

Faculté des bioingénieurs

Effet du mélange d'essences sur les propriétés architecturales du chêne sessile en jeune plantation

Auteur :	Marie Philippart
Promoteurs :	Prof. Quentin Ponette (UCLouvain) Prof. Mathieu Jonard (UCLouvain)
Lecteurs :	Frédéric André Grégory Timal
Année Académique :	2022 - 2023
Bioingénieur :	Gestion des forêts et des espaces naturels

Mémoire de fin d'études

Effet du mélange d'essences sur les propriétés architecturales du chêne sessile en jeune plantation



Marie Philippart

Professeurs : Quentin Ponette & Mathieu Jonard
Appui technique : Olivier Bouchez & François Plume

Année académique 2022-2023

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes promoteurs, MM. Ponette et Jonard, pour leur encadrement et leur aide tout au long de la réalisation de ce travail et plus particulièrement M. Jonard pour m'avoir souvent accueillie à l'improviste dans son bureau lorsque j'ai rencontré des difficultés dans mon avancée.

Ensuite, je remercie chaleureusement l'équipe technique du laboratoire forêt pour leurs aides répétées durant la campagne de mesures sur terrain, en particulier Olivier Bouchez qui m'a accompagnée pendant de nombreuses semaines, s'est montré très volontaire pour m'aider du mieux qu'il le pouvait et a été de très bonne compagnie. J'ai eu beaucoup de chance de bénéficier de sa gentillesse, son soutien et sa bonne humeur.

Je tiens aussi à mentionner Pieter Vangansbeke qui m'a encadrée dans la prédiction des variables réponses de mon travail grâce à la modélisation de régressions linéaires. Il s'est montré extrêmement réactif, bienveillant et disponible, et son aide m'a été très précieuse.

Un grand merci également à Frédéric André et Grégory Timal qui ont accepté gentiment de lire mon mémoire et d'assister à ma défense. Je les remercie aussi pour leur patience face aux conflits d'horaire.

Pour finir, une petite pensée pour Félicien d'Huart et Gilles Tilman qui m'ont soutenue, conseillée et accompagnée quotidiennement, dans les bons jours comme dans les moins bons. Et parce que sans les amis, la vie serait beaucoup moins drôle et intéressante, je remercie mes copines qui ont égayé ma dernière année à l'université : Pauline Debisschop, Elisa Di Francesco, Emilie Liénard et Pauline Vermeiren.

Merci à tous pour la contribution que vous avez apportée à mon apprentissage !

Table des matières

Remerciements	I
1 Introduction	1
1.1 Contexte et problématique	1
1.2 Objectifs spécifiques du travail	5
1.3 Structure du travail	5
2 Etat de l'art	6
2.1 Les propriétés architecturales	6
2.1.1 Intérêt et signification	6
2.1.2 Quelles méthodes existent pour qualifier l'architecture des arbres ?	7
2.1.3 Quels facteurs déterminent l'architecture des arbres ?	8
2.1.4 Pourquoi étudier les propriétés architecturales chez les jeunes individus ?	10
2.2 Pourquoi favoriser les essences en mélange ?	11
2.3 Le mélange dans une forêt mature vs un dispositif expérimental et difficultés techniques des plantations mélangées	14
2.4 Le focus sur le chêne : pourquoi ?	18
3 Matériel et méthodes	21
3.1 FORBIO Gedinne	21
3.1.1 Gedinne : climat et sol	21
3.1.2 Présentation du dispositif	22
3.1.3 Structure d'un "plot"	23
3.2 Préselection des individus cibles	25
3.3 Caractérisation des arbres cibles et de leur environnement	26
3.3.1 A l'échelle de l'arbre cible	26
3.3.2 A l'échelle des branches de l'arbre cible	26
3.3.3 A l'échelle des voisins	28
3.4 Traitement des données	29
3.4.1 Conception de la base de données	29
3.4.2 Choix des indicateurs pour caractériser l'effet du mélange sur l'architecture de l'arbre cible	30
3.4.2.1 A l'échelle de l'arbre cible	30
3.4.2.2 À l'échelle des voisins	31
3.4.3 Conception du modèle à partir des variables réponses et explicatives	32
3.4.4 Étapes pour choisir le meilleur modèle : analyses statistiques et visualisations graphiques	34
3.4.5 Conception d'histogrammes empilés pour étudier la contribution des différentes variables explicatives à chacune des variables réponses prédites	35
4 Résultats	37
4.1 Contexte	37
4.2 Résultats préliminaires	37

4.2.1	Présentation des valeurs moyennes et des écart-types : dimensions par essence, variables explicatives et variables réponses	37
4.2.2	Effet du bloc sur les variables explicatives taille, surface terrière et indice de compétition du voisinage	38
4.2.3	Effet de la composition spécifique sur les variables explicatives taille, surface terrière et indice de compétition du voisinage	39
4.3	Choix des modèles pour expliquer les variables réponses	41
4.3.1	Facteur d'élancement	41
4.3.1.1	Ajustement de h/d aux variables explicatives	41
4.3.1.2	Effets du bloc et de la taille et analyse des statistiques de qualité de l'ajustement par les différentes variantes du modèle	41
4.3.1.3	Choix du modèle le plus adéquat	42
4.3.2	Indicateur de branchaison	44
4.3.2.1	Ajustement de l'indicateur de branchaison aux variables explicatives	44
4.3.2.2	Effets du bloc et de la taille et analyse des statistiques de qualité de l'ajustement par les différentes variantes du modèle	44
4.3.2.3	Choix du modèle le plus adéquat	45
4.3.3	Proportion du houppier vivant	48
4.3.3.1	Ajustement de la proportion du houppier vivant aux variables explicatives	48
4.3.3.2	Effets du bloc et de la taille et analyse des statistiques de qualité de l'ajustement par les différentes variantes du modèle	49
4.3.3.3	Choix du modèle le plus adéquat	49
4.3.4	Nombre de branches vivantes entre 0 et 4m	51
4.3.4.1	Ajustement du nombre de branches vivantes entre 0 et 4m aux variables explicatives	51
4.3.4.2	Effets du bloc et de la taille et analyse des statistiques de qualité de l'ajustement par les différentes variantes du modèle	51
4.3.4.3	Choix du modèle le plus adéquat	51
4.3.5	Nombre de fourches total ramené à la longueur du houppier vivant	54
4.3.5.1	Ajustement du nombre de fourches total, ramené à la longueur du houppier vivant, aux variables explicatives	54
4.3.5.2	Effets du bloc et de la taille et analyse des statistiques de qualité de l'ajustement par les différentes variantes du modèle	55
4.3.5.3	Choix du modèle le plus adéquat	56
4.3.6	Nombre de fourches total ramené à la hauteur totale	58
4.3.6.1	Ajustement du nombre de fourches total, ramené à la hauteur totale, aux variables explicatives	58
4.3.6.2	Effets du bloc et de la taille et analyse des statistiques de qualité de l'ajustement par les différentes variantes du modèle	59
4.3.6.3	Choix du modèle le plus adéquat	59
4.3.7	Nombre de fourches entre 0 et 4m ramené à une hauteur de 4m	60
4.4	Récapitulatif des résultats et des modèles choisis pour les différentes variables réponses	62
5	Discussion	63
5.1	Discussion globale	63
5.2	Complémentarité et redondance entre les indicateurs	64

5.3	Discussion par variable réponse	65
5.3.1	Facteur d'élancement	65
5.3.2	Indicateur de branchaison	67
5.3.3	Proportion du houppier vivant	68
5.3.4	Nombre de branches vivantes entre 0 et 4m	69
5.3.5	Nombre de fourches total ramené à la longueur du houppier vivant	69
5.3.6	Nombre de fourches total ramené à la hauteur totale et nombre de fourches entre 0 et 4m ramené à une hauteur de 4m	70
6	Conclusions et perspectives	72
	Bibliographie	75
	Annexes	86
	Annexe A : Fiche de terrain, exemple pour l'arbre n°26 678 de la parcelle 35	86
	Annexe B : Ajustement des variables réponses en fonction de la taille et des indicateurs de la compétition exercée par le voisinage (surface terrière et indice de compétition)	87
	Annexe C : Coefficients pour les différentes variantes du modèle des variables réponses	88
	Annexe D : ANOVA des variables explicatives et réponses en fonction du bloc	102
	Annexe E : Procédure de sélection par la méthode d'analyse statistique pas à pas de JMP Pro 16	109
	Annexe F : Histogrammes empilés des modèles complets et du modèle choisi pour le nombre de fourches en deçà de quatre mètres ramené à une hauteur de quatre mètres	116
	Annexe G : Analyse en composantes principales de la base de données	120
	Annexe H : Relation entre la taille ($\text{dbh}^2 \times h$) des chênes cibles et la longueur de leur houppier	123

Table des figures

1	Illustration d'un peuplement d'épicéas ravagé par les scolytes à gauche et du peuplement après coupe rase à droite (Office National des Forêts, 2019b)	2
2	Illustration d'une succession cyclique gouvernée par le feu au parc national du Yellowstone (empruntée de Otto, 1998) : la communauté climacique se forme après plusieurs centaines d'années et se compose d'épicéas d'Engelmann et de sapins subalpins. La stabilité de cette association climacique est rompue par l'incidence de feux qui permettent la réinstauration des processus de diversification.	3
3	Boucle de rétroaction entre la structure du peuplement, les conditions environnementales et la structure et le fonctionnement de l'arbre dans un mélange à deux essences (emprunté de Bayer <i>et al.</i> , 2013).	6
4	Nuage de points, collecté par TLS, d'un arbre individuel (en rouge) et de son environnement local (en bleu) afin de reconstituer sa niche écologique (emprunté de Lin <i>et al.</i> , 2023).	8
5	Différence entre les propriétés architecturales des branches chez un hêtre européen en monoculture, à gauche, par rapport à un hêtre européen en mélange avec de l'épicéa commun, à droite (emprunté de Bayer <i>et al.</i> , 2013). Le mélange des essences et l'hétérogénéité structurale modifient la morphologie des arbres : le hêtre à gauche présente des branches plus redressées tandis que celui de droite présente un nombre plus grand de branches de deuxième et troisième ordre.	9
6	Illustration du principe de complémentarité des niches : ici deux essences de niveaux de tolérance à l'ombrage contrastés sont associées de sorte à optimiser l'utilisation de la lumière (emprunté de Kelty, 1992)	12
7	Distribution caractéristique des tailles en peuplements mélangés par rapport à des peuplements monospécifiques (empruntée de Pretzsch et Schütze, 2015). Le nombre de tiges est plus élevé en peuplements mixtes et la distribution des volumes des tiges plus large (et plus escarpée sur la gauche). Dans les monocultures, la distribution des volumes est plus symétrique et moins pointue, tandis que la valeur moyenne des volumes reste similaire.	13
8	Maintien du mélange en jouant sur le contrôle de la compétition interspécifique via la configuration spatiale des différentes essences (adapté de Bauhus <i>et al.</i> , 2017b et Pretzsch et Zenner, 2017). Trois essences sont représentées, symbolisées chacune par une forme géométrique, pour montrer qu'au plus la compétition interspécifique est forte, au plus ces trois essences auront chacune besoin d'espace contigu pour s'installer et croître dans un peuplement mixte.	16
9	Maintien du mélange en jouant sur le contrôle de la compétition interspécifique via la séparation des différentes essences dans le temps (emprunté de Kelty, 2006). Le mélange consiste en deux essences ; l'une feuillue et l'autre résineuse. Pour réduire la compétition interspécifique, l'essence dont la vitesse de croissance juvénile est supérieure, dans ce cas l'essence feuillue, est installée plus tard pour laisser le temps à l'essence dont la vitesse de croissance est plus faible, ici l'essence résineuse, de s'installer en premier.	17

