutritifs du sol, l'humidité ou la lumière peut être importante et cette dernière peut affecter considérablement la croissance des semis (Elliot et White 1987; Lauer et al. 1993; Nambiar et Sands 1993). De nombreuses études de gestion forestière montrent que la compétition interspécifique est de plus en plus influente avec le temps (Harrington et al. 1991) en réduisant la croissance en diamètre dans les premières années (Knowe et al. 2005).

La nécessité de réussir la plantation a conduit au développement d'un large éventail de méthodes de préparation du site qui pourraient être regroupées dans les catégories suivantes : amendements du sol, fertilisation, herbicides et mécanique mais aussi le génie écologique, les plantes de couverture et le bio-contrôle. Ces différentes stratégies ont souvent été combinées au fil du temps dans les forêts aménagées du monde entier (Munson et Timmer 1995; Nilsson et Allen 2003; Löf et al. 2006).

L'impact de la préparation du site sur la germination, la survie et la croissance des semis peut varier selon les conditions climatiques, le type de site ou les espèces d'arbres cultivées (Munson et Timmer 1995; Mäkitalo 1999; MacKenzie et al. 2005; Thiffault et al. 2010; Löf et al. 2012; Wallertz et Malmqvist 2013; Thiffault et Hébert 2017). Cependant, il est généralement admis que la productivité des jeunes plantations forestières est positivement corrélée à l'intensité de

la gestion (Thiffault et al. 2004; Löf et al. 2012; Bilodeau-Gauthier et al. 2013; Paquette et Messier 2013; Furtado et al. 2016).

Plusieurs études ont mentionné des réponses différentes à certains types de traitements. L'établissement et les traitements d'entretien peuvent avoir des effets variables sur le développement à long terme et le rendement des plantations. Ces caractéristiques de croissance sont représentées dans la littérature par le concept de réponses de croissance de type 1 et 2 (Snowdon et Warring 1984). Une réponse de croissance de type 1 se produit lorsque le traitement de l'établissement, ou plus généralement le traitement sylvicole, réduit le temps nécessaire au peuplement pour atteindre un stade de maturité donné. La réponse de type 2 est obtenue lorsqu'un gain proportionnel en augmentation de volume est obtenu tout au long de la période de rotation (Mason 2004; Cortini et al. 2010). Par conséquent, il est nécessaire de prendre en compte les espèces d'arbres, le site et l'intensité de gestion lors de l'analyse des impacts des traitements sylvicoles sur la croissance des semis.

Dans leur étude, Nilsson et Allen (2003) raffinent le concept et décrivent quatre types de réponses référencées par la bibliographie (Hughes et al. 1979; Morris et Lowery 1988) :

- **La réponse de type A**, qui se produit lorsque les gains de croissance sur les zones traitées continuent d'augmenter tout au long de la rotation ;
- **La réponse de type B**, qui se produit lorsque les gains de croissance réalisés au début de la rotation sont maintenus mais ne continuent pas d'augmenter après une période de réponse initiale ;
- **La réponse de type C**, qui se produit lorsque les gains de croissance précoces sont perdus par la suite ;
- **La réponse de type D**, qui se produit lorsque la croissance précoce sur les zones traitées tombe en dessous des niveaux observés sur les zones non traitées.

En règle générale, la réduction de l'abondance de la végétation herbacée concurrente ou l'amélioration à court terme du volume d'enracinement entraînera une réponse de type B (Sutton 1995; Nilsson et Örlander 1999) et dans le cas de la suppression de la compétition de la strate arborée cette réponse sera de type A (Glover et Zutter 1993; Zutter et Miller 1998; Cain 1999).

Toutefois, un traitement impliquant l'élimination d'éléments nutritifs provoquera une réponse de type C ou de type D (Nilsson et Allen 2003). Les auteurs alertent toutefois sur le caractère changeant de la réponse qui sera, pour un même type de traitement, variable en fonction des caractéristiques du site et de la manière dont les procédés de régénération sont appliqués.

I.1.2. Les engrais

En ce qui concerne les engrais, les effets observés sont généralement positifs sur la productivité, la hauteur ou le LAI (Otsamo et al. 1995; Mason et Milne 1999; Borders et al. 2004; Laclau et al. 2008; Zhao et al. 2011; Akers et al. 2013). L'application d'engrais peut entraîner une augmentation à court ou à long terme de la disponibilité des éléments nutritifs et par extension une croissance accrue des semis en fonction de l'élément, des taux d'application et des caractéristiques du site (Nilsson et Allen 2003). Traditionnellement, la fertilisation au phosphore sur les sols déficients entraîne généralement une augmentation à long terme de la disponibilité de P, à l'origine de l'augmentation du rendement tout au long de la croissance (Ballard 1972; Pritchett et Comerford 1982; Gent Jr et al. 1986), tandis que la fertilisation azotée conduit souvent à une augmentation du rendement plus limitée dans le temps (Hynynen et al. 1998).

Néanmoins, les effets peuvent varier considérablement selon le site (Mason et Milne 1999), la composition et la diversité de la végétation du sous-étage (Thomas et al. 1999) car les engrais peuvent bénéficier aux espèces interférentes. Cette prolifération rapide du cortège floristique est en général la cause d'une diminution de la teneur en humidité du sol, ce qui peut parfois expliquer des problèmes croissants malgré la fertilisation (Allen et Lein 1998; Martin et Jokela 2004; Furtado et al. 2016). Il est donc courant de combiner l'utilisation d'engrais avec des méthodes de contrôle de la végétation pour observer un effet positif comme ce fut le cas pour Nilsson et Allen (2003) avec le Pin taeda.

I.1.3. Les amendements

L'amendement du sol vise à améliorer les propriétés biologiques (C organique, microflore, microfaune), chimiques (nutriments, capacité d'échange cationique, pH) et physiques (structure, perméabilité, capacité de rétention d'eau) du sol (Bastian et Ryan 1986;

Sauerbeck 1987), mais n'a généralement qu'un faible impact sur la croissance des semis. Par exemple, Querejeta et al. (1998) ont montré une augmentation de la quantité de matière organique du sol ainsi qu'une augmentation de la survie de *Pinus halepensis*. Une recherche approfondie de cette équipe mettra en évidence d'autres effets tels que l'augmentation de la taille des agrégats du sol, qui est une source de meilleure rétention d'eau (Querejeta et al. 2000) pour cette espèce dans le même contexte.

Cette technique est particulièrement indiquée pour tirer le maximum de la symbiose mycorhizienne, qui est un facteur important dans l'établissement des plantules dans les zones dégradées (Roldán et Albaladejo 1994; Querejeta et al. 1998). Outre d'autres effets bénéfiques, cette association augmente l'absorption des nutriments (Roldán et Albaladejo 1994; Querejeta et al. 1998), facilite le transport de l'eau vers les racines des plantes (Duddridge et al. 1980; Parke et al. 1983) et agit comme un mécanisme de défense contre les organismes pathogènes. L'utilisation de mycorhizes et d'amendements dans le reboisement des zones dégradées a été largement étudiée et son efficacité a été démontrée (Marx 1975; Valdes 1985).

Les effets des amendements sont par nature persistants et, dans leur étude, Querejeta et al. (2000) soulignent la durabilité des effets dans le temps puisque des traces de ces derniers ont été trouvées dans l'eau du sol 4 ans après l'application lors de l'excavation des échantillons. Querejeta et al. (1998) est l'un des rares exemples cependant où la survie des semis de *Pinus halepensis* (Mill.) a augmenté après amendement du sol. Ceci explique pourquoi certains auteurs considèrent que des modifications de cette pratique sont nécessaires pour maintenir un niveau élevé de développement des cultures (Borders et al. 2004).

I.1.4. Les herbicides et leur controverse

L'utilisation d'herbicides est justifiée par la nécessité de contrôler la végétation concurrente (Örlander et al. 1990; Willoughby et al. 2010; McCarthy et al. 2011). Efficaces et peu coûteux (Löf et al. 2006), les herbicides sont souvent considérés comme la méthode la plus économique (George et Brennan 2002). La littérature mentionne généralement des augmentations de volume, de hauteur ou de survie (Wagner et al. 2006; South et Miller 2007; Thiffault et al. 2010; Youngblood et al. 2011) des plantes en diminuant la compétition aux

jeunes stades (South et Miller 2007). Elle mentionne également une disponibilité accrue de l'eau grâce à une réduction de l'absorption de la végétation herbacée (Hosseini Bai et al. 2014).