10	Évolution des prix moyens des bois sur pied en forêt privée wallonne (en euros constants 2020/m ³) : le graphique du haut représente l'évolution des prix entre 1986 et 2020 pour du chêne de qualité menuiserie-ébénisterie tandis que le graphique du bas représente l'évolution des prix entre 1988 et 2020 pour du hêtre blanc (par opposition à du hêtre à coeur rouge, impropre à la filière bois d'oeuvre) (PanoraBois, 2021). Malgré une diminution des prix pendant cette période, la gamme des prix pour le chêne reste au-dessus de celle du hêtre. De plus, les prix du marché du chêne tendent à repartir à la hausse.	19
11	Illustration du lien entre les thèmes abordés dans l'état de l'art et l'objectif du mémoire : intérêts des peuplements mélangés par rapport aux peuplements purs (a), conception d'une plantation mélangée à partir d'un terrain nu (b), difficultés de conception d'une plantation mélangée (c) et réponse des arbres aux conditions locales de leur environnement par leurs propriétés architecturales (agencement des branches, taille du houppier, grosseur du tronc, ...), qui dépendent donc de la manière avec laquelle le peuplement a été mis en place (niveau de richesse, configuration spatiale, configuration temporelle, ...)	20
12	Valeurs mensuelles des températures de l'air et des précipitations dans la commune de Gedinne, pour la période de référence 1991-2020 (IRM, 2021)	21
13	Distribution spatiale des quatre niveaux de richesse au sein des 22 parcelles présentes dans chacun des deux blocs : Gribelle vs Gouverneurs (Forest & Nature Lab, 2011)	23
14	Plan simplifié permettant de s'orienter dans une parcelle - la parcelle 34, composée de chêne sessile, érable sycomore et douglas, est représentée comme exemple. Chaque numéro correspond à un arbre. Les numéros encadrés en pointillés correspondent à des individus désignés comme arbres d'avenir préalablement aux premières interventions. Chaque "plot" est structuré en clusters de neuf individus d'une même essence, sauf en bordure où ces clusters peuvent contenir 12 individus. Les quatre placettes permanentes de 16 arbres témoins sont encadrées en trait gras et les numéros qui n'ont pas été colorés signifient que les arbres sont morts.	24
15	Utilisation de la perche pour la mesure de la hauteur de la base du houppier	26
16	Résumé schématique des mesures réalisées sur les chênes cibles et leurs branches	28
17	Illustration du raisonnement employé pour donner un chiffre unique aux catégories de branches selon que le diamètre de la branche soit plus proche de la borne inférieure, le milieu ou la borne supérieure de la catégorie ; exemple pour la catégorie 10-30 mm	29
18	Relation variable réponse - effet taille : dispersion des points idéale lorsque l'effet de la taille est partiellement confondu avec l'effet du bloc. La redondance de l'effet bloc par rapport à celui de la taille se perçoit par la distribution des points le long de la relation ajustant la variable réponse à l'effet de la taille.	35
19	Calcul des contributions des variables explicatives aux valeurs moyennes prédites des variables réponses dans chacune des dix compositions spécifiques. Ici, le modèle complet pour l'indicateur nombre de fourches total/ <i>houppier</i> est utilisé comme exemple. Une couleur a été attribuée à chacune des variables explicatives (y compris la constante de la régression linéaire).	36
20	Boîte à moustaches de la surface terrière totale (m ² /ha) selon la composition spécifique. Les lettres permettent de comparer les moyennes pour chaque composition spécifique : des compositions spécifiques ne présentant pas la même lettre sont en moyenne significativement différentes. Les mélanges chêne-mélèze et chêne-hêtre-douglas-mélèze présentent une surface terrière totale moyenne significativement plus grande à celle des cinq compositions spécifiques qui ne contiennent pas de mélèze.	40

21	Boîte à moustaches de l'indice de compétition du voisinage total ($m^{3/2}$) selon la composition spécifique. Les lettres permettent de comparer les moyennes pour chaque composition spécifique : des compositions spécifiques ne présentant pas la même lettre sont en moyenne significativement différentes. Les mélanges chêne-mélèze, érable-chêne-mélèze et chêne-hêtre-douglas-mélèze présentent un indice de compétition total moyen significativement plus grand à celui des cinq compositions spécifiques qui ne contiennent pas de mélèze.	40
22	Ajustement du rapport h/d en fonction de la taille, la surface terrière totale et l'indice de compétition total respectivement	41
23	Contribution des variables explicatives au rapport h/d [-] (axe de gauche) selon la composition spécifique pour le modèle choisi. La moyenne prédite du h/d selon ce modèle est affichée sur l'axe de droite. Les compositions spécifiques qui portent la même lettre présentent des valeurs prédites du facteur d'élancement moyen non significativement différentes.	44
24	Ajustement de l'indicateur pénalisant la branchaison, ramené au diamètre à hauteur de poitrine au carré, en fonction de la taille, la surface terrière totale et l'indice de compétition total respectivement	45
25	Contribution des variables explicatives à l'indicateur de branchaison [-] (axe de gauche) selon la composition spécifique pour le modèle choisi. La moyenne prédite de l'indicateur selon ce modèle est affichée sur l'axe de droite. Les compositions spécifiques qui portent la même lettre présentent des valeurs moyennes prédites non significativement différentes.	47
26	Ajustement de la proportion du houppier vivant en fonction de la taille, la surface terrière totale et l'indice de compétition total respectivement	48
27	Contribution des variables explicatives à la proportion du houppier vivant (%) (axe de gauche) selon la composition spécifique pour le modèle choisi. La moyenne prédite de cette proportion selon ce modèle est affichée sur l'axe de droite. Les compositions spécifiques qui portent la même lettre présentent des valeurs moyennes prédites non significativement différentes.	50
28	Ajustement du nombre de branches vivantes en deçà de 4m en fonction de la taille, la surface terrière totale et l'indice de compétition total respectivement	52
29	Contribution des variables explicatives au nombre de branches vivantes en deçà de 4m [-] (axe de gauche) selon la composition spécifique pour le modèle choisi. La moyenne prédite de ce nombre de branches selon ce modèle est affichée sur l'axe de droite. Les compositions spécifiques qui portent la même lettre présentent des valeurs moyennes prédites non significativement différentes.	54
30	Ajustement du nombre de fourches total/ $l_{houppier}$ en fonction de la taille, la surface terrière totale et l'indice de compétition total respectivement	55
31	Contribution des variables explicatives au nombre de fourches total ramené à la longueur du houppier [m^{-1}] (axe de gauche) selon la composition spécifique pour le modèle choisi. La moyenne prédite de ce nombre de fourches selon ce modèle est affichée sur l'axe de droite. Les compositions spécifiques qui portent la même lettre présentent des valeurs moyennes prédites non significativement différentes.	57
32	Ajustement du nombre de fourches total/ h_{tot} en fonction de la taille, la surface terrière totale et l'indice de compétition total respectivement	58

33	Contribution des variables explicatives au nombre de fourches total ramené à la hauteur totale [m^{-1}] (axe de gauche) selon la composition spécifique pour le modèle choisi. La moyenne prédite de ce nombre de fourches selon ce modèle est affichée sur l'axe de droite. Les compositions spécifiques qui portent la même lettre présentent des valeurs moyennes prédites non significativement différentes.	60
34	Ajustement du nombre de fourches en deçà de $4\text{m}/h_{4m}$ en fonction de la taille, la surface terrière totale et l'indice de compétition total respectivement	61
35	Allocation du carbone : les parties de l'arbre dont les chiffres sont les plus petits correspondent à une priorité d'allocation supérieure (adapté de Barnes <i>et al.</i> , 1998)	65
36	Le rapport entre la hauteur totale de l'arbre et son diamètre mesuré à 1,30 m est un indicateur de sa stabilité (Freytet <i>et al.</i> , 2020). Dans les peuplements peu éclaircis, les arbres ne grossissent pas suffisamment par rapport à leur croissance en hauteur. Ils présentent alors une stature élancée, les rendant vulnérables vis-à-vis des coups de vent (risque de rupture ou de flexion).	67
37	Proportion du houppier vivant attendue au terme d'exploitabilité : la proportion du houppier vivant de l'arbre occupe la moitié de sa hauteur totale (Sevrin, 1997)	68
1	ANOVA de la taille en fonction du bloc	102
2	ANOVA de la surface terrière totale en fonction du bloc	103
3	ANOVA de l'indice de compétition du voisinage total en fonction du bloc	104
4	ANOVA du facteur d'élancement en fonction du bloc	105
5	ANOVA de l'indicateur pénalisant la branchaison (formule 2) en fonction du bloc	105
6	ANOVA de la proportion du houppier vivant en fonction du bloc	106
7	ANOVA du nombre de branches vivantes entre 0 et 4m en fonction du bloc	106
8	ANOVA du nombre de fourches total ramené à la longueur du houppier en fonction du bloc	107
9	ANOVA du nombre de fourches total ramené à la hauteur totale en fonction du bloc	107
10	ANOVA du nombre de fourches en deçà de 4m ramené à une hauteur de 4m en fonction du bloc	108
11	Procédure de sélection automatique du meilleur modèle pour le rapport h/d	109
12	Procédure de sélection automatique du meilleur modèle pour l'indicateur pénalisant la branchaison (formule 2)	110
13	Procédure de sélection automatique du meilleur modèle pour la proportion du houppier vivant	111
14	Procédure de sélection automatique du meilleur modèle pour le nombre de branches vivantes entre 0 et 4m	112
15	Procédure de sélection automatique du meilleur modèle pour le nombre de fourches total ramené à la longueur du houppier	113
16	Procédure de sélection automatique du meilleur modèle pour le nombre de fourches total ramené à la hauteur totale	114
17	Procédure de sélection automatique du meilleur modèle pour le nombre de fourches en deçà de 4m ramené à une hauteur de 4m	115
18	Contribution des variables explicatives au rapport h/d [-] selon la composition spécifique pour le modèle le plus complet. La moyenne prédite du h/d selon ce modèle est affichée sur l'axe de droite.	116

19	Contribution des variables explicatives à l'indicateur pénalisant la branchaison, ramené au diamètre à hauteur de poitrine au carré, [-] selon la composition spécifique pour le modèle le plus complet. La moyenne prédite de l'indicateur selon ce modèle est affichée sur l'axe droite.	116
20	Contribution des variables explicatives à la proportion du houppier vivant (%) selon la composition spécifique pour le modèle le plus complet. La moyenne prédite de cette proportion selon ce modèle est affichée sur l'axe de droite.	117
21	Contribution des variables explicatives au nombre de branches vivantes en deçà de 4m [-] selon la composition spécifique pour le modèle le plus complet. La moyenne prédite de ce nombre de branches selon ce modèle est affichée sur l'axe de droite.	117
22	Contribution des variables explicatives au nombre de fourches total ramené à la longueur du houppier [m^{-1}] selon la composition spécifique pour le modèle le plus complet. La moyenne prédite de ce nombre de fourches selon ce modèle est affichée sur l'axe de droite.	118
23	Contribution des variables explicatives au nombre de fourches total ramené à la hauteur totale [m^{-1}] selon la composition spécifique pour le modèle le plus complet. La moyenne prédite de ce nombre de fourches selon ce modèle est affichée sur l'axe de droite.	118
24	Contribution des variables explicatives au nombre de fourches en deçà de 4m ramené à une hauteur de 4m [m^{-1}] selon la composition spécifique pour le modèle le plus complet. La moyenne prédite de ce nombre de fourches selon ce modèle est affichée sur l'axe de droite.	119
25	Contribution des variables explicatives au nombre de fourches en deçà de 4m ramené à une hauteur de 4m [m^{-1}] (axe de gauche) selon la composition spécifique pour le modèle choisi. La moyenne prédite de ce nombre de fourches selon ce modèle est affichée sur l'axe de droite. Les compositions spécifiques qui portent la même lettre présentent des valeurs moyennes prédites non significativement différentes.	119
26	Analyse en composantes principales du jeu de données	120
27	Longueur du houppier des chênes cibles en fonction de leur taille : statistiques de résumé et régression linéaire simple	123

Liste des tableaux

1	Caractéristiques générales du site de Gedinne : coordonnées, altitude (Verheyen <i>et al.</i> , 2013), températures (IRM, 2021), précipitations (IRM, 2021), type de sol (CNSW et WRB, 2006) et occupations passées du sol (Verheyen <i>et al.</i> , 2013). Le dispositif comprend deux blocs ; Gribelle (Gr) et Gouverneurs (Go) (voir section 3.1.2).	22
2	Raisonnement amenant à la sélection de 104 chênes cibles : le tableau montre, pour chacun des niveaux de richesse, le nombre de parcelles qui comprennent du chêne. Six chênes cibles sont sélectionnés sur chaque parcelle, à l'exception des parcelles à quatre essences où seuls quatre chênes sont sélectionnés. 52 arbres sont choisis sur chacun des blocs, menant donc bien à un total de 104 arbres.	25
3	Illustration des relevés de diamètres de branches au-delà de deux mètres ; exemple pour la catégorie 10-30 mm. Les catégories sont affinées en soulignant le chiffre qui est le plus proche du diamètre mesuré.	27
4	Tableau récapitulatif des mesures réalisées à l'échelle des branches : les différents types de mesures sont indiqués en italique en lignes alors que les distinctions de mesures selon la hauteur sont référencées dans les colonnes en gras. Au-delà de quatre mètres, aucune mesure n'a été réalisée mais les fourches ont été comptées.	28
5	Récapitulatif des diverses variantes considérées pour le modèle et des effets testés pour chacune : BA est la surface terrière (m^2/ha), NCI est l'indice de compétition du voisinage ($\text{m}^{3/2}$) défini à l'équation 6 et les chiffres 1, 2, 3, 4 et 5 qualifient, respectivement, le chêne, le hêtre, l'érable, le douglas et le mélèze. L'effet taille est traduit par le produit du diamètre à hauteur de poitrine au carré par la hauteur totale et "tot", "fe" et "con" sont les abréviations de total, essences feuillues et conifères.	34
6	Diamètre à hauteur de poitrine et hauteur totale des 106 chênes cibles : moyenne et écart-type	37
7	Diamètre à hauteur de poitrine des cinq essences, mesuré sur les arbres du voisinage : moyenne et écart-type	37
8	Variables explicatives : moyenne et écart-type	38
9	Variables réponses : moyenne et écart-type pour les valeurs observées et prédites par chacun des modèles choisis pour expliquer chacune des variables réponses	38
10	Récapitulatif des statistiques de qualité de l'ajustement pour le rapport h/d, ainsi que des estimations des coefficients et des P valeurs. Le premier modèle est celui qui présente le BIC le plus faible parmi les variantes testées (lm_7), le deuxième est celui retenu par la procédure de sélection et le troisième est le modèle finalement déterminé comme le plus adéquat pour expliquer le facteur d'élancement h/d des chênes cibles (lm_10). Les valeurs en orange permettent de repérer les variables explicatives dont l'effet est significatif (seuil de significativité à 0,05).	42
11	Récapitulatif des statistiques de qualité de l'ajustement pour l'indicateur pénalisant la branchaison $f(\text{dbh}^2)$, ainsi que des estimations des coefficients et des P valeurs. Le premier modèle est celui qui présente le BIC le plus faible parmi les variantes testées (lm_7), le deuxième est celui retenu par la procédure de sélection et le troisième est le modèle finalement déterminé comme le plus adéquat (voir équation 2). Les valeurs en orange permettent de repérer les variables explicatives dont l'effet est significatif (seuil de significativité à 0,05).	46

12	Récapitulatif des statistiques de qualité de l'ajustement pour la proportion du houppier vivant, ainsi que des estimations des coefficients et des P valeurs. Le premier modèle est celui qui présente le BIC le plus faible parmi les variantes testées (lm_8), le deuxième est celui retenu par la procédure de sélection et le troisième est le modèle finalement déterminé comme le plus adéquat pour expliquer la part de la hauteur totale des chênes cibles occupée par des branches vivantes (voir équation 1). Les valeurs en orange permettent de repérer les variables explicatives dont l'effet est significatif (seuil de significativité à 0,05).	49
13	Récapitulatif des statistiques de qualité de l'ajustement pour le nombre de branches vivantes entre 0 et 4m, ainsi que des estimations des coefficients et des P valeurs. Le premier modèle est celui qui présente le BIC le plus faible parmi les variantes testées (lm_8), le deuxième est celui retenu par la procédure de sélection et le troisième est le modèle finalement déterminé comme le plus adéquat pour expliquer l'abondance de branches vivantes dans les quatre premiers mètres des chênes cibles. Les valeurs en orange permettent de repérer les variables explicatives dont l'effet est significatif (seuil de significativité à 0,05).	53
14	Récapitulatif des statistiques de qualité de l'ajustement pour le nombre de fourches total/ $l_{houppier}$, ainsi que des estimations des coefficients et des P valeurs. Le premier modèle est celui qui présente le BIC le plus faible parmi les variantes testées (lm_8), le deuxième est celui retenu par la procédure de sélection et le troisième est le modèle finalement déterminé comme le plus adéquat pour expliquer cet indicateur de la fourchaison des chênes cibles. Les valeurs en orange permettent de repérer les variables explicatives dont l'effet est significatif (seuil de significativité à 0,05).	56
15	Récapitulatif des statistiques de qualité de l'ajustement pour le nombre de fourches total/ h_{tot} , ainsi que des estimations des coefficients et des P valeurs. Le premier modèle est celui qui présente le BIC le plus faible parmi les variantes testées (lm_7), le deuxième est celui retenu par la procédure de sélection et le troisième est le modèle finalement déterminé comme le plus adéquat pour expliquer cet indicateur de la fourchaison des chênes cibles. Les valeurs en orange permettent de repérer les variables explicatives dont l'effet est significatif (seuil de significativité à 0,05).	59
16	Récapitulatif des équations résultant des modèles choisis pour chacune des variables réponses, ainsi que des compositions spécifiques qui minimisent les valeurs moyennes prédites de chacune des variables réponses	62
1	R^2 ajustés sans transformation et pour chacune des cinq transformations appliquées sur les variables explicatives hd^2 , BA_{tot} et NCI_{tot} . Les valeurs encadrées correspondent aux ajustements choisis, pour chacune des variables réponses, en fonction de chacune des trois variables explicatives tandis que les valeurs colorées en vert mettent en évidence la transformation (ou l'absence de transformation) qui mène à la valeur la plus élevée de R^2 ajusté. Les explications pour comprendre le raisonnement suivi ont été données au point 3.4.4 de la partie matériel et méthodes.	87
2	R^2 ajusté, AIC corrigé, BIC et estimations des coefficients pour les douze variantes du modèle de la variable réponse h/d	88
3	R^2 ajusté, AIC corrigé, BIC et estimations des coefficients pour les douze variantes du modèle de la variable réponse pénalisant la branchaison $f(dbh^2)$	90
4	R^2 ajusté, AIC corrigé, BIC et estimations des coefficients pour les douze variantes du modèle de la variable réponse proportion du houppier	92

5	R ² ajusté, AIC corrigé, BIC et estimations des coefficients pour les douze variantes du modèle de la variable réponse nombre de branches vivantes entre 0 et 4m	94
6	R ² ajusté, AIC corrigé, BIC et estimations des coefficients pour les douze variantes du modèle de la variable réponse nombre de fourches total ramené à la longueur du houppier vivant	96
7	R ² ajusté, AIC corrigé, BIC et estimations des coefficients pour les douze variantes du modèle de la variable réponse nombre de fourches total ramené à la hauteur totale . .	98
8	R ² ajusté, AIC corrigé, BIC et estimations des coefficients pour les douze variantes du modèle de la variable réponse nombre de fourches en deçà de 4m ramené à une hauteur de 4m	100
9	Corrélations issues de l'analyse en composantes principales	121

1 Introduction

1.1 Contexte et problématique

La forêt joue un rôle important de par les services écosystémiques qu'elle rend, lesquels participent au maintien de la vie sur Terre et des économies humaines (Balvanera *et al.*, 2006, 2013 ; Carnus *et al.*, 2006 ; Mace *et al.*, 2012 ; Mergeay et Santamaria, 2012). Elle fournit en effet une série de services d'approvisionnement (production de bois, champignons, chasse, ...), de régulation (qualité de l'eau, séquestration du carbone, régulation du climat, protection des sols, ...) et culturels (loisirs, identité, religion, ...) (Hout Info Bois, 2023). L'intérêt et la demande pour ces divers services ne font que croître (Knocke *et al.*, 2008 ; Kuuluvainen, 2009). De plus, les communautés riches en espèces supportent des niveaux de fonctions écosystémiques plus élevés (Lefcheck *et al.*, 2015) et 80% de la biodiversité terrestre à l'échelle mondiale est recensée au sein des forêts (WWF Belgique, 2018). La perte de biodiversité met à mal les connexions entre espèces et les écosystèmes, ce qui compromet la viabilité des services écologiques (Liu *et al.*, 2018).

La forêt occupe également une place importante étant donné sa surface. En effet, les surfaces forestières recouvrent un tiers des terres au niveau mondial, ce qui représente 4,06 milliards d'hectares et 0,52 hectares par habitant dans le monde (FAO, 2021). En Belgique, les forêts occupent 705 489 hectares, soit 23% du territoire national. 563 000 hectares de ceux-ci se situent en Wallonie, représentant donc un tiers de la superficie de la région wallonne (PanoraBois Wallonie, 2021).

Plusieurs menaces pèsent sur les forêts et ont conduit à revoir les modèles sylvicoles au cours des dernières décennies (Bauhus *et al.*, 2017a, b). En effet, la sylviculture de peuplements équiennes monospécifiques montre ses limites face aux effets des changements climatiques, impliquant une série de stress sur les forêts (Bolte *et al.*, 2004 ; Spiecker *et al.*, 2004 ; Forrester, 2014 ; Pretzsch, 2014 ; Pretzsch et Rais, 2016 ; Pretzsch et Schütze, 2016), tels que l'intensité et la fréquence des sécheresses, les espèces exotiques envahissantes, les ravageurs, ... La crise des scolytes de 2019 a par exemple été favorisée par la vulnérabilité accrue des épicéas aux attaques de ravageurs suite à une période de sécheresse, menant à une fragilisation des arbres. Cela crée alors des conditions favorables à la pullulation des scolytes qui peuvent ainsi proliférer et étendre leur colonisation aux arbres sains (Office National des Forêts, 2019a). Les changements climatiques imposent d'autres stress sur les forêts, comme l'intensification des incendies due aux canicules et sécheresses de plus en plus fréquentes et des modifications phénologiques chez les arbres, pouvant déstabiliser les insectes et autres espèces qui y sont associés. La phénologie est en effet la succession des différents stades de développement suivant les variations saisonnières, sa déstabilisation au sein des différentes communautés ligneuses peut donc également affecter les cycles de développement d'une variété d'organismes avec lesquels elles sont en interaction (WWWF Belgique, 2018).

Globalement, les changements climatiques engendrent en fait de nombreuses incertitudes quant aux conditions climatiques futures auxquelles seront confrontées les forêts. Cependant, certains effets bénéfiques peuvent également découler de ces changements, du moins dans les forêts tempérées et boréales, tels qu'un allongement de la période de végétation, des températures moyennes plus élevées (les extrêmes sont plus problématiques), une amélioration de la fertilité étant donné la concentration croissante en CO₂ atmosphérique, (Pretzsch *et al.*, 2014 ; Pretzsch *et al.*, 2018)...

En termes de gestion, de nouveaux défis sont alors apparus. En effet, la résilience des peuplements forestiers est un sujet ayant concentré beaucoup d'intérêt. La diversification apparaît souvent comme une piste prometteuse pour favoriser cette résilience et minimiser les risques (Pretzsch et Zenner, 2017 ; Bouwmana *et al.*, 2021). En découlent alors de nombreuses questions telles que l'échelle à laquelle cette diversification doit être menée : à l'échelle du peuplement, à l'échelle wallonne, ou encore du massif ? La diversification soulève également des interrogations sur la méthode, car elle peut se faire via la richesse en essences ou bien via l'irrégularisation en âge.

Les attaques de scolytes sur des millions de mètres cubes d'épicéas en Europe ont créé de gros dégâts, qui ont accentué le besoin de revoir les modèles sylvicoles en place en pointant du doigt les risques qui découlent des plantations monospécifiques. La ministre Tellier, responsable notamment de l'environnement, de la nature et de la forêt depuis 2019, a alors lancé le projet "Forêt résiliente" visant à encourager la diversification en accordant des subsides aux propriétaires forestiers pour la constitution et le renouvellement de peuplements mélangés. En effet, de nombreuses surfaces forestières ravagées par les scolytes ont été mises à blanc, donnant l'opportunité de replanter par petits peuplements monospécifiques (bouquets) ou bien par peuplements entièrement mélangés (pied par pied). Les photos à la figure 1 montrent un peuplement d'épicéas ravagé par les scolytes et la coupe rase qui a suivi l'attaque pour limiter l'expansion de ces insectes (Office National des Forêts, 2019b). L'objectif du projet est de favoriser la résilience des forêts face aux changements climatiques en jouant sur une modification des pratiques sylvicoles, et ce afin de continuer à bénéficier des services écosystémiques forestiers. Les peuplements doivent à terme comporter au moins trois essences adaptées aux changements climatiques pour bénéficier de l'aide financière, mais le choix des itinéraires sylvicoles suivis pour y parvenir est laissé libre aux propriétaires (Forêt Résiliente, 2022).



FIGURE 1 – *Illustration d'un peuplement d'épicéas ravagé par les scolytes à gauche et du peuplement après coupe rase à droite (Office National des Forêts, 2019b)*

En Europe, une décroissance graduelle des surfaces de plantations monospécifiques est en cours, tandis que les surfaces couvertes d'essences en mélange progressent dans l'objectif d'augmenter la productivité, la résistance et la résilience des forêts, ou de convertir les plantations de conifères en plantations de feuillus. Les plantations à espèces variées consistent généralement en deux, trois ou

quatre essences (Forest Europe, UNECE & FAO, 2011).