Néanmoins, leur efficacité sur une large gamme de plantes herbacées vivaces ou annuelles est contrebalancée par une possible contamination de l'eau du sol (Löf et al. 2006; Willoughby et al. 2010). Même si l'utilisation d'herbicide est aujourd'hui fortement critiquée par le public (Löf et al. 2006; Willoughby et al. 2010; McCarthy et al. 2011), elle a souvent été utilisée dans le passé pour lutter contre la végétation concurrente (Willoughby et al. 2010; McCarthy et al. 2011; Hosseini Bai et al. 2014). Ce risque environnemental explique pourquoi l'utilisation d'herbicides est considérée par le public comme nocive pour la gestion des écosystèmes au même titre que la coupe à blanc (Löf et al. 2006; McCarthy et al. 2011).

I.1.5. Les alternatives mécaniques

Dans un contexte de méthodes chimiques interdites (Willoughby et al. 2010; Thiffault et Roy 2011; Dassot et Collet 2015), des méthodes de préparation mécanique des sites (MSP) se sont développées. L'impact des méthodes non chimiques ne semble pas avoir été bien étudié, mais il est généralement admis qu'elles sont moins dommageables que les méthodes chimiques (Willoughby et al. 2010). Pourtant, les MSP impliquent généralement des machines lourdes (Örlander et al. 1990), ce qui peut être problématique dans les écosystèmes où les perturbations et les tassements doivent être minimisés (Harvey et Brais 2002; Ampoorter et al. 2011; Löf et al. 2012).

La plupart des recherches à ce jour sur la MSP et la performance des plantations ont été menées à l'aide de quelques espèces d'arbres résineux (Löf et al. 2012). L'impact de la MSP sur la germination, la survie et la croissance des semis peut varier en fonction des conditions climatiques, du type de site ou des espèces d'arbres cultivées (Munson et Timmer 1995; Mäkitalo 1999; MacKenzie et al. 2005; Thiffault et al. 2010; Löf et al. 2012; Wallertz et Malmqvist 2013; Thiffault et Hébert 2017). La préparation mécanique du site améliore souvent la survie et la croissance des semis (Nambiar et Sands 1993). Cependant, si l'on n'utilise pas des méthodes intensives avec beaucoup de perturbations, c'est un outil plutôt inefficace pour contrôler la végétation concurrente. En effet, les MSP impliquent le plus souvent une exposition

de sol minéral après l'enlèvement de sol organique ou le mélange des deux (Sutton 1993; MacKenzie et al. 2005).

Cette intervention a pour effet d'altérer les caractéristiques physiques du sol telles que la teneur en humidité du sol, l'aération, la température ou la granulométrie, ainsi que ses propriétés chimiques telles que la teneur en matière organique, la disponibilité des nutriments ou le pH (Archibold et al. 2000; Heiskanen et al. 2007; Piirainen et al. 2007). En outre, la plupart des MSP peuvent être à l'origine de l'érosion du sol lorsque la technique est inadaptée au site et / ou au climat (Löf et al. 1998; Alcázar et al. 2002). Des méthodes telles que la scarification, la mise en butte et le sous-solage entraînent également de multiples interactions sur les propriétés physiques et chimiques du sol qui affectent les performances des plantes, et il peut donc être difficile de déterminer la relation de cause à effet réelle de toute réponse positive des semis (Wagner et al. 2006; McCarthy et al. 2011; Löf et al. 2012; Buitrago et al. 2015; Aleksandrowicz-Trzcńska et al. 2017).

Les MSP ont par exemple un fort impact sur le cycle de C par plusieurs mécanismes (McLaughlin et al. 2000; Post et Kwon 2000; Bernoux et al. 2006) que cela soit par :

- a) Cassage des agrégats du sol qui protègent la matière organique du sol de la décomposition ;
- b) Stimulation court terme de l'activité microbienne à travers une aération améliorée ;
- c) Mixage de résidus frais dans le sol.

La perturbation mécanique du sol peut également avoir un effet sur la dynamique du C par modification du microclimat de surface du sol et par extension de sa teneur en eau et de sa température (Mallik et Hu 1997; Pérez-Batallón et al. 2001). L'amélioration des flux de CO₂ après action mécanique sur les sols a été démontrée pour un large panel de sols et de conditions climatiques à court-terme (Scala et al. 2005) ou à moyen-terme (Mallik et Hu 1997) par mesure de respiration du sol. En règle générale, les effets de la perturbation du sol sur les flux de CO₂ sont fortement dépendants du climat, de la texture du sol et des stocks de C initiaux (Post et Kwon 2000; Six et al. 2002). Dans leur étude, Nouvellon et al., (2008), n'ont pas constaté de différence vis-à-vis de ces flux après traitement mécanique des sols sur sol tropical sableux (i.e.

savane) et ont même remarqué une croissance juvénile supérieure, probablement due à la diminution de la résistance du sol à la pénétration et à un meilleur enracinement des semis.

Quand le transfert de gaz est limité, le métabolisme des racines et de la communauté microbienne symbiotique résulte en une concentration plus élevée de dioxyde de carbone. Au fur et à mesure que les phases liquides et gazeuses s'équilibrent, un accroissement de la quantité de CO₂ dissoute réagit avec l'eau et génère une élévation d'acide carbonique. Si le pH n'est pas trop bas, une fraction de cet acide carbonique se dissocie conduisant à la formation d'ions H⁺ et de bicarbonate. La hausse brutale de l'activité ionique de H⁺ provoque une désorption de cations échangeables (Ca²⁺, Mg²⁺ et K⁺) dans la solution du sol. Quand l'eau descend le long de la colonne du sol, ces cations sont lessivés à travers les horizons successifs avec les ions bicarbonates mobiles pour équilibrer les charges du sol. L'ensemble de ce processus est décrit par McColl & Cole (1968).

Par ailleurs, l'accumulation de dioxyde de carbone entraîne un appauvrissement du sol en oxygène. Les premiers microsites à devenir anoxiques sont généralement ceux avec de larges agrégats en profondeur. Avec la chute du taux d'oxygène, le potentiel d'oxydo-réduction chute également. Dans la course à la respiration anaérobie par les communautés hétérotrophes, obligatoire ou facultative, un grand nombre de nutriments sous forme minérale peuvent servir d'accepteurs d'électrons finaux affectant dramatiquement le statut nutritionnel du sol. En conséquence, la dénitrification ainsi que la réduction du manganèse et du fer et la réduction du sulfate se produisent en général juste après la chute du potentiel d'oxydo-réduction (Bohn et al. 1985).

En raison des problèmes environnementaux consécutifs aux opérations causées par de vastes zones de perturbation du sol, les MSP ont eu une assez mauvaise réputation. Pour ces raisons, les MSP sont considérées comme des outils plutôt faibles pour le contrôle de la végétation par rapport à d'autres techniques de préparation du site (Löf et al. 2012).

I.2. Objectif du chapitre

Pour Mason et Dzierzon (2006), les modèles de croissance et de rendement sont très vagues sur les processus de développement dans le temps et sont principalement utilisés pour la prise de décision et la planification sylvicoles. En effet, les gestionnaires de plantations forestières voient souvent le monde différemment des scientifiques qui étudient la gestion de la végétation, et cette différence se reflète dans les types de modèles que chacun préfère. Les gestionnaires de plantations forestières, bien que souvent très intéressés par les systèmes écologiques, sont souvent tenus de gérer des budgets et les investissements, tandis que les scientifiques sont généralement motivés par de nouvelles découvertes sur le comportement des plantes.

Pour Weiskittel et al. (2011), la pratique de la foresterie est principalement centrée sur la sélection et l'application du meilleur ensemble de traitements sylvicoles nécessaires pour atteindre les objectifs du propriétaire foncier et de la société. Par conséquent, l'une des principales utilisations des modèles de croissance et de rendement des forêts consiste à projeter les conséquences à long terme de ces diverses décisions sylvicoles au niveau des peuplements, particulièrement s'il s'agit de plantation (Mason et Dzierzon 2006). Il s'agit d'une utilisation importante des modèles car l'installation et la maintenance des essais sur le terrain à long terme sont coûteuses et prennent du temps. De plus, toutes les combinaisons de traitements ne peuvent pas être reproduites à travers le paysage. La recherche d'un système sylvicole optimal dépend donc souvent des projections obtenues à partir d'un modèle de croissance. Les entreprises de produits forestiers peuvent prendre des décisions financières importantes sur la base des résultats d'un modèle de croissance unique (Weiskittel et al. 2011).