Suivant des dynamiques naturelles, les forêts peuvent évoluer vers des mélanges car les essences ont des vitesses de croissance et des niveaux de tolérance à l'ombrage contrastés menant à un renouvellement des différentes strates du couvert et à une irrégularisation spontanée. En effet, dans des conditions naturelles, les forêts ont tendance à évoluer, suivant les processus en place, vers une plus ou moins grande diversité d'espèces et de structures. La succession naturelle est un processus écologique par lequel les communautés végétales se développent et changent au fil du temps en réponse aux perturbations naturelles telles que les incendies, les tempêtes, les inondations et les infestations de ravageurs. Les espèces pionnières sont remplacées par des espèces plus tolérantes à l'ombrage au fur et à mesure de ces processus de succession végétale, ce qui peut mener à une augmentation de la diversité des espèces, selon l'échelle de temps considérée. De plus, le développement de multiples espèces d'arbres au sein d'une même forêt est souvent favorisé par d'autres processus écologiques comme la dispersion des graines et la régénération naturelle (Turner, 2010).

Tous les processus cependant ne contribuent pas à la diversification et peuvent au contraire favoriser l'homogénéisation (Pretzsch et Zenner, 2017). Par exemple, les espèces de fin de succession comme le hêtre, qui sont très tolérantes à l'ombrage, mènent plutôt à une homogénéisation car la compétition entre les essences fait que certaines disparaissent. Dans ce cas, en l'absence d'intervention et sur un laps de temps de quelques centaines d'années, des niveaux de tolérance à l'ombrage contrastés conduisent naturellement à une perte de diversité. Cela résulte alors en une communauté d'espèces climaciques stables, jusqu'à ce qu'une perturbation se produise et donne l'opportunité aux processus de diversification de reprendre le dessus, comme le montre la figure 2 dans le cas d'une succession cyclique gouvernée par le feu dans le parc national du Yellowstone (Otto, 1998). Pour obtenir une forêt mélangée dans les espaces gérés, les interventions sylvicoles sont donc indispensables.

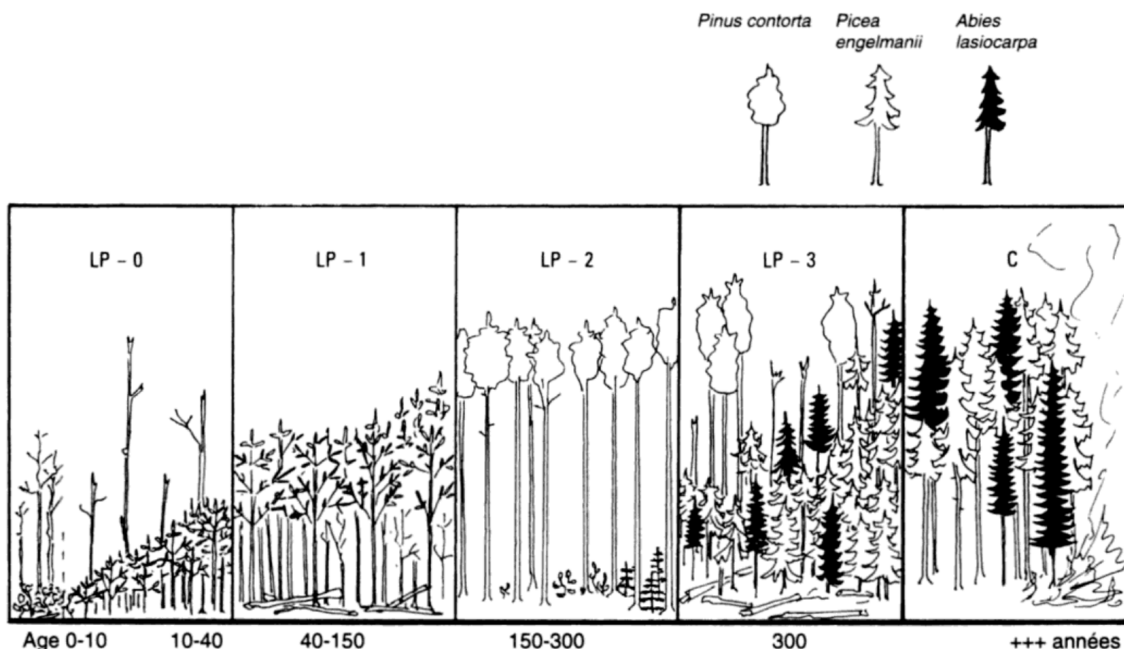


FIGURE 2 – Illustration d'une succession cyclique gouvernée par le feu au parc national du Yellowstone (empruntée de Otto, 1998) : la communauté climacique se forme après plusieurs centaines d'années et se compose d'épicéas d'Engelmann et de sapins subalpins. La stabilité de cette association climacique est rompue par l'incidence de feux qui permettent la réinstauration des processus de diversification.

Lorsque le point de départ est cependant un terrain nu, le défi réside dans le contrôle du mélange, à la fois dans le niveau de richesse spécifique (deux, trois, quatre, ... essences ?) mais aussi dans l'échelle à laquelle installer la diversification. Par ailleurs, un manque de connaissances subsiste sur les essences qui peuvent être associées d'une part, et sur le contexte stationnel adapté à l'association considérée d'autre part. À la difficulté du choix du niveau de mélange s'additionne donc celle du choix des combinaisons d'essences. En somme, le mélange peut généralement mener à des difficultés qui sont liées à la création, au maintien et au dosage du mélange, et ce en particulier au stade de régénération (Sardin *et al.*, 2008). Une fois les essences installées sur le site, la structure du peuplement évolue en effet de façon dynamique dans le temps étant donné la compétition inter et intraspécifique qui s'accroît (Pretzsch, 2018). Comme les essences présentent des compétitivités différentes, le produit du mélange peut être altéré dans la phase d'éducation. Par exemple, les essences intolérantes à l'ombrage ont une tendance à croître plus vite que les essences tolérantes à l'ombrage. L'essence la plus compétitive domine alors la moins compétitive et ne bénéficie pas de son gainage. Le maintien du mélange souhaité, ainsi que de sa qualité, requiert donc une anticipation de ces processus afin d'élaborer des itinéraires sylvicoles pour les peuplements mélangés. Étant donné la tendance à l'homogénéisation, un choix s'impose également au niveau de la configuration de la plantation pour éviter de perdre le mélange en plantant les espèces pied par pied. La configuration doit donc être planifiée de sorte à profiter de la plasticité architecturale des essences à leur entourage pour qu'elles se maintiennent dans le mélange et présentent des caractéristiques morphologiques avantageuses à la qualité des grumes.

Pour déterminer cette configuration assurant le maintien et la qualité du mélange, l'impact du voisinage doit alors être pris en compte. Ce mémoire contribue à documenter ce point et s'inscrit donc dans l'objectif plus large de donner des éléments de réponse à la question suivante : comment concevoir une plantation mélangée et comment maintenir le mélange dans le temps ? Des recommandations sylvicoles sont nécessaires pour aiguiller les gestionnaires dans la conception des plantations mélangées. Le dispositif expérimental de FORBIO Gedinne sert de socle à cette étude car il permet d'étudier des plantations mélangées en phase d'éducation, tout en testant différents niveaux de richesse spécifique mais aussi différents niveaux de composition en modulant les combinaisons entre les essences.

1.2 Objectifs spécifiques du travail

Cinq essences sont impliquées dans cette étude : le chêne, le hêtre, l'érable, le douglas et le mélèze. L'effet du mélange de ces essences sur l'architecture d'individus désignés comme cibles est étudié au sein de dix modalités de mélanges différentes. Ces dix modalités sont répliquées sur deux blocs, nommés Gribelle et Gouverneurs, ce qui mène à une collecte de données parmi 20 parcelles expérimentales, dont la plantation date de 2009. Les individus cibles choisis sont au nombre de 106 et ce sont tous des chênes, qui ne sont pas susceptibles d'être prélevés en éclaircie. Plus spécifiquement, ce travail vise à déterminer si le mélange des essences a un effet sur les propriétés architecturales des jeunes chênes, au travers du dispositif mis en place à FORBIO Gedinne. Pour y parvenir, des indicateurs conçus à deux niveaux sont utilisés : individu (branches comprises) et voisins, visant à caractériser l'architecture des individus étudiés au travers de la compétition exercée par leurs voisins proches. En étudiant ces indicateurs en fonction de chacun des types de mélanges présentant du chêne, le but de l'analyse est d'identifier si certains mélanges peuvent bénéficier aux propriétés architecturales des jeunes chênes, et ce de manière significative. Il conviendra alors de mettre ces mélanges en évidence, ainsi que leurs caractéristiques, pour spécifier quelles propriétés architecturales sont améliorées et énoncer des recommandations sylvicoles.

En répondant à l'objectif décrit ci-dessus, le travail tend également à apporter des éclaircissements aux deux questions plus globales suivantes :

- Est-ce que le mélange des essences pourrait permettre d'augmenter la qualité tout en réduisant les interventions humaines ?
- Est-ce que les jeunes arbres présentent de meilleures propriétés architecturales (en termes de qualité du bois) dans les peuplements mélangés que dans les peuplements monospécifiques ?

1.3 Structure du travail

Le travail se structure en six grandes parties : suite à cette introduction, un état de l'art permet de se concentrer plus précisément sur chacun des thèmes qui cadrent les objectifs de l'étude et de mettre en lumière les éléments pour lesquels les connaissances sont à l'heure actuelle encore peu construites. Ensuite, une partie est consacrée à exposer les méthodes employées, depuis la présentation du site d'étude où les mesures ont été réalisées jusqu'à la conception d'un modèle visant à expliquer l'architecture des chênes cibles par trois effets : le bloc, la taille et la compétition exercée par le voisinage. Plusieurs variantes de ce modèle sont testées afin de maximiser la qualité de la prédiction tout en conservant le modèle le plus parcimonieux possible. Un modèle est choisi pour chacun des indicateurs sélectionnés pour qualifier les propriétés architecturales des chênes cibles. Ces indicateurs constituent les variables réponses et chacun des modèles tend à identifier au mieux l'effet de la composition spécifique du mélange sur ceux-ci. Le raisonnement suivi pour choisir un modèle pour chacune des variables réponses est présenté au sein des résultats et les variables explicatives qui influencent significativement les propriétés architecturales des chênes cibles sont alors mises en évidence, tout en veillant à garder une vision critique par une discussion qui pointe les limites de l'analyse. Cette discussion permet de mieux comprendre les effets des variables explicatives sur les variables réponses et montre également les points de convergence et divergence avec des études antérieures. Une conclusion est énoncée pour terminer de sorte à résumer les réponses apportées aux objectifs.

2 Etat de l'art

2.1 Les propriétés architecturales

2.1.1 Intérêt et signification

L'environnement d'un arbre, notamment la compétition exercée par ses voisins, influence ses propriétés architecturales, lesquelles déterminent la qualité de son bois et sa conformation. En effet, la compétition influence la plasticité architecturale et physiologique en influençant les conditions environnementales, la plasticité étant le processus dynamique par lequel l'arbre s'adapte au travers sa structure et son fonctionnement à l'évolution de ces conditions environnementales (Longuetaud *et al.*, 2013). La structure de l'arbre, tout comme sa physiologie et sa phénologie, traduisent ainsi les conditions environnementales dans lesquelles s'est déroulée sa croissance, comme l'illustre la figure 3 (Bayer *et al.*, 2013). Ce principe est nommé "principe de convergence des fonctions" (Assmann, 1970 ; Walter, 1931).

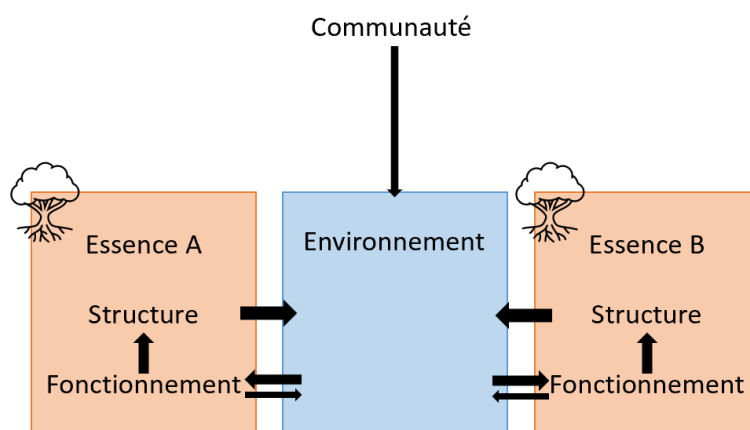


FIGURE 3 – Boucle de rétroaction entre la structure du peuplement, les conditions environnementales et la structure et le fonctionnement de l'arbre dans un mélange à deux essences (emprunté de Bayer *et al.*, 2013).