Nos objectifs pour ce chapitre sont donc de plusieurs natures. Dans un premier temps, nous devons solliciter nos partenaires pour collecter et assembler des données de croissance juvéniles qui renseignent différents parcours sylvicoles et dont la densité de plantation est faible pour pouvoir s'affranchir de la compétition intraspécifique. La base de données assemblée, les analyses effectuées dans un second temps devront permettre de tester les hypothèses suivantes :

1. Quel est l'impact des différents types de préparation de site sur la croissance des semis ?

2. Existe-t-il des préparations de site plus performantes que d'autres en termes de croissance des semis ?
3. Pour une même préparation de site, la réponse de croissance des semis est-elle espèce – dépendante ?

La croissance des arbres peut être définie comme l'augmentation des dimensions d'un arbre individuel au fil du temps (Weiskittel et al. 2011). Les dimensions les plus couramment mesurées sont la hauteur et le diamètre, car ce sont des mesures pratiques qui sont fortement corrélées avec le volume et la biomasse du bois (Bowman et al. 2013). Les modèles de croissance au cours de la durée de vie d'un arbre varient en fonction de la dimension mesurée. Alors que les schémas de croissance varient selon les espèces d'arbres et les conditions de croissance (Héroult et al. 2011), en général, la hauteur augmente rapidement quand un arbre est jeune, mais tend à se stabiliser lorsqu'un arbre atteint la maturité et l'augmentation de la hauteur peut approcher zéro. Le diamètre de la tige augmente relativement régulièrement au cours de la durée de vie d'un arbre (Hann et Larsen 1991; Héroult et al. 2011; Weiskittel et al. 2011). Dans le cadre de la modélisation juvénile, des équations exponentielles distinctes ont été ajustées pour différentes combinaisons d'espèces, de type de stock et de stockage (Mason 2001).

Pour intégrer la préparation de site au modèle, il faut considérer que les réponses des peuplements au traitement produisent à la fois un effet direct et un effet indirect (Miller et Tarrant 1983; Auchmoody 1985). Ici, l'effet direct sera défini comme la différence entre l'accroissement entre une parcelle traitée et une parcelle non traitée qui possède des attributs structurels d'arbre et / ou de parcelle identiques. Trouver des parcelles non traitées ou des arbres avec des attributs structurels identiques peut être un défi (Duzan et al. 1982), et les différences entre les attributs structurels des parcelles non traitées et traitées peuvent masquer les effets d'un traitement (Wells et al. 1976).

Trois approches sont couramment utilisées pour représenter les traitements sylvicoles dans les modèles de peuplements (Weiskittel et al. 2011) :

1. Ajuster des équations séparées pour les parcelles traitées et non-traitées ;

2. Ajuster une équation unique qui incorpore des variables prédictives pour le traitement aux ensembles des données qu'il s'agisse de parcelle traitée ou non ;
3. Ajuster une équation avec un modificateur de traitement qui est soit un multiplicateur soit un additif d'une équation non traitée développée séparément.

Les trois méthodes ont utilisé soit des techniques de régression linéaire appliquées à une linéarisation log – log de la forme de modèle non linéaire sous-jacente, soit des techniques de régression non linéaire, pour estimer les paramètres des équations (Weiskittel et al. 2011).

Pour Weiskittel et al. (2011), ce qui caractérise la seconde approche, c'est de pouvoir être exécutée d'une manière qui confond non seulement les effets directs et indirects des traitements, mais aussi la réponse au traitement et la réponse non traitée, de sorte que la séparation des divers éléments de la réponse devient impossible. Les auteurs attirent toutefois l'attention sur le fait que la seconde approche peut également produire une composante de l'équation qui sert de modificateur de traitement multiplicatif ou additif. Si tel est le cas, la deuxième méthode estime simultanément les paramètres à la fois pour la partie arbre / peuplement non traitée de l'équation et pour le modificateur de traitement.

Par ailleurs, des problèmes dans la matrice de corrélation des variables prédictives se répercutent également sur les modèles non linéaires (Seber et Wild 2003), et une mauvaise spécification des formes de modèles non linéaires peut également conduire à des prédictions biaisées et incohérentes (Kmenta 1997; Ritz et Streibig 2008). Par conséquent, l'estimation simultanée des paramètres à la fois d'une équation non traitée et d'un modificateur de traitement peut être considérée comme réussie si elle conduit à une équation qui partitionne avec précision la réponse globale de l'attribut dans la partie à la fois due et non due au traitement. Une partition réussie se traduira par un modificateur qui caractérise l'effet direct du traitement (Weiskittel et al. 2011).

II. Matériels et méthodes

II.1. Sélection et organisation des données de croissance

De nombreux essais de préparation du site ont été réalisés en France. Nous avons rassemblé les données de certaines de ces expériences afin de créer une base de données comprenant des données d'expériences où des mesures répétées de la hauteur ou du diamètre des arbres individuels à hauteur de poitrine ont été prises au cours des vingt premières années après la plantation. Ces données couvraient une période allant des années 1960 à nos jours, qui reflétaient un grand nombre de traitements, dont certains ne sont plus utilisés.

La base de données comprenait sept espèces réparties sur 23 sites différents et 89 traitements (voir Figure 9). Parmi les sept espèces, trois étaient à feuilles caduques : le peuplier (*Populus spp.* Voir matériel supplémentaire pour plus de précision), le chêne pédonculé (*Quercus robur L.*) et le chêne sessile (*Quercus petraea Liebl.*), quatre étaient des conifères : le douglas (*Pseudotsuga menziesii Franco*), le pin laricio (*Pinus nigra var. corsicana Hyl.*), le pin sylvestre (*Pinus sylvestris L.*) et l'épicéa (*Picea abies L.*). Étant donné que les deux espèces de chênes présentent des profils de croissance similaires au cours de leurs périodes juvéniles (Parelle et al. 2007; Annighöfer et al. 2015; Collet et al. 2017), elles ont été regroupées sous l'étiquette *Quercus spp.* pour l'analyse. Trente-six origines génétiques différentes du Douglas ont été utilisées dans les expériences.

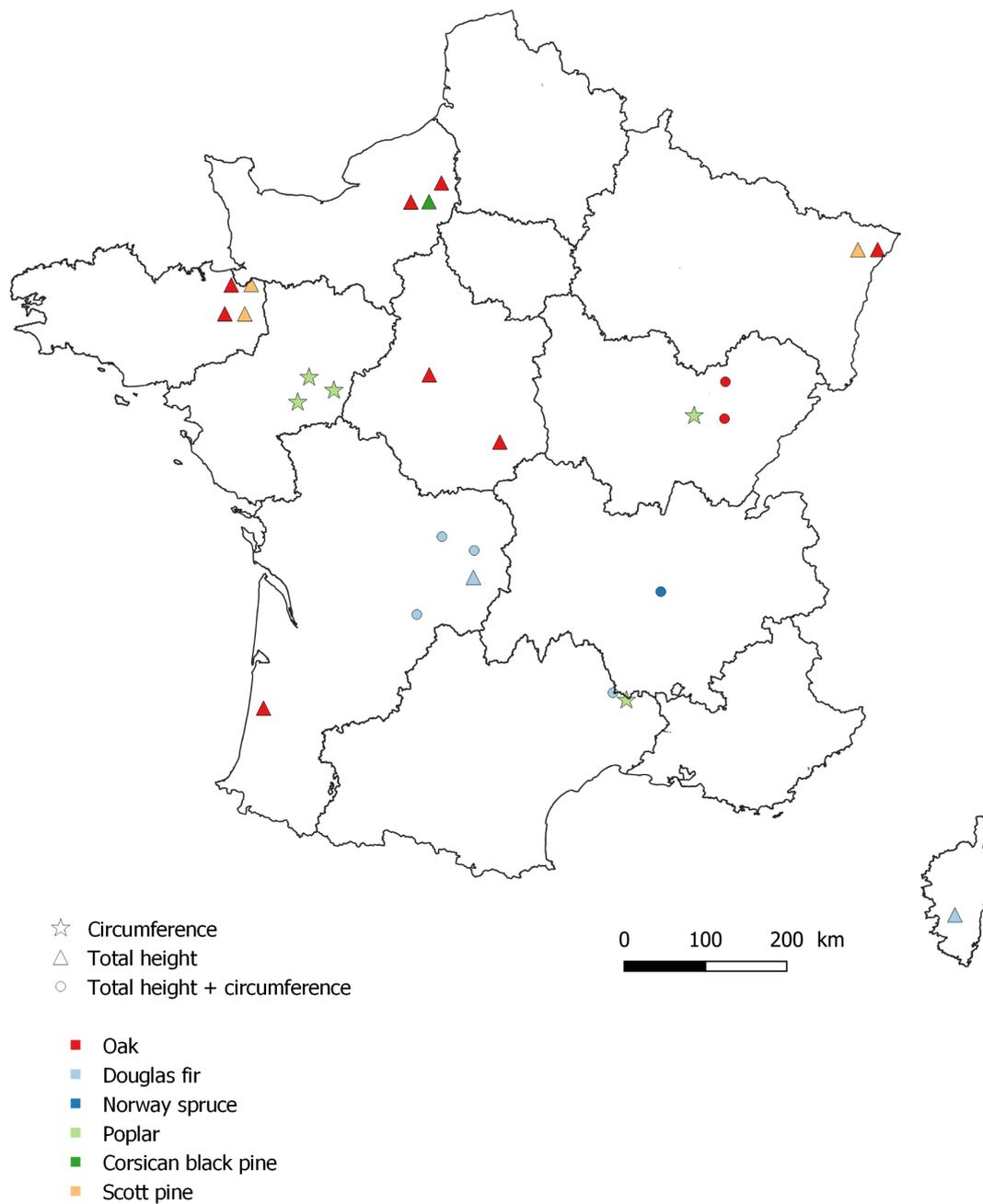


Figure 9. Cartes des différents dispositifs expérimentaux : localisation, essences et mesures disponibles.

Une grande variété de traitements a été testée à travers les différentes expériences. Les méthodes ont été regroupées en sept principaux types de préparation du site appliqués pendant la période juvénile (voir Annexe 3):

- 1) Les traitements mécaniques font référence à la préparation du site à l'aide d'outils mécaniques pour réduire les contraintes du sol ou pour contrôler la végétation concurrente, quel que soit le type d'outil utilisé, l'année et la saison des opérations.
- 2) Les traitements de fertilisation représentent l'utilisation d'engrais indépendamment de leur concentration ou de la période d'application.
- 3) Les traitements herbicides représentent l'utilisation d'herbicides indépendamment de leur matière active, de leur concentration ou de la période d'application.
- 4) Les traitements de fertilisation hybrides combinant des méthodes mécaniques et de fertilisation.
- 5) Les traitements aux herbicides hybrides combinant des méthodes mécaniques et herbicides.
- 6) Les traitements d'amendement sans considération de leur matière active, de leur concentration ou de leur période d'application.
- 7) Les traitements témoins ont indiqué l'absence de toute intervention.

Pour éviter toute confusion, nous désignerons désormais ces sept catégories comme des types de préparation de site. Chaque type comprenait des méthodes connues pour différer par l'intensité de leur effet sur la performance des semis. Cependant, compte tenu du nombre d'observations dans la base de données, il n'a pas été possible de créer une typologie plus détaillée des traitements de préparation du site.

Dans toutes les expériences, les traitements ont été appliqués au niveau de la parcelle, chaque parcelle contenant entre 52 et 2551 arbres (voir Annexe 4 et Annexe 5). Le nombre de

traitements par site variait entre 2 et 8, et le nombre de répétitions pour chaque traitement, entre 1 et 3. Dans la plupart des expériences, les parcelles étaient regroupées en blocs.

La base de données a fourni des mesures répétées de la hauteur totale de l'arbre (cm) et du diamètre à hauteur de poitrine (cm). Cependant, la hauteur et le diamètre n'ont pas été mesurés sur tous les sites et beaucoup d'entre eux n'ont fourni que des données de hauteur ou de diamètre (voir Annexe 6). Sur les sites où la hauteur et le diamètre étaient mesurés, ils n'étaient pas toujours mesurés en même temps. Certains sites ont montré des mesures de hauteur pendant les premières années et des mesures de diamètre par la suite. La mortalité des arbres n'a pas été prise en compte dans l'analyse. Les hauteurs et les diamètres des plants morts à un moment donné au cours de l'expérience n'ont pas été écartés. Ils ont été intégrés dans l'analyse jusqu'à la mort des plants.

La durée de la période de surveillance variait également d'une expérience à l'autre (voir Annexe 6). Puisque l'étude s'est concentrée sur la période de croissance initiale suivant la plantation, nous avons conservé les mesures prises dans les 20 premières années après la plantation et avons écarté les autres. Une première série de modèles sigmoïdes a été adaptée aux profils de croissance complets ce qui nous a permis de les couper au point d'inflexion de la courbe. La limite d'âge que nous avons obtenue a été comparée et validée avec celles décrites dans la littérature (Clark 1983). Le rejet des mesures effectuées plus de 20 ans après la plantation a permis de ne conserver que la phase de croissance exponentielle, qui correspond à la période juvénile pour toutes les espèces étudiées.

Pour évaluer l'impact de la limite d'âge, nous avons comparé les régressions effectuées en utilisant des limites d'âge de 10 et 15 ans et nous n'avons observé aucune différence significative dans les paramètres de régression. Un seuil de 20 ans semblait le meilleur compromis entre la durée de la période d'étude (des périodes plus longues auraient apporté plus d'informations) et le nombre de données disponibles pour l'étude (des périodes plus courtes auraient permis d'intégrer plus de jeux de données dans l'étude).

II.2. Définition du modèle et analyses statistiques

Il y avait une grande variabilité dans la base de données en raison de la diversité des contextes sylvicoles, des sols et des techniques de préparation du site. Par exemple, le chêne était en grande partie surreprésenté avec un grand nombre de sites alors que le pin n'a été trouvé que sur un seul site. De plus, les différents types de préparation de site n'étaient pas nécessairement répétés d'un site à l'autre et d'une espèce à l'autre. En conséquence, il était impossible d'ajuster un modèle unique qui aurait englobé toutes les espèces, et nous avons ajusté un modèle pour chaque espèce indépendamment.

La base de données était déséquilibrée entre les espèces, les sites et les traitements, et certaines combinaisons site x espèces n'étaient représentées que dans un seul site.

Nous avons adapté des modèles de puissance aux premières années de croissance individuelle des semis. Certains modèles ont été construits pour inclure les effets des facteurs environnementaux et des activités de gestion sur les cultures juvéniles (Mason et al. 1997; Mason 2001) et ont de meilleures propriétés du point de vue des mensurations. Cependant, l'abstraction de ces approches limite leur capacité à représenter un système hautement dynamique avec une végétation concurrente changeante et des influences microclimatiques. Ainsi, nous choisissons cette forme de modèle pour le potentiel de modélisation qu'elle offre et que nous souhaitons conserver dans le second chapitre pour établir un fil conducteur sur l'étude. Ce type de modèle est tiré de la littérature (Clark 1983). Il est souvent utilisé pour représenter le rendement des arbres juvéniles (Mason et al. 1997, 2007; Mason 2001; McKay et Mason 2001) et peut être exprimé comme suit :

$$Y_t = Y_0 + \alpha t^\beta + \varepsilon$$

Équation 1. Modèle de croissance exponentielle adapté à la période juvénile (Clark 1983).

où Y_0 correspond aux valeurs initiales des variables dendrométriques Y (hauteur ou diamètre de l'arbre), t est le temps écoulé depuis la plantation (années), Y_t est le Y observé au temps t , α et β sont les paramètres du modèle à estimer et ε est un terme d'erreur résiduel. Dans des études antérieures, il a été démontré que les paramètres du modèle étaient liés de manière linéaire au site, à la gestion de la végétation, à la préparation du site et aux effets sur la qualité des semis.

Le modèle montré dans l'Équation 1 permet une baisse du taux de croissance relative qui se produit à mesure que les arbres juvéniles grandissent (Kironko et Mason 2003).

La structure hiérarchique de la base de données, c'est-à-dire des arbres imbriqués dans des parcelles, imbriqués dans des blocs, imbriqués dans des sites, a probablement abouti à des données auto-corrélées et à une violation de l'hypothèse d'indépendance. L'utilisation de techniques statistiques traditionnelles fondées sur les estimateurs des moindres carrés conduit à un niveau de signification biaisé des effets fixes lorsque l'hypothèse d'indépendance ne tient pas (Gregoire et al. 1995). L'approche du modèle à effets mixtes (à la fois aléatoires et fixes) permet d'assouplir l'hypothèse d'indépendance, par la spécification d'effets aléatoires dans le modèle.