La qualité de la tige, notamment sa forme, constitue un paramètre d'intérêt dans les services écosystémiques rendus par les forêts, en particulier le service d'approvisionnement (Duchateau *et al.*, 2015), et ce surtout car il s'agit d'un des seuls services écosystémiques forestiers monétarisés (Pretzsch et Zenner, 2017). Pour cette raison, l'architecture des arbres a été un sujet abondamment étudié (Heikinheino, 1953 ; Curry et Endersby, 1965 ; Persson, 1976). De plus, dans les peuplements mélangés, l'étude de l'évolution de la morphologie des arbres permet de comprendre et modéliser les dynamiques au sein des peuplements mélangés (Bayer *et al.*, 2013). Comme on s'attend à une augmentation de la part des peuplements mélangés dans les forêts futures, l'effet du mélange sur la structure des arbres et la qualité du bois doit être étudié pour combler les lacunes dans les connaissances. En effet, la production de bois de haute qualité contraint la gestion forestière car elle détermine les opportunités économiques et donc les propriétaires peuvent se montrer plus intéressés par la qualité que par la productivité potentielle en termes de biomasse ou de quantité, du moins en Europe centrale (Pretzsch et Rais, 2016).

Les propriétés architecturales d'un individu qualifient ses caractéristiques structurales, elles peuvent être, par exemple, son rapport h/d, l'angle d'insertion de ces branches, leur diamètre, etc. Plusieurs raisons peuvent alors amener à qualifier un arbre de "mal conformé". Par exemple, un arbre peut présenter une mauvaise conformation car son rapport h/d est trop élevé, lui donnant une forme trop

effilée et mettant à mal sa stabilité physique (Kantola *et al.*, 2007). Des branches basses ou très épaisses et/ou redressées sont également pénalisantes pour la conformation d'un arbre car elles augmentent les risques de formation de nœuds dans le bois, lesquels détériorent sa qualité. En effet, par opposition, un arbre présentant des branches fines et plutôt horizontales comporte une proportion de nœuds sains plus importante, ne risquant pas de se scinder du bois et de dégrader ses propriétés mécaniques.

2.1.2 Quelles méthodes existent pour qualifier l'architecture des arbres ?

L'architecture des arbres peut en première approche être qualifiée visuellement. En effet, les caractéristiques de l'arbre, telles que la hauteur, la largeur de la couronne, la forme des branches, la présence de nodosités ou encore la densité des feuilles peuvent être observées directement. Cependant, dans le cadre de recherches scientifiques, cette méthode de qualification laisse place à une large part de subjectivité (Génin et Stokes, 2009). La prise de mesures permet alors de préciser les observations. Diverses caractéristiques morphologiques peuvent être mesurées, les plus simples et communes sont la hauteur totale, la hauteur de la couronne, le diamètre du tronc, la longueur des branches et la surface foliaire (Barthélémy et Caraglio, 2007).

La caractérisation des propriétés architecturales passe à l'heure actuelle souvent par une phase de modélisation. Des modèles mathématiques sont ainsi employés pour représenter l'architecture de l'arbre et analyser ses caractéristiques (De Reffye *et al.*, 1988 ; Prusinkiewicz et Lindenmayer, 2012). Ces modèles reposent sur les principes de la croissance et du développement des plantes, ainsi que sur les lois de la physique et de la géométrie. Les modèles mathématiques permettent de tenir compte de facteurs tels que la lumière, l'eau, les nutriments, la concurrence entre les plantes, la taille des feuilles, la formation des bourgeons, etc. Les modèles architecturaux sont classés parmi les modèles de croissance mais se centrent sur la structure de l'arbre, en représentant les différentes parties de l'arbre. Ils peuvent servir ainsi à analyser les interactions entre ces différentes parties et les effets de la gestion forestière sur la structure de l'arbre. Les modèles mathématiques sont utilisés plus largement pour prédire l'efficacité des stratégies de gestion forestière et pour évaluer les impacts des changements environnementaux sur les écosystèmes forestiers (Le Roux et Bonhomme, 2005).

Des techniques d'imagerie, telles que la photographie aérienne, la photogrammétrie et la télédétection, sont également utilisées pour obtenir des données sur l'architecture de l'arbre à grande échelle (Asner *et al.*, 2011 ; Turner *et al.*, 1999). Parmi les techniques de télédétection, l'architecture des arbres peut par exemple être étudiée par scanner laser terrestre (TLS) en tenant compte de différents traits morphologiques tels que l'angle des branches, la longueur des branches, leur courbure, le volume de la couronne et la place occupée par les branches au sein de la couronne (Bayer *et al.*, 2013 ; Lin *et al.*, 2023). En effet, une structure peut être décrite sur base de nuages de points TLS, en extrayant par exemple une collection de lignes connectées, ce qui permet une analyse détaillée des caractéristiques morphologiques. La figure 4 illustre un nuage de points collecté par TLS. Cette technologie est largement répandue pour des mesures de haute précision en architecture et en ingénierie (Vosselman et Maas, 2010). Elle est aussi employée pour mesurer des paramètres lors d'inventaires forestiers ainsi qu'à l'échelle d'arbres individuels depuis les deux dernières décennies (Huang et Pretzsch, 2010 ; Pretzsch *et al.*, 2011).

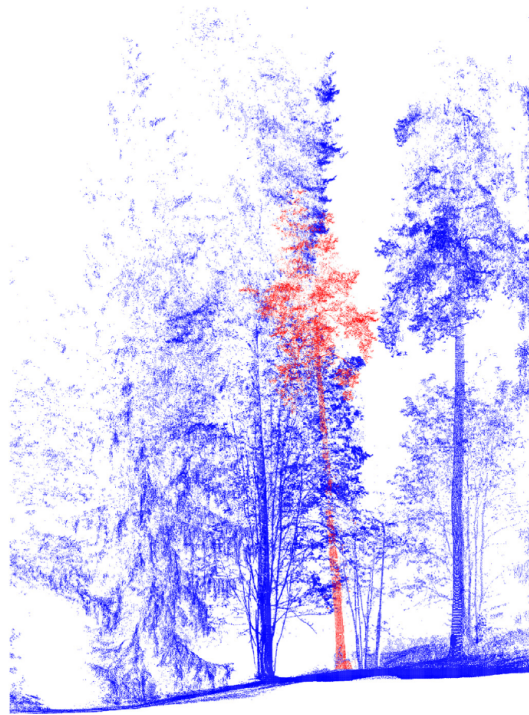


FIGURE 4 – Nuage de points, collecté par TLS, d'un arbre individuel (en rouge) et de son environnement local (en bleu) afin de reconstituer sa niche écologique (emprunté de Lin *et al.*, 2023).

Le choix de l'une ou l'autre de ces méthodes, ou de leur combinaison, dépend des objectifs de l'étude et des ressources disponibles.

2.1.3 Quels facteurs déterminent l'architecture des arbres ?

L'architecture de l'arbre est premièrement influencée par ses caractéristiques génétiques, lesquelles déterminent en grande partie son architecture. Les formes et les structures d'arbre diffèrent ainsi d'une part entre les espèces mais d'autre part au sein des espèces. En effet, des variations génétiques existent à l'intérieur d'une même espèce et peuvent expliquer des ressemblances de structure entre certains individus (Barthélémy et Caraglio, 2007).

Les propriétés architecturales résultent ensuite de la disponibilité des ressources et des facteurs environnementaux locaux. Ces deux paramètres sont majoritairement déterminés par le voisinage inter- ou intraspécifique d'un arbre au sein d'un peuplement forestier (Bayer *et al.*, 2013). En effet, la disponibilité de l'eau, les nutriments et la lumière impactent significativement l'architecture des arbres. Par exemple, si la concurrence pour la lumière est élevée, les arbres peuvent pousser de manière plus verticale pour maximiser leur accès à la lumière (Niklas, 1994). La disponibilité des ressources dans un peuplement peut être affectée aussi par la présence de diverses essences.

Les boucles de rétroaction entre le fonctionnement, la structure et l'environnement de l'arbre sont effectivement d'autant plus déterminantes dans les peuplements mélangés que dans les peuplements purs. En effet, dans les peuplements mélangés, les différentes essences expriment leur capacité à s'acclimater au travers leur structure pour capturer le plus efficacement possible les ressources limitantes ou priver leur accès aux compétiteurs (Pretzsch, 2009). L'architecture d'un arbre est donc dépendante de la composition spécifique du peuplement dans lequel cet arbre s'inscrit. En effet, chaque espèce adopte une stratégie de croissance qui lui est propre en fonction des conditions environnementales

qu'elle a rencontrées et de son histoire évolutive. La coexistence de différentes espèces d'arbres dans un même peuplement peut donc influencer les caractéristiques morphologiques de chaque individu suivant l'interaction entre les différentes stratégies de croissance. Pour reprendre l'exemple de la concurrence pour la ressource lumineuse, certaines essences peuvent par exemple favoriser une croissance rapide et verticale tandis que d'autres privilégient une croissance plus lente et développent une architecture plus ramifiée et étalée (Pacala et Kobe, 2001 ; Lusk, 2002 ; Poorter et Arets, 2003).

Le caractère des essences face à la lumière constitue un point important dans le contexte de la variabilité génétique interspécifique et des différentes stratégies de croissance au sein du mélange. Les espèces d'arbres présentent en effet des tolérances différentes à l'ombre et à la lumière, et cette tolérance influence leur architecture. Les espèces tolérantes à l'ombrage tendent à développer une architecture plus verticale avec un tronc plus droit, ce qui leur permet de maintenir une position stable dans la canopée et de concurrencer les autres arbres pour la lumière en poussant vers le haut. En revanche, les espèces intolérantes à l'ombrage tendent à avoir une architecture plus horizontale avec des branches qui s'étendent latéralement, ce qui leur permet de concurrencer les autres arbres de manière latérale pour l'acquisition de la lumière. En général, les espèces tolérantes à l'ombrage ont une croissance plus lente et une durée de vie plus longue. La structure architecturale de chaque espèce est donc adaptée à sa stratégie de concurrence pour la lumière. Ainsi, le caractère des essences face à la lumière influence leurs propriétés architecturales, notamment la disposition des branches et la forme du tronc. Ces propriétés peuvent à leur tour affecter la manière dont les arbres interagissent les uns avec les autres et avec leur environnement, notamment en termes de compétition pour les ressources et de régulation des échanges gazeux et hydriques, et donc affecter les propriétés architecturales des arbres voisins (Chen *et al.*, 2018).

En somme, la composition spécifique d'un peuplement forestier peut influencer l'architecture des arbres en affectant les stratégies de croissance des différentes espèces et la disponibilité des ressources dans l'environnement. La figure 5 montre l'architecture des branches du hêtre européen lorsqu'il se trouve en monoculture comparé à l'architecture de ses branches lorsqu'il est mélangé à de l'épicéa commun. Les hêtres qui se sont développés en peuplements purs présentent des branches plus redressées tandis que ceux qui se sont développés en peuplements mélangés présentent plus de branches, avec presque deux fois plus de branches secondaires et tertiaires (Bayer *et al.*, 2013).

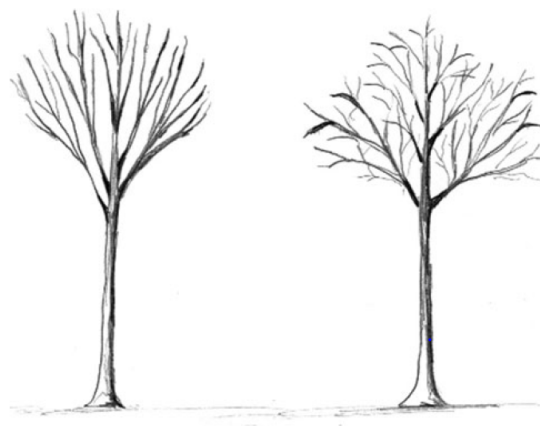


FIGURE 5 – Différence entre les propriétés architecturales des branches chez un hêtre européen en monoculture, à gauche, par rapport à un hêtre européen en mélange avec de l'épicéa commun, à droite (emprunté de Bayer *et al.*, 2013). Le mélange des essences et l'hétérogénéité structurale modifient la morphologie des arbres : le hêtre à gauche présente des branches plus redressées tandis que celui de droite présente un nombre plus grand de branches de deuxième et troisième ordre.

La densité du peuplement, c'est-à-dire le nombre d'arbres par unité de surface, constitue également un facteur influençant l'architecture des arbres en affectant la concurrence pour les ressources. Une densité élevée peut en effet engendrer une concurrence pour les ressources accrue. Par exemple, les couronnes peuvent être plus étroites pour atteindre la lumière disponible en hauteur. À l'inverse, lorsque la densité du peuplement est faible, les arbres accèdent plus facilement aux ressources et peuvent donc développer des couronnes plus larges (Lusk, 2002 ; Weiner, 2004). En somme, la densité du peuplement peut influencer la forme des arbres au travers la concurrence pour les ressources. C'est pourquoi, la sylviculture actuelle joue notamment sur la densité du peuplement pour aider au bon développement de l'architecture de l'arbre (Kint *et al.*, 2010).