Différents niveaux d'effets aléatoires ont été testés dans le modèle : arbre, parcelle, bloc et site. Les critères d'information Akaike et Bayésien (Pinheiro 2000 p.84) ont été utilisés pour sélectionner les modèles qui correspondaient le mieux aux données. En plus des critères, des corrélations empiriques ont été calculées sur les résidus normalisés pour identifier les corrélations persistantes résiduelles, qui ne seraient pas expliquées par les effets aléatoires (Fortin et al. 2008).

Le modèle générique, ajusté séparément pour la hauteur ou le diamètre, résultant de ce processus de sélection pourrait être exprimé comme suit :

$$y_{(t)ijkl} = y_{0ijkl} + (\alpha_s + b_{i,1} + b_{ij,1} + b_{ijk,1} + b_{ijkl,1}) t_{ijkl}^{\beta_s + b_{i,2} + b_{ij,2} + b_{ijk,2} + b_{ijkl,2}} + \varepsilon_{ijkl}$$

Équation 2. Adaptation du modèle sélectionné pour l'ajustement aléatoire multi-niveaux.

où $y_{(t)ijkl}$ est la hauteur ou le diamètre de l'arbre pris sur l'arbre l de la parcelle k du bloc j du site i et; t_{ijkl} est l'âge de l'arbre (an); α_s et β_s sont les paramètres d'effets fixes; $b_{x,i}$, $b_{x,ij}$, $b_{x,ijk}$ et $b_{x,ijkl}$ (où $x = 1$ ou 2) sont des effets aléatoires de site, de bloc, de parcelle et d'arbre, respectivement; et ε_{ijkl} est le terme d'erreur résiduel. Chaque niveau d'effets aléatoires est en fait représenté par un vecteur de deux effets aléatoires, par ex. $b_i = (b_{i,1}, b_{i,2})^T$. On suppose que ces vecteurs d'effets aléatoires suivent des distributions normales bivariées avec une moyenne de 0 et une variance à estimer. De même, le terme d'erreur résiduelle ε_{ijkl} est supposé suivre une distribution normale multivariée avec une moyenne de 0 et une variance-covariance R . Les tests

préliminaires incluait des effets aléatoires de bloc, mais le processus de sélection du modèle a révélé qu'il n'était pas significatif et que ce niveau d'effets aléatoires était retiré des analyses ultérieures.

Sur la base de simulations de Monte-Carlo, nous avons réalisé des t-tests pour discriminer les types de traitement à 5, 10 et 15 ans. Les différences perçues comme très significatives se reflètent dans les chiffres par des intervalles de confiance non chevauchants entre deux types de traitements. Des intervalles de confiance et des comparaisons entre différents traitements à différentes dates cibles ont été obtenus à l'aide de simulations de Monte Carlo.

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées avec R (version 3.3.2, R Core Team, 2016). Les modèles mixtes non linéaires ont été ajustés à l'aide du package nlme ver. N 3.1-131 (Pinheiro et al. 2019).

III. Résultats

Les résultats sont présentés par espèce. Les prévisions de diamètre et de hauteur sont présentées dans les Figure 10 et Figure 11. Les Table 2 et Table 3 présentent les résultats des modèles par espèce et traitement. Les valeurs des estimations de paramètres obtenues à partir des modèles sont présentées en Annexe 1 et Annexe 2.

Nous procéderons à l'analyse de ces résultats en deux temps en commentant d'abord les résultats généraux issus des différents modèles de diamètre et de hauteur. Par la suite, nous étudierons au cas par cas plus en détail les différentes essences présentes dans nos analyses.

III.1. Résultats de diamètre

Les résultats de diamètre présentés respectivement dans la Figure 10 et la Table 2 présentent les estimations de l'évolution des variables dendrométriques de diamètre pour trois essences au cours du temps. Ces données doivent néanmoins être abordées avec la plus grande prudence en raison d'un déséquilibre des données entre les essences et dans les traitements.

En effet, dans le cas d'étude du chêne, les amendements n'étaient présents que sur un seul des sites de notre base de données, là où tous les autres traitements étaient répliqués sur plusieurs sites. Ce constat doit être également fait pour le peuplier, où le traitement témoin n'était présent que sur un seul site contrairement aux autres. Dans de tels cas de figure, il n'est pas possible de différencier les effets liés aux types de traitement et les effets liés aux sites. Par ailleurs, ce déséquilibre dans les données peut être la source de la marge d'erreur anormalement élevée de ces courbes.

Dans le cas de l'épicéa, nous n'avons à notre disposition qu'un seul site renseignant des valeurs de diamètre. Dans cette optique, il ne nous est également pas possible de faire une interprétation robuste car, sans réplication, le modèle ne peut faire la part des effets liés au traitement et des effets liés au site.

Toutefois, en prenant bien soin de considérer les courbes qui ne présentent pas ces problèmes, il est possible de mettre en avant le fait que, dans le cas du chêne comme dans celui du peuplier, les traitements de type herbicide et de type mécanique semblent avoir la même

efficacité. En effet, la Figure 10 met en avant que les intervalles de confiance de ces deux types de traitement se chevauchent fortement (cas du peuplier) voire totalement (cas du chêne). Ces observations sont confirmées par la Table 2 où les valeurs estimées de diamètre pour le chêne sont très proches en termes d'estimation moyenne à tous les âges de référence. Dans le cas du peuplier la différence de diamètre à 5 ans entre les traitements mécaniques (12,5 cm) et les traitements herbicides (13,3 cm) est minime et les intervalles de confiance se chevauchent largement.

En définitive, bien que déséquilibrées, ces données nous ont permis de tirer un premier enseignement de ces analyses. Si l'on considère la variable dendrométrique de diamètre et sur le seul critère de performance, nous n'avons pu établir aucune différence significative entre les techniques utilisant les herbicides et celles mettant en œuvre une mécanisation du site.

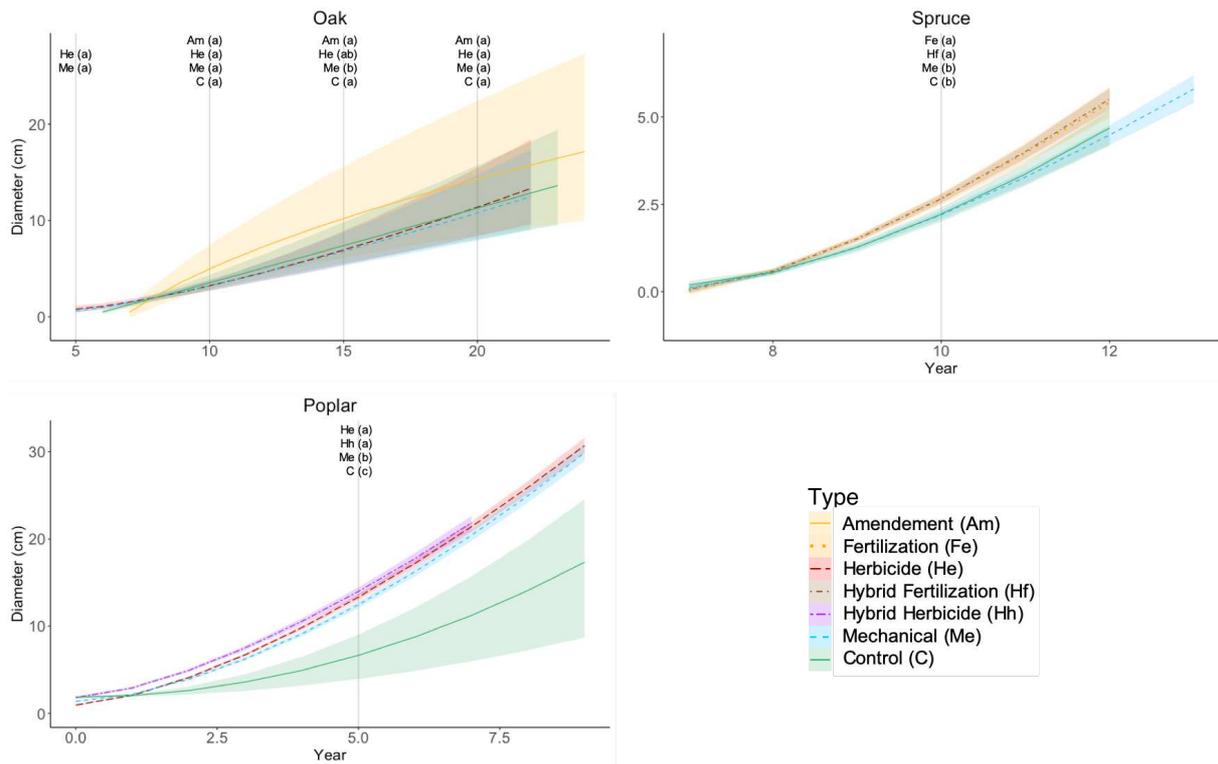


Figure 10. Diamètre à hauteur de poitrine du chêne, épicéa et peuplier cultivés selon différentes méthodes de préparation du site (Am : amendement ; Fe : fertilisation ; He : herbicide ; Hf : fertilisation hybride ; Hh : herbicide hybride ; Me : mécanique ; C : témoin) : valeurs prédites et intervalles de confiance à 95%. Les valeurs moyennes des traitements ont été comparées à 5, 10, 15 et 20 ans à l'aide d'un test Monte-Carlo à intervalles de confiance à 95% : les valeurs moyennes suivies de la même lettre ne diffèrent pas significativement à la date du test. Les échelles X et Y diffèrent selon les graphiques.

Espèces	Traitement	Age	Diamètre prédit (cm)		
			Inf	Moyenne	Sup
Chêne sessile et pédonculé	Amendement	10	2.9	5.0	7.5
		15	6.1	10.2	15.6
		20	8.4	14.3	22.3
	Herbicide	10	2.7	3.2	3.8
		15	5.4	6.9	8.9
		20	8.4	11.4	15.4
	Mécanique	10	2.8	3.2	3.8
		15	5.3	6.8	8.8
		20	7.9	10.8	14.7
	Témoin	10	2.8	3.5	4.4
		15	5.5	7.4	9.8
		20	8.0	11.3	15.7
Épicéa	Fertilisation	10	5.0	5.4	5.9
	Hybride Fertilisation	10	5.2	5.5	5.8
	Mécanique	10	4.2	4.5	4.8
	Témoin	10	4.2	4.7	5.2
Peuplier	Herbicide	5	13.0	13.3	13.7
	Hybride Herbicide	5	13.5	14.0	14.5
	Mécanique	5	12.1	12.5	12.9
	Témoin	5	4.0	6.7	9.0

Table 2. Diamètre des semis prédits à différents âges (moyenne et intervalles de confiance de 0,95).

III.2. Résultats de hauteur

Les résultats de hauteur présentés respectivement dans la Figure 11 et la Table 3 présentent les estimations de l'évolution des variables dendrométriques de hauteur pour 5 espèces au cours du temps. Dans l'ensemble, hormis pour l'épicéa, qui ne se base que sur un seul site et le douglas, qui n'a pas de répétition de chaque type de traitement sur tous les sites, les résultats de hauteurs présentent des simulations plus fiables. Nous baserons donc notre interprétation des résultats sur l'ensemble des essences à l'exception du douglas qui, ne présentant qu'un seul site, ne permet pas de distinguer les effets de site des effets de traitement. Les différents graphiques présentés dans la Figure 11 nous permet d'établir 4 grandes observations.

En premier nous pouvons voir que, exception faite des traitements de type amendements dans les dernières années, les techniques de préparation du sol quelles qu'elles soient sont supérieures au traitement témoin. Si l'on regarde les intervalles de confiance présentés en Figure 11, nous pouvons voir que hormis pour l'épicéa, l'écart est significatif à partir de 5 ans.

En second, les résultats présentés par la simulation de hauteur sur le chêne dans la Figure 11 nous montre que les traitements de type amendement sont performante à 5 ans (seconde meilleure courbe), supplantés par les traitements de type herbicide et de type mécanique à 10 ans et comparables au témoin à 20 ans. En étudiant plus spécifiquement la Table 3, nous pouvons constater que les estimations de hauteur pour le chêne à 20 ans sont d'à peu près 10m pour les traitements de type amendements, contre 9,85m pour les traitements de type témoin. Les bornes supérieures et inférieures des intervalles de confiance constatés pour ces deux traitements sont tout à fait comparables à cet âge.

En troisième, pour les essences qui présentent à la fois les traitements de types mécaniques et de type herbicide tel que c'est le cas pour le chêne, le pin laricio et le pin sylvestre, nous pouvons remarquer que les performances sont identiques. En effet, la Figure 11 et la Table 3 présentent des estimations de hauteur et des intervalles de confiance tout à fait comparables pour ces deux types de traitements, quel que soit l'âge considéré.

Enfin, pour les essences telles que le chêne ou l'épicéa, les traitements mixtes sont les plus performants. En effet, la Figure 11 et la Table 3 nous montrent que ces traitements constituent systématiquement les meilleures estimations de valeurs aux âges où ils sont comparés étant soit très significativement supérieures aux autres types de traitements (cas du chêne) ou égales par les traitements les plus performants sur les essences considérées (cas de l'épicéa avec les traitements de type amendement).