Le couvert constitue un autre facteur important qui peut influencer l'architecture des arbres. La notion de couvert réfère à la quantité de lumière qui atteint le sol et les feuilles des arbres. Cette quantité de lumière dépend de la densité du feuillage, de la densité du peuplement, et de la hauteur des arbres dans le peuplement. Le couvert affecte la quantité et la qualité de la lumière disponible pour la photosynthèse (Niklas, 1994 ; Canham et Thomas, 2010). La densité du couvert diminue assez rapidement l'éclairement des troncs, ce qui évite l'apparition de branches basses, redressées et assure la rectitude de l'axe principal, avec un rapport h/d souhaitable en favorisant le grossissement (Kantola *et al.*, 2007). Le couvert constitue ainsi un abri vertical pour un arbre donné lorsque des arbres plus grands l'entourent et réduisent ainsi la quantité de lumière qui l'atteint en créant de l'ombre. L'abri vertical est en effet lié à la présence d'essences de plus haute stature ; sauf dans le cas où l'abri est fourni par un couvert pré-existant, les essences générant cet abri vertical lors d'une installation en plein découvert sont pionnières, avec une vitesse de croissance juvénile élevée, et héliophiles. Elles contribuent à tamiser la lumière, ce qui favorise des branches plus horizontales et plus fines. En revanche, la densité du peuplement joue un rôle d'abri horizontal pour un arbre donné lorsque des arbres qui limitent l'espace disponible pour la croissance de ses branches latérales l'entourent. Le gainage porte quant à lui plus particulièrement sur l'impact exercé par une essence du sous-étage sur la branchaison ; il s'agit donc généralement d'essences tolérantes à l'ombrage car elles peuvent subsister dans des conditions d'éclairement réduites par rapport au plein découvert. De plus, elles sont beaucoup plus efficaces pour filtrer la lumière grâce à l'opacité de leur houppier (Poorter et Arets, 2003 ; Kelty, 2006 ; Canham et Thomas, 2010).

Ces facteurs, à savoir variabilité génétique, voisinage intraspécifique, voisinage interspécifique, densité du peuplement et couvert forestier, sont en réalité extrêmement interdépendants car ils permettent ensemble d'expliquer la concurrence entre les arbres pour les ressources et donc la réponse des arbres aux conditions de leur environnement au travers leurs caractéristiques morphologiques.

2.1.4 Pourquoi étudier les propriétés architecturales chez les jeunes individus ?

Comme mentionné précédemment, la compétition exercée sur un individu influence ses propriétés architecturales. Ces processus de compétition ont un rôle déterminant sur les arbres de plantations, et ce dès un âge précoce. Pour obtenir des arbres de bonne qualité, la concurrence engendrée par les arbres du mélange doit alors être gérée dès le stade juvénile, durant lequel les arbres sont supposés être plus sensibles et répondent plus rapidement sous l'influence de la compétition (Van de Peer *et al.*, 2017). De plus, la bille de pied, dont la qualité détermine la valeur marchande de l'arbre, est éduquée à la fin de la phase de qualification. Considérer des individus jeunes est donc pertinent pour étudier l'acquisition de la bille de pied puisque celle-ci concerne environ les cinq premiers mètres pour les fûts

de chêne (Office National des Forêts, 2010).

Par ailleurs, une certaine méconnaissance de la plasticité architecturale à l'échelle de la brachaison réside chez les forêts jeunes. Un manque de connaissances reste donc à combler sur le sujet (Lintunen et Kaitaniemi, 2010 ; Lang *et al.*, 2012).

2.2 Pourquoi favoriser les essences en mélange ?

L'intérêt grandissant pour la sylviculture des peuplements mélangés vient de la récente conscientisation du danger engendré par une perte de diversité sur le fonctionnement des écosystèmes, dont les forêts (Balvanera *et al.*, 2006 ; Nadrowski *et al.*, 2010 ; Carnol *et al.*, 2014). Cette perte de biodiversité s'inscrit plus largement dans un contexte de changements climatiques et de raréfaction des ressources qui pousse à s'intéresser aux plantations à espèces variées (Bolte *et al.*, 2004 ; Spiecker *et al.*, 2004 ; Pretzsch et Schütze, 2015). De nombreuses études montrent que la plantation d'essences multiples peut apporter une variété de bénéfices économiques, environnementaux et sociaux (Hartley, 2002 ; Forrester *et al.*, 2005 ; Plath *et al.*, 2011 ; Pawson *et al.*, 2013 ; Carnol *et al.*, 2014). Le mélange favorise principalement la stabilité des peuplements et la diversité des fonctions rendues par ces peuplements, tandis qu'il peut accroître ou diminuer la productivité relative selon les essences associées et les conditions stationnelles. À l'heure actuelle, la plupart des études se sont attelées à déterminer si une différence significative de productivité existe entre les peuplements mixtes et les monocultures. Plus généralement, les 200 premières années des recherches quantitatives en sciences forestières se sont concentrées sur les thématiques du rendement et de la croissance (Pretzsch et Zenner, 2017).

Le mélange joue sur la productivité de façon positive ou négative selon que les différentes essences occupent des niches complémentaires (facilitation) ou entrent en concurrence pour les mêmes niches (compétition) (Pretzsch, 2005 ; Kelty, 2006). En effet, l'utilisation des ressources est maximisée par l'occupation de niches complémentaires, ce qui accroît la productivité à l'échelle du peuplement en comparaison d'un peuplement monospécifique (Pretzsch et Schütze, 2015). Les essences sélectionnées pour la plantation mélangée doivent comporter des traits fonctionnels et structurels complémentaires, tels que la tolérance à l'ombrage, le taux de croissance en hauteur, la structure du houppier, la phénologie des racines et des feuilles et la profondeur racinaire, et ce de sorte à favoriser une meilleure productivité et résistance aux perturbations (Kelty, 2006 ; Nichols *et al.*, 2006 ; Nguyen *et al.*, 2015). Ainsi, combiner des essences à croissance rapide avec des essences à croissance lente est approprié, tout comme combiner des essences longévives avec des essences peu longévives, des essences intolérantes à l'ombrage avec des essences tolérantes à l'ombrage, des essences à système racinaire superficiel avec des essences à système racinaire profond, des essences fixatrices d'azote avec des essences non-fixatrices d'azote ou encore des essences à couronne élancée et orientée en hauteur avec des essences à couronne large et à expansion plus latérale (Forrester *et al.*, 2005 ; Pretzsch, 2014 ; Nguyen *et al.*, 2015). La figure 6 illustre l'association de deux essences de niveaux de tolérance à l'ombrage contrastés, ce qui leur permet d'occuper des niches complémentaires (Kelty, 1992). La combinaison d'essences similaires (par exemple épicéa commun et hêtre européen, épicéa commun et sapin blanc) résulte en des rendements plus faibles que la combinaison d'essences complémentaires (par exemple pin sylvestre et hêtre européen, mélèze européen et hêtre européen) (Pretzsch et Zenner, 2017). La productivité est en effet amoindrie par des conditions de compétition asymétrique (Forrester *et al.*, 2005).

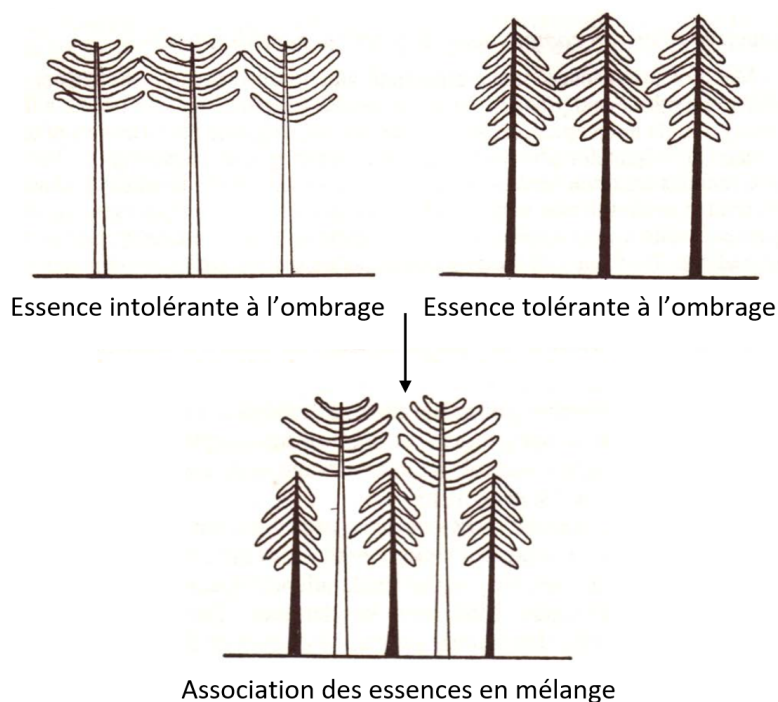


FIGURE 6 – Illustration du principe de complémentarité des niches : ici deux essences de niveaux de tolérance à l'ombrage contrastés sont associées de sorte à optimiser l'utilisation de la lumière (emprunté de Kelty, 1992)

Les combinaisons d'essences tolérantes et intolérantes à l'ombrage peuvent évidemment exploiter les ressources de façon complémentaire pour autant que l'essence intolérante soit plus haute que la tolérante, et que cet étagement soit maintenu au fur et à mesure du développement du peuplement (Zenner *et al.*, 2012). Sans cela, la coexistence des essences peut disparaître dû à un contraste important des compétitions interspécifiques.

La densité maximale du peuplement peut aussi être significativement augmentée par le mélange des essences comparé à un peuplement monospécifique (Pretzsch et Biber, 2016). Le mélange impacte fortement les composantes horizontales du rendement telles que la densité du peuplement mais n'a cependant aucun effet significatif sur les composantes verticales du rendement en termes de croissance en hauteur du peuplement (Vallet et Perot, 2016). Le rendement supérieur des peuplements mixtes est dû principalement à une densité accrue du peuplement ainsi qu'à un taux de croissance en volume des arbres accéléré (Pretzsch et Forrester, 2017). L'augmentation de la densité maximale se reflète par un niveau plus élevé de la droite d'auto-éclaircie et une réduction de la mortalité dans les peuplements mixtes (Pretzsch et Biber, 2016). La figure 7 montre que la distribution des volumes des tiges peut être plus large qu'en peuplement monospécifique, mais la taille moyenne reste similaire, et le nombre de tiges est plus important (Pretzsch et Schütze, 2015).

Par ailleurs, selon l'hypothèse de l'assurance de Yachi et Loreau (1999), la complémentarité des niches assure le maintien des fonctions écosystémiques et la résilience des écosystèmes forestiers. En effet, la diversité apportée par le mélange, en comparaison d'une monoculture, permet d'augmenter la couverture des fonctions rendues par les différentes essences, augmentant ainsi la capacité de substitution de ces fonctions lorsque l'une d'elle est perdue suite à une perturbation (Lefcheck *et al.*, 2015).

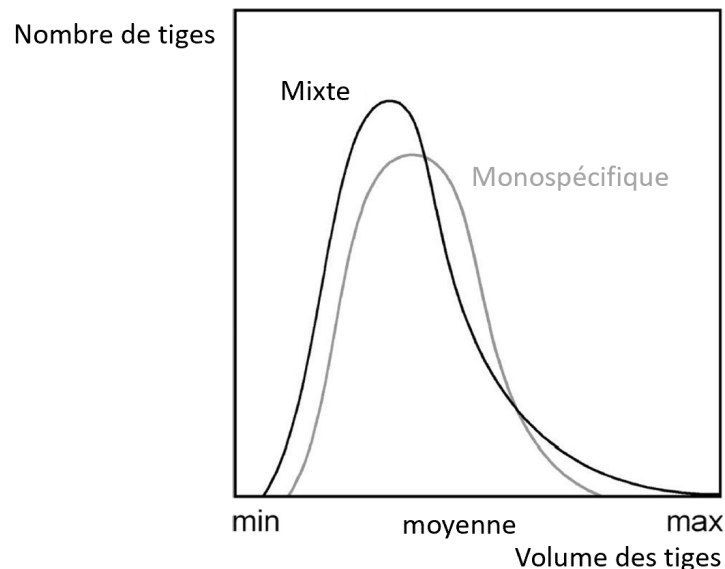


FIGURE 7 – Distribution caractéristique des tailles en peuplements mélangés par rapport à des peuplements monospécifiques (empruntée de Pretzsch et Schütze, 2015). Le nombre de tiges est plus élevé en peuplements mixtes et la distribution des volumes des tiges plus large (et plus escarpée sur la gauche). Dans les monocultures, la distribution des volumes est plus symétrique et moins pointue, tandis que la valeur moyenne des volumes reste similaire.