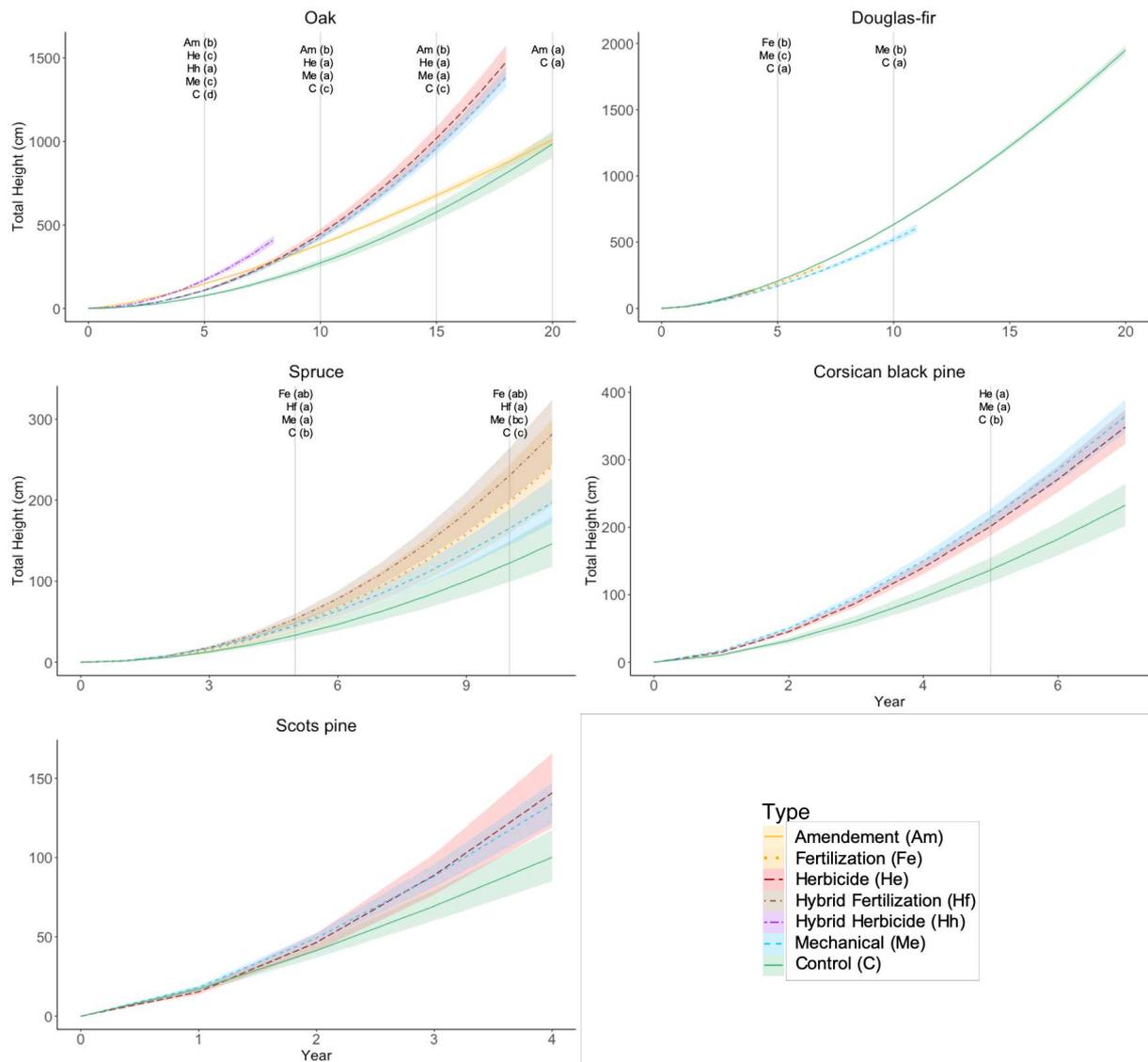


Figure 11. Hauteur totale du Chêne, Douglas, Épicéa, Pin laricio et Pin sylvestre cultivés selon différentes méthodes de préparation du site (Am : amendement ; Fe : fertilisation ; He : herbicide ; Hf : fertilisation hybride ; Hh : herbicide hybride ; Me : mécanique ; C : témoin) : valeurs prédites et intervalles de confiance à 95%. Les valeurs moyennes des traitements ont été comparées à 5, 10, 15 et 20 ans à l'aide d'un test Monte-Carlo à intervalles de confiance à 95% : les valeurs moyennes suivies de la même lettre ne diffèrent pas significativement à la date du test. Les échelles X et Y diffèrent selon les graphiques.

Espèces	Traitement	Age	Hauteur prédite (cm)		
			Inf	Moyenne	Sup
Chêne sessile et pédonculé	Amendement	5	144	147	149
		10	375	385	395
		15	656	677	698
		20	975	1010	1047
	Herbicide	5	101	109	117
		10	415	447	477
		15	948	1019	1088
	Hybride Herbicide	5	157	169	180
		5	102	107	112
	Mécanique	10	410	428	446
		15	921	962	1003
		5	68	75	81
	Témoin	10	249	272	294
15		529	577	623	
20		904	985	1063	
Douglas	Fertilisation	5	179	188	197
	Mécanique	5	161	170	178
		10	494	520	545
	Témoin	5	203	206	208
		10	624	634	643
		15	1204	1224	1245
		20	1919	1953	1989
Épicéa	Fertilisation	5	38	46	54
		10	159	198	243
	Hybride Fertilisation	5	47	53	60
		10	200	230	264
	Mécanique	5	41	45	50
		10	144	165	189
	Témoin	5	28	33	39
10		99	122	149	
Pin laricio	Herbicide	5	188	202	216
	Mécanique	5	201	214	227
	Témoin	5	119	137	155
Pin sylvestre	Herbicide	4	119	141	166
	Mécanique	4	121	134	147
	Témoin	4	85	100	117

Table 3. Hauteurs des semis prédites à différents âges (moyenne et intervalles de confiance de 0,95).

III.3. Résultats spécifiques pour le Chêne

Chez le chêne, le type herbicide hybride a montré la meilleure croissance en hauteur dans les premières années (environ 169cm à 5 ans, Figure 11 et Table 3). Cependant, nous ne pouvions pas nous prononcer davantage sur ce type de traitement car les données pour ce traitement ne dépassaient pas cet âge. Le type d'amendement était efficace au départ avec 147cm à 5 ans contre 109, 107 et 75cm pour les traitements herbicides, mécaniques et témoins, respectivement (Table 3). Après 10 ans, l'amendement a été surpassé par des traitements utilisant des herbicides ou des alternatives mécaniques (385, 447, 428 et 272cm pour l'amendement, l'herbicide, la mécanique et le contrôle, respectivement). À 20 ans, les données n'étaient disponibles que pour l'amendement et le contrôle, et les deux types étaient comparables (1010 et 985cm pour l'amendement et le contrôle, respectivement).

La croissance du diamètre des arbres a montré le même schéma observé pour la croissance en hauteur sur toute la période d'étude (Figure 10 et Table 2). Cependant, les différences entre les types de traitements étaient rarement significatives (Table 2). Le modèle a montré une phase plateau pour l'amendement tandis que d'autres traitements ont montré une croissance exponentielle.

Les effets de l'amendement sur la croissance du chêne sont difficiles à interpréter car un seul site était disponible et il n'a pas été possible de démêler les effets du site et du traitement.

III.4. Résultats spécifiques pour le Douglas

La croissance en hauteur du Douglas était meilleure dans le cas du témoin par rapport aux traitements (à l'âge de 5 ans, 206, 188 et 170cm dans le témoin, la fertilisation et le traitement mécanique, respectivement; à l'âge de 10 ans, 634 et 520cm dans le témoin et le traitement mécanique, respectivement, Figure 11 et Table 3). Le modèle de croissance du diamètre du Douglas n'a montré aucune différence significative entre les traitements, mais la puissance des analyses a été réduite par la petite taille de l'échantillon.

Les données pour le Douglas étaient très déséquilibrées : seulement deux sites avec fertilisation et un site avec traitement mécanique ou hybride, alors qu'un traitement témoin a été réalisé dans tous les sites. À l'exception du témoin, l'effet du type de traitement n'a pas pu

être différencié de l'effet du site. De plus, le traitement hybride n'avait été mesuré que pendant 7 ans, ce qui limitait la comparaison avec d'autres traitements.

III.5. Résultats spécifiques pour l'Épicéa

Pour l'épicéa, les trois types de préparation du site ont montré des hauteurs supérieures au témoin, mais ne différaient pas significativement les uns des autres, cinq ans après la plantation (33, 46, 53 et 45cm pour le contrôle, la fertilisation, la fertilisation hybride et le traitement mécanique, respectivement, Figure 11 et Table 3). A l'âge de 10 ans, le traitement mécanique (165cm) était intermédiaire entre le témoin (122cm) et la fertilisation ou fertilisation hybride (198 et 230cm, respectivement). Des observations similaires ont été faites pour le diamètre, sauf que le contrôle était similaire au traitement mécanique (Figure 10 et Table 2), avec respectivement 4,5, 4,7, 5,4 et 5,5cm pour les traitements mécanique, contrôle, fertilisation et fertilisation hybride. Notons que cette espèce n'a pas bien performé par rapport aux autres espèces. Cela pourrait s'expliquer par le fait que nous n'avions qu'un seul site et que les performances des semis sur ce site étaient inférieures à la moyenne.

III.6. Résultats spécifiques pour le Pin laricio

Pour le pin laricio, seules les mesures de hauteur étaient disponibles. Les deux types de préparation du site ont eu un effet positif sur la croissance des semis. À l'âge de 5 ans, ils étaient supérieurs au témoin (202, 214 et 136cm pour les traitements herbicides, mécaniques et témoins, respectivement, Figure 11 et Table 3). Les deux types de traitements n'étaient pas statistiquement différents.

III.7. Résultats spécifiques pour le Pin sylvestre

Pour le pin sylvestre, seules les mesures de hauteur étaient disponibles, et pour une très courte période de temps. Tant l'herbicide que le type mécanique ont eu un effet positif sur les semis, et les plantes traitées étaient supérieures au témoin. Le traitement mécanique était différent du témoin dès la deuxième année (18 et 17cm respectivement, Figure 11 et Table 3) et le type de traitement herbicide était différent du témoin dès la troisième année (46 et 41cm)

(Figure 11 et Table 3). Cependant, les types mécaniques et herbicides ne diffèrent jamais significativement (respectivement 133 et 140cm) quatre ans après la plantation (Figure 11 et Table 3).

III.8. Résultats spécifiques pour le Peuplier

Pour le peuplier, seuls les diamètres étaient disponibles. Les trois types de traitements de préparation du site étaient significativement différents du témoin. Cinq ans après la plantation, les diamètres moyens prévus ont été estimés à 6,7, 12,5, 13,3 et 14cm respectivement pour le contrôle, la mécanique, les herbicides, les hybrides et les herbicides (Figure 10 et Table 2). Il faut souligner que le traitement témoin n'était présent que dans un seul site pour le peuplier.

IV. Discussion

Cette étude est la première à croiser, dans une seule base de données, un grand nombre d'espèces couramment cultivées selon plusieurs types de traitements de préparation et leurs effets sur la croissance des plants afin d'identifier leurs performances générales. Dans cette étude, un grand nombre de traitements de préparation de sites ont été regroupés, ce qui a permis de présenter un large éventail de réponses pour plusieurs espèces d'arbres couramment plantées en France. Des modèles de croissance en diamètre et en hauteur pour la phase juvénile ont été produits. Notre approche de modélisation n'a pas pu pleinement tenir compte de certaines limites de l'ensemble de données disponibles tel que le déséquilibre des données, et il faut être prudent lors de l'interprétation des résultats des modèles pour les données qui ont peu de réplifications de sites.

À l'exception du Douglas, **les traitements de préparation du site ont largement amélioré la croissance des semis par rapport au contrôle et l'effet positif s'est accru avec le temps.** Ce résultat inattendu pour le Douglas était très probablement lié au déséquilibre des données, qui empêchait de dissocier le traitement des effets du site pour plusieurs traitements. Dans l'ensemble, les traitements combinés ont montré les meilleures performances, quelles que soient l'espèce et la variable de réponse, ce qui est généralement en accord avec la littérature précédente (Munson et Timmer 1995; Nilsson et Allen 2003; Löf et al. 2006; Olykan et al. 2008; Furtado et al. 2016).

Il est probable que l'efficacité des traitements mixtes dépende de la complémentarité des traitements. D'une part, les traitements mécaniques, comme le labour, ont la capacité de lever plusieurs contraintes liées au sol ou à la végétation (Youngblood et al. 2011; Aleksandrowicz-Trzecińska et al. 2017; Thiffault et Hébert 2017), et les traitements herbicides visent à réduire la végétation voisine. Les deux types de traitements ne sont pas conçus pour augmenter la teneur en éléments nutritifs du sol, et les opérations mécaniques peuvent même induire des pertes de matière organique et provoquer des fuites d'éléments nutritifs (MacDonald et al. 1998; Piirainen et al. 2007). D'autre part, la fertilisation améliore la teneur en éléments nutritifs du sol, mais elle peut induire une concurrence plus forte de la végétation voisine. En conséquence, la

combinaison de la fertilisation et de la préparation chimique ou mécanique du site fournit une méthode complète, qui est meilleure que n'importe quelle méthode unique.

Les semis ont montré des performances similaires dans les traitements chimiques et mécaniques, pour toutes les espèces où les deux traitements ont pu être comparés. Les deux traitements visent principalement à contrôler la concurrence de la végétation voisine, ce qui est essentiel pendant les premières années après la plantation (Örlander et al. 1990; Löf et al. 2006; Pinna et al. 2012), il n'est donc pas étonnant qu'ils montrent des performances comparables. Le coût financier de l'opération et les impacts environnementaux restent les principales différences entre les deux types de traitements, le traitement mécanique étant souvent plus coûteux mais considéré comme ayant un impact environnemental moindre (Löf et al. 2006; Hosseini Bai et al. 2014).

Nos données, à l'exception de l'épicéa qui sous-performe par rapport aux tables de croissance standard, ont confirmé les observations générales sur la croissance de chaque espèce. Il était évident que les essences de pin poussaient plus vite que le Douglas, qui avait une croissance plus rapide que les chênes.

La mortalité n'a pas été prise en compte dans cette étude. La survie des semis pendant la phase d'établissement dépend de nombreux facteurs liés au site et à la sylviculture et peut présenter de fortes variations interannuelles. La modélisation de la réponse de survie des semis plantés aux premiers traitements sylvicoles nécessite un nombre beaucoup plus élevé de sites répliqués que ce qui était disponible pour la présente étude (Calama et al. 2017). Les modèles intégrant la survie des semis pourraient présenter différentes perspectives.

En effet, les résultats de hauteur pour le chêne présentent des estimations similaires des traitements de type amendement et des traitements de type témoin à 20 ans. Toutefois, si la hauteur moyenne est comparable, aucune étude n'est faite sur la mortalité. Comme le montrent clairement les résultats présentés dans la Figure 11 et la Table 3, les résultats des traitements de types amendement montrent, dans les premières années, des hauteurs nettement supérieures au témoin, n'étant surclassé que par les traitements hybrides. Ce gain de hauteur précoce peut, par effet de dégagement de la végétation compétitrice, augmenter le taux de survie pour ces traitements. Considérant ce paramètre, la production des parcelles ayant été amendées, bien

qu'ayant la même hauteur moyenne à 20 ans, pourraient avoir un meilleur rendement du fait de leur survie supérieure.

Enfin, la souplesse de la fonction puissance a permis d'ajuster les modèles aux données, pour toutes les espèces et tous les traitements, suite aux travaux antérieurs de Belli et Ek (1988); Mason (2001); McKay et Mason (2001). Les modèles peuvent être utilisés pour estimer la croissance initiale de l'espèce en fonction d'une gamme d'opérations sylvicoles. Ils fournissent des fonctions de croissance qui complètent les modèles de croissance existants, qui se concentrent généralement sur le stade de maturité et n'intègrent pas les premiers stades de développement. Ces fonctions peuvent également être reparamétrées pour tout contexte particulier défini par des conditions de site spécifiques ou par de nouvelles méthodes de préparation de site.

V. Conclusions

Notre base de données, bien que limitée et déséquilibrée sur certaines essences, nous a permis de mettre en évidence plusieurs conséquences des préparations de site sur la croissance juvénile des semis en plantation.

Dans un premier temps, nous avons pu constater que les préparations de sites avaient globalement un effet positif sur la croissance juvénile des semis. Cet impact se traduit notamment par une augmentation significative de la hauteur et du diamètre de la tige dès les premières années qui suivent la plantation.

Dans un second temps, nous pouvons également observer grâce à cette étude que les performances des traitements herbicides et mécaniques étaient similaires. Sur le seul critère des résultats obtenus en plantation il ne nous est pas possible de discriminer ces deux types de traitements. **L'intégration d'autres variables telles que l'impact environnemental ou l'investissement financier nécessaire à leur mise en place sont nécessaires pour progresser dans cette analyse.** Toutefois, dans un contexte d'évolution des pratiques avec le retrait progressif des produits phytosanitaires en forêt, nous pouvons tout de même dire que les méthodes de type mécaniques représentent une alternative sérieuse aux méthodes herbicides et qu'elles offrent des performances similaires pour l'ensemble des espèces étudiées dans ce projet.

Par ailleurs, leur combinaison au sein de traitements hybrides amène un gain de productivité par rapport à des traitements simples. La complémentarité des traitements visant à supprimer la végétation compétitrice (herbicides et mécaniques) et ceux visant à augmenter le niveau de ressources (fertilisation) ou à optimiser leur cycle (amendements) présentent les meilleures performances sur chacune des essences où cela a été mis en place. La mise en place de telles pratiques devrait être systématiquement considérée et des perspectives intéressantes peuvent naître de la mise en place de telles méthodes. En effet, plusieurs travaux (Diaz et al. 1994; Hallsby 1995; Querejeta et al. 1998) ont développé l'incorporation de rémanents d'exploitation au sein de plantations donnant à l'aspect de production une dimension écologique liée au recyclage et à la valorisation des déchets.

Les effets des traitements de type fertilisation sont variables selon les espèces. Avec des essences à croissance lente, comme le chêne dans notre étude, l'effet bénéfique de ce type de traitement n'était plus observé après 20 ans. Passé ce point, la croissance des arbres sous ce type de traitement montre une forte inflexion de la courbe. **En revanche, pour les espèces à croissance rapide, comme l'épicéa dans notre étude, les gains ont été substantiels et les effets ont persisté dans le temps.**

Plusieurs perspectives pourraient compléter cette étude telles que l'étude de la survie et la prise en compte du type de sol par exemple. En effet, l'intégration de plus de données permettant de prendre en compte la mortalité dans notre simulation pourrait nous permettre d'appréhender plus complètement la réussite de la plantation. Des traitements qui sont comparables au témoin en fin d'étude mais qui montrent une croissance supérieure en hauteur et en diamètre dans les premières années de croissance, **comme** cela a été les cas pour les traitements de type amendement chez le chêne, pourraient mettre en lumière un meilleur taux de survie des semis. Cette meilleure survie traduirait une meilleure productivité de ces parcelles, malgré des performances jugées comme similaires avec nos modèles actuels.

De plus, une base de données plus équilibrée pourrait permettre des analyses conjointes au lieu de produire des analyses pour chaque espèce. Une analyse conjointe pour toutes les essences nous permettrait d'établir de meilleures interprétations sur les effets généraux des différents types de traitements et offrirait un complément d'étude intéressant à celles spécifiques à une seule essence.