Le mélange, selon cette hypothèse, permet alors aux forêts de résister aux attaques parasitaires en conservant leur structure d'une part, et diminue la part d'individus malades d'autre part (Schwartz *et al.*, 2000). La résistance aux pathogènes est donc plus importante dans les peuplements mélangés (Jactel et Bckerhoff, 2007 ; Jactel *et al.*, 2008) que dans les peuplements monospécifiques étant donné leur moindre diversité spécifique et génétique. Diverses raisons expliquent cette résistance accrue des mélanges d'essences : la diminution de la proportion d'essences sensibles, leur dispersion spatiale, certaines essences peuvent limiter physiquement ou chimiquement la propagation des ravageurs, etc (Jactel *et al.*, 2009). En effet, l'uniformité de la composition génétique des arbres de monocultures, ainsi que leur proximité physique, en fait un festin et un habitat idéal pour les insectes et pathogènes, qui peuvent rapidement coloniser et répandre l'infection à l'ensemble des arbres (Hartley, 2002 ; Bckerhoff *et al.*, 2013 ; Moghaddam, 2014).

De plus, comme un nombre élevé d'espèces résulte en de nombreux traits différents, ce qui contribue à des fonctions variées, les écosystèmes avec une diversité en espèces plus importante peuvent être plus efficaces et sont généralement plus stables et résistants face aux perturbations que les écosystèmes avec moins d'espèces (Lohbeck *et al.*, 2016). La résilience après tempête se voit donc améliorée par le mélange (Jactel *et al.*, 2009 ; Gardiner *et al.*, 2010) car les semenciers peuvent coloniser des niches différentes suivant l'essence. En somme, les plantations mélangées résistent mieux aux dégâts causés par les tempêtes, les insectes ou les maladies (Hartley, 2002 ; Nichols *et al.*, 2006 ; Griess et Knoke, 2011). Plus d'éléments permettent cependant d'affirmer les effets bénéfiques du mélange liés aux agents de perturbation biotiques (insectes et pathogènes) qu'aux agents abiotiques (sécheresse, vent, feux) (Bauhus *et al.*, 2017a, b). Le mélange ne résulte donc pas toujours en une meilleure résistance ou résilience aux perturbations que les monocultures. Cela dépend majoritairement de la relation spécifique entre les caractéristiques des essences du mélange et les perturbations (Pretzsch et Zenner, 2017).

La qualité des tiges peut également profiter du mélange. Par exemple, les essences plus hautes peuvent abriter les essences plus basses en leur fournissant de l'ombre, ce qui résulte en une moindre

proportion de branches chez ces dernières (West, 2014) (voir abri vertical 2.1.3). La qualité de la tige et du bois sont en réalité principalement déterminées par la plasticité morphologique propre aux essences et l'hétérogénéité structurale du peuplement, et non par le mélange en lui-même (Pretzsch et Zenner, 2017).

Le mélange des essences peut ensuite augmenter la biodiversité car la diversité des essences dans un peuplement forestier favorise une plus grande diversité d'habitats pour la faune et la flore, contribuant ainsi à la conservation de la biodiversité (Paquette et Messier, 2011).

Pour terminer, les essences en mélange peuvent faire preuve d'une meilleure capacité à stocker le carbone et à réguler les cycles de l'eau, ce qui peut être bénéfique pour la régulation du climat et la gestion des ressources en eau (Bréda *et al.*, 2006 ; Schaub et Rigling, 2018).

En résumé, le mélange des essences peut avoir un effet positif sur la multifonctionnalité des peuplements forestiers en favorisant une productivité et une résilience accrues, une meilleure qualité du bois, une plus grande biodiversité et une meilleure régulation du cycle de l'eau et du climat. La diversité des espèces peut ainsi améliorer la fourniture de plusieurs services écosystémiques tels que la production de bois, le stockage du carbone, la régulation du climat et de l'eau, la protection de la biodiversité, la conservation des sols, etc.

Cependant, en raison de nombreux facteurs confondants, la comparaison des peuplements purs et mélangés est biaisée par des conditions inégales et donc les tendances données aux paragraphes précédents nécessitent d'être nuancées. Les effets du mélange sur la résistance aux pathogènes se contredisent par exemple suivant l'étude considérée. De plus, les études actuelles sur les plantations mélangées sont relativement limitées. Les mécanismes sous-jacents les effets du mélange sont de ce fait encore largement inconnus dans les plantations mélangées, tout comme les combinaisons d'essences dont les traits sont complémentaires (Liu *et al.*, 2018). La plupart des études sur l'architecture des arbres portent en outre sur des peuplements monospécifiques (Van de Peer *et al.*, 2017). L'effet du mélange sur les propriétés architecturales reste donc encore peu analysé et mérite de plus amples investigations. En effet, la plupart des études et modèles actuels utilisent des tables, des facteurs et des équations développés pour les monocultures et les appliquent à des peuplements à essences multiples, c'est pourquoi des recherches sur la structure individuelle des arbres, qui prennent en compte l'environnement local, sont nécessaires. Ces études doivent permettre de prédire les caractéristiques de l'arbre et de son bois en comptabilisant la taille de l'arbre ainsi que le développement structurel de ses voisins (Pretzsch et Zenner, 2017).

2.3 Le mélange dans une forêt mature vs un dispositif expérimental et difficultés techniques des plantations mélangées

Les études réalisées en forêts rendent l'établissement de liens de cause à effet difficile car de nombreux facteurs entrent en compte, tels que des facteurs liés au climat, au site, ... (Paille et Gosselin, 2011), comme mentionné au point 2.2. Cela a pour effet de rendre les résultats peu concluants car il est difficile de tester l'effet d'une variable explicative unique sur une variable réponse d'intérêt, entravant l'attribution des effets observés au mélange. La mise en place de dispositifs expérimentaux permet de résoudre le problème des facteurs confondants (voir 3.1.2).

En ce qui concerne les plantations mélangées, très peu d'instructions pour la conception et la gestion des systèmes à essences multiples existent. En particulier, contrairement aux monocultures où des instructions sylvicoles quantifiées ont largement été développées, celles-ci font défaut pour les peuplements mélangés (Nguyen *et al.*, 2015 ; Pretzsch et Zenner, 2017). Pour concevoir une plantation en outre, une connaissance approfondie des espèces d'arbres, de leurs conditions de croissance, de leurs interactions avec d'autres espèces et de leur utilisation est nécessaire. Les gestionnaires forestiers peuvent manquer de ces connaissances et compétences car les connaissances en matière d'associations des essences, et des conditions de site auxquelles associer ces combinaisons, restent limitées. Les mélanges à plus de quatre essences sont d'ailleurs peu communs dû à la complexité d'associer des caractéristiques appropriées et compatibles (Nichols *et al.*, 2006 ; Nguyen *et al.*, 2015).

Le bénéfice du mélange varie en fonction des conditions stationnelles et dépend de la capacité de l'assemblage des essences à compenser les facteurs limitant la croissance d'un site donné (Pretzsch et Zenner, 2017). Une première difficulté peut donc être liée à la sélection des espèces. En effet, les espèces choisies se doivent être les mieux adaptées aux conditions locales, à la fois pour assurer la croissance et la survie des arbres et pour maximiser les bénéfices écologiques et économiques de la forêt (Liu *et al.*, 2018). Un choix inapproprié d'essences pour le mélange peut créer des conditions locales qui augmentent les risques d'épidémies (Gebu, 2015 ; Thomsen, 2016). Comme mentionné précédemment, les espèces choisies doivent être complémentaires en termes de niche écologique, de croissance et de besoins en eau et en nutriments. Plus généralement, elles doivent comporter des traits fonctionnels et structurels complémentaires, car leur capacité à fournir les ressources se voit ainsi améliorée et cela résulte en de meilleurs rendements qu'en monocultures (Kelty, 2006 ; Nichols *et al.*, 2006 ; Nguyen *et al.*, 2015).

Trouver des espèces qui répondent à ces critères et qui sont adaptées aux conditions stationnelles locales peut se montrer difficile, en particulier dans un contexte d'accès aux semences et aux plants limité pour certaines espèces d'arbres, surtout pour les espèces indigènes (Broadhurst *et al.*, 2016). La plupart des recherches se concentrent sur des mélanges à deux essences dont une complémentarité potentielle est attendue, tels que les combinaisons épicéa-hêtre ou chêne-hêtre (Pretzsch et Zenner, 2017). Cependant, pour conserver le mélange tout au long de la dynamique de sa croissance, un compromis doit être déterminé entre la complémentarité et la compatibilité des essences. En effet, comme déjà mentionné, la complémentarité des traits ne peut pas mener à une concurrence interspécifique trop intense qui aboutirait à l'extinction de l'essence la moins compétitive (voir exemple de la tolérance à l'ombrage page 12). Une essence peut par exemple présenter une croissance en hauteur supérieure, ce qui induit un fort effet d'ombrage sur les essences qui y sont mélangées et peut mener à un dérèglement du mélange voire même à la disparition totale d'une essence, dans le cas où celle-ci serait particulièrement intolérante à l'ombrage (Zenner *et al.*, 2012 ; Pretzsch et Zenner, 2017).

Les interactions entre espèces déterminent les dynamiques forestières, qu'elles soient positives ou négatives, car elles dictent la coexistence de ces espèces et les processus menant à leur remplacement (Goldberg et Barton, 1992). Le type d'interaction dépend des traits des essences et varie selon les conditions du site, la structure du peuplement et les interventions sylvicoles, qui modifient à leur tour cette structure (Pretzsch, 2018). La capacité de compétition d'une essence dépend quant à elle de sa propension à acquérir plus de ressources qu'une autre ou à les utiliser plus efficacement. Cette capacité varie aussi avec celle à survivre ou croître sous des niveaux de ressources faibles provoquant un stress (par exemple tolérance à l'ombrage ou résistance à la sécheresse) (Valladares et Niinemets, 2008). Le maintien du mélange dans le temps constitue ainsi un véritable défi, comme expliqué dans l'introduction,

car les essences peuvent souffrir à la fois de la compétition inter et intraspécifique (Nguyen *et al.*, 2014).

Les espèces sélectionnées doivent donc être disposées de manière à minimiser la concurrence pour la lumière, l'eau et les nutriments. Déterminer la configuration spatiale optimale des différentes espèces peut alors se montrer complexe sur le plan technique, car un équilibre judicieux doit être trouvé pour maximiser la croissance et la productivité tout en dosant la concurrence intra- et interspécifique pour éviter que certaines espèces n'écrasent les autres (Pretzsch *et al.*, 2014). Si les essences ne sont pas bien agencées les unes par rapport aux autres, cette compétition entre essences peut en effet avoir des effets négatifs sur leur croissance. Pour cette raison, la densité de plantation doit être adaptée à chaque espèce mais la disposition spatiale doit également viser à ce que des individus objectifs de chaque essence figurent à terme dans le peuplement. La conservation de la diversité du mélange peut donc impliquer d'installer chaque essence en groupes ou clusters au lieu d'entremêler les différentes essences à l'échelle de l'arbre individuel. Planter par bouquets monospécifiques par exemple permet d'assurer qu'une proportion d'individus de qualité souhaitée reste à l'issue des différentes éclaircies ayant lieu au cours de la vie du peuplement (Kairiūkštis et Juodvalkis, 2005). La figure 8 illustre ce raisonnement par différentes configurations spatiales possibles allant du mélange installé pied par pied à l'accolement de petits peuplements monospécifiques.

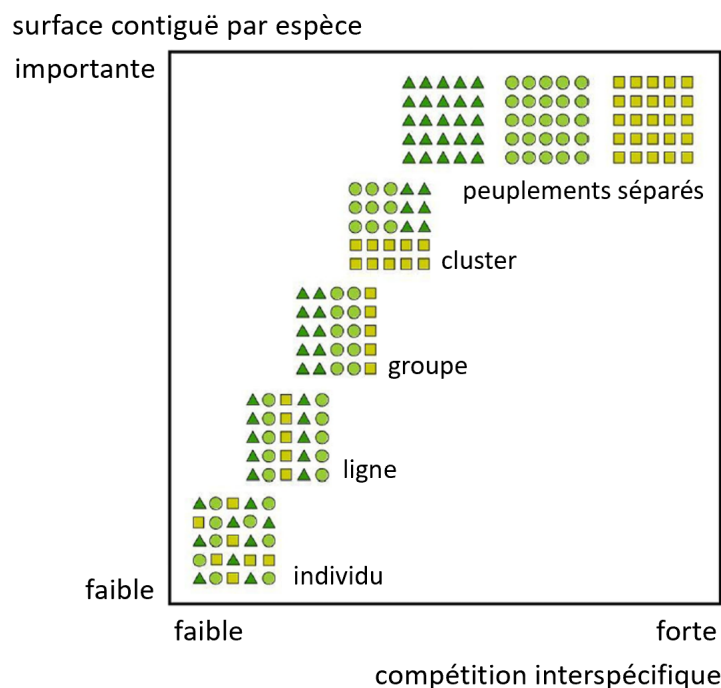


FIGURE 8 – Maintien du mélange en jouant sur le contrôle de la compétition interspécifique via la configuration spatiale des différentes essences (adapté de Bauhus *et al.*, 2017b et Pretzsch et Zenner, 2017). Trois essences sont représentées, symbolisées chacune par une forme géométrique, pour montrer qu'au plus la compétition interspécifique est forte, au plus ces trois essences auront chacune besoin d'espace contigu pour s'installer et croître dans un peuplement mixte.

Un bois de haute qualité pourrait ainsi être obtenu dans les peuplements mélangés en augmentant la surface contiguë par essence pour les essences les plus plastiques ou en regroupant spatialement les essences avec des traits et/ou des tailles similaires. Les essences les moins plastiques pourraient quant à elles donner une qualité de bois convenable même dans des mélanges pied par pied à structure hétérogène (Pretzsch et Zenner, 2017).

Il existe différents modèles de disposition spatiale mais des recherches scientifiques et expériences de

terrain restent nécessaires pour agencer une disposition spatiale optimale des essences dans une plantation mélangée, tout comme pour concevoir des modèles (Pretzsch *et al.*, 2021).

Par ailleurs, tout comme les essences du mélange peuvent être séparées spatialement pour réduire la compétition interspécifique et stabiliser le mélange dans le temps, la séparation des essences peut aussi se faire dans le temps. En effet, au lieu d'entremêler les différentes essences au sein d'une seule strate, elles peuvent être mélangées au sein de différentes strates dont les âges sont différents (Pretzsch et Zenner, 2017). La figure 9 illustre la séparation des essences dans le temps afin de contrôler la compétition interspécifique. En effet, pour éviter qu'une essence dont la vitesse de croissance juvénile est supérieure à celle des autres essences les surcime, ce qui pourrait mettre à mal la coexistence des essences dans le mélange, l'essence à vitesse de croissance élevée peut être plantée plus tard pour laisser de l'avance aux autres (Kelty, 2006). À gauche, les deux essences sont plantées ensemble tandis qu'à droite, l'essence feuillue, qui présente ici la vitesse de croissance juvénile la plus élevée, est plantée après l'essence résineuse, dont la vitesse de croissance est plus faible dans le jeune âge.

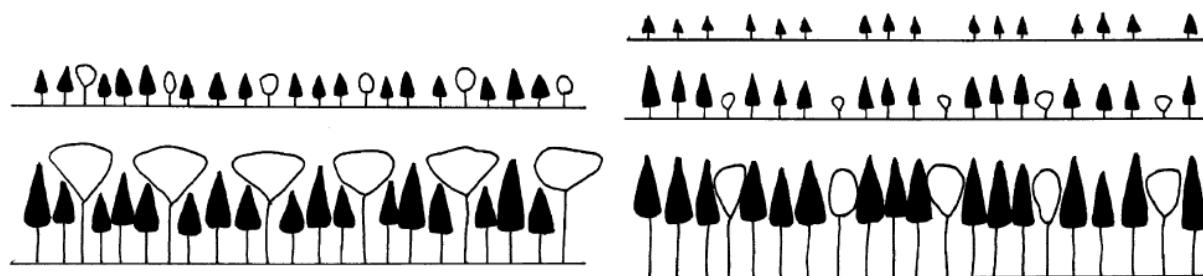


FIGURE 9 – *Maintien du mélange en jouant sur le contrôle de la compétition interspécifique via la séparation des différentes essences dans le temps (emprunté de Kelty, 2006). Le mélange consiste en deux essences ; l'une feuillue et l'autre résineuse. Pour réduire la compétition interspécifique, l'essence dont la vitesse de croissance juvénile est supérieure, dans ce cas l'essence feuillue, est installée plus tard pour laisser le temps à l'essence dont la vitesse de croissance est plus faible, ici l'essence résineuse, de s'installer en premier.*

La quantification des proportions de chaque essence dans le mélange peut également se montrer complexe car cela nécessite de connaître l'espace nécessaire à la croissance de chacune. En effet, des essences de même diamètre à hauteur de poitrine peuvent fortement différer de par la taille de leur couronne et leurs besoins en espace de croissance (Pretzsch et Zenner, 2017). Cela signifie que des proportions différentes d'espace de croissance, propres à chaque essence, peuvent être nécessaires pour obtenir un nombre de tiges à l'hectare désiré (ou volume sur pied à l'hectare). Selon Pretzsch et Zenner (2017), des coefficients d'équivalence permettent de quantifier la relation entre la taille de la couronne et l'espace requis pour la croissance de différentes essences. Ces coefficients indiquent l'espace de croissance dont une essence peut avoir besoin en moyenne par rapport à une autre d'à peu près le même diamètre et le même volume de tige. Les proportions du mélange en termes de nombre de tiges résultent en des surfaces proportionnellement bien moindres pour une essence dont les couronnes sont plus petites et mélangée à une essence caractérisée par des couronnes plus larges.

En ce qui concerne la régénération, son initiation, son développement et sa composition spécifique peuvent être régulés par le volume sur pied de l'étage dominant, et ce en jouant sur le calendrier et l'intensité des prélèvements en volume dans cet étage dominant. Pour éviter de déstabiliser le peuplement dominant résiduel, l'ouverture de l'étage supérieur ne doit pas se faire trop tardivement. De plus, au plus la réduction du volume se fait tardivement, au plus la régénération s'établit tard. Différents scénarios peuvent être calculés par des modèles pour définir différentes trajectoires de traitement. Ainsi, ces

options peuvent être transformées en recommandations sylvicoles simples qui quantifient les aspects les plus essentiels des dynamiques en peuplement mixte (Pretzsch et Zenner, 2017).

En somme, comme les mélanges peuvent être arrangés de façon multiple avec des variations non seulement dans la composition en essences, mais aussi dans le caractère dominant de ces essences, leur arrangement spatial ainsi que dans la structure en âge (Ashton et Ducey, 1997), la gestion des opérations sylvicoles en plantations mélangées peut se montrer complexe. Il peut être nécessaire d'adapter les techniques de sylviculture à chaque espèce car elles peuvent avoir des exigences différentes en matière d'entretien et de récolte, ce qui implique une gestion adaptée en fonction des caractéristiques de chaque essence (Pretzsch et Zenner, 2017). Dans un contexte où de nombreux autres services et fonctions des forêts que la fonction de production se veulent être valorisés, la gestion peut également se complexifier de par la recherche de compromis entre différents traitements sylvicoles qui intègrent qualité du bois, revenus financiers, conservation des habitats, séquestration et stockage du carbone, ... De plus, les effets du mélange, tout comme les réponses morphologiques, la structure du peuplement et la complémentarité entre les essences, peuvent varier selon l'échelle spatiale, et donc des échelles de surface allant du voisinage direct à la forêt en passant par le peuplement doivent être intégrées aux recherches afin d'énoncer des recommandations pour la conception de plantations mélangées (Pretzsch et Zenner, 2017).

Pour terminer, la conception et la mise en place de plantations mélangées peuvent être plus coûteuses que celles de monocultures. Les coûts peuvent être liés à la sélection des espèces, à la planification de la composition et de la structure de la forêt, à la gestion de la concurrence, ainsi qu'à la récolte et à l'entretien des arbres. La diversification forestière constitue en outre un investissement à long terme, or la prédiction des résultats à long terme peut être difficile. Les incertitudes économiques et politiques, ainsi que les changements dans les conditions environnementales, affectent également la rentabilité et la durabilité des plantations mélangées (IPCC, 2014).

2.4 Le focus sur le chêne : pourquoi ?

Étant donné la vitesse de croissance élevée des deux espèces résineuses (douglas et mélèze), étudier leurs propriétés architecturales n'est pas pertinent car les autres espèces (chêne, hêtre, érable) exercent peu d'impact sur leur croissance étant donné que leur propre vitesse de croissance juvénile est largement moins soutenue (Fourchy, 1952 ; Angelier, 2007 ; Office National des Forêts, 2007 ; 2010 ; Lestrade *et al.*, 2013).

L'érable a quant à lui été disqualifié en raison de sa propension à croître de manière indisciplinée. En effet, sous éclaircissement faible, la croissance de l'érable sycomore diminue et la tige peut se déformer étant donné une forte tendance de l'essence au phototropisme (Lestrade *et al.*, 2013).

Le choix final s'est alors dirigé sur l'étude du chêne et du hêtre, qui prennent une place importante dans le marché du bois d'oeuvre. Les deux essences auraient été analysées sans les contraintes du temps et de la main d'oeuvre. Un choix étant cependant nécessaire au vu de ces limitations, celui-ci s'est porté sur le chêne. En effet, le chêne présente de meilleures aptitudes face aux changements climatiques (Fichier écologique des essences, 2017). Accessoirement, son prix unitaire (euros/m³) est plus élevé que celui du hêtre, lui offrant un atout économique. En effet, le chêne offre un bois de qualité, présentant une bonne dureté et figurant parmi les plus durables. Il est résistant aux intempéries et à l'usure, ce

qui en fait un bois parfaitement adapté pour une utilisation dans la construction et la fabrication de meubles. Sa valeur commerciale élevée se justifie ainsi par son emploi dans la construction de bâtiments historiques et dans la fabrication de meubles haut de gamme (Jactel et Brockerhoff, 2013). La figure 10 illustre la gamme de prix plus élevée pour du chêne de qualité menuiserie-ébénisterie comparé à du hêtre blanc (par opposition à du hêtre dévalué dû à la couleur rouge-brun de son coeur) (PanoraBois, 2021). En effet, bien que la valeur des bois sur pied ait globalement diminué dans les deux cas sur les 30 dernières années, le chêne garde une position plus avantageuse sur le marché du bois d'oeuvre que le hêtre (50 à 225 euros/m³ et 25 à 80 euros/m³ respectivement). De plus, le prix du chêne sur le marché tend à réaugmenter.

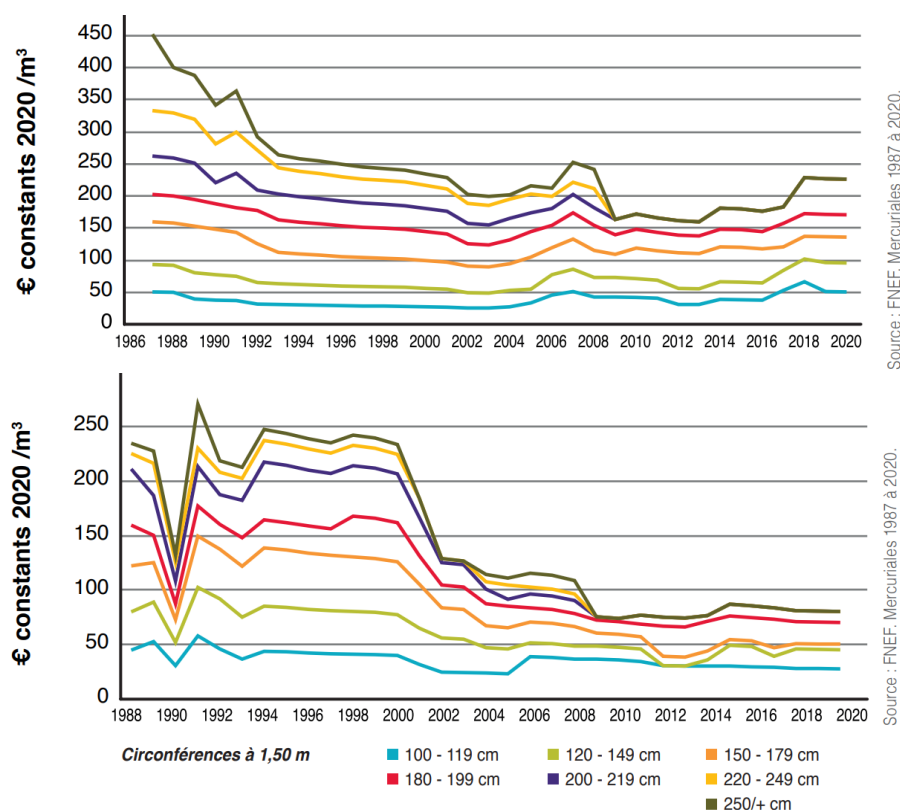


FIGURE 10 – Évolution des prix moyens des bois sur pied en forêt privée wallonne (en euros constants 2020/m³) : le graphique du haut représente l'évolution des prix entre 1986 et 2020 pour du chêne de qualité menuiserie-ébénisterie tandis que le graphique du bas représente l'évolution des prix entre 1988 et 2020 pour du hêtre blanc (par opposition à du hêtre à coeur rouge, impropre à la filière bois d'oeuvre) (PanoraBois, 2021). Malgré une diminution des prix pendant cette période, la gamme des prix pour le chêne reste au-dessus de celle du hêtre. De plus, les prix du marché du chêne tendent à repartir à la hausse.

Pour terminer, la figure 11 résume le lien entre les différents thèmes abordés au sein de cet état de l'art et comment ils permettent de répondre aux objectifs du mémoire donnés au point 1.2.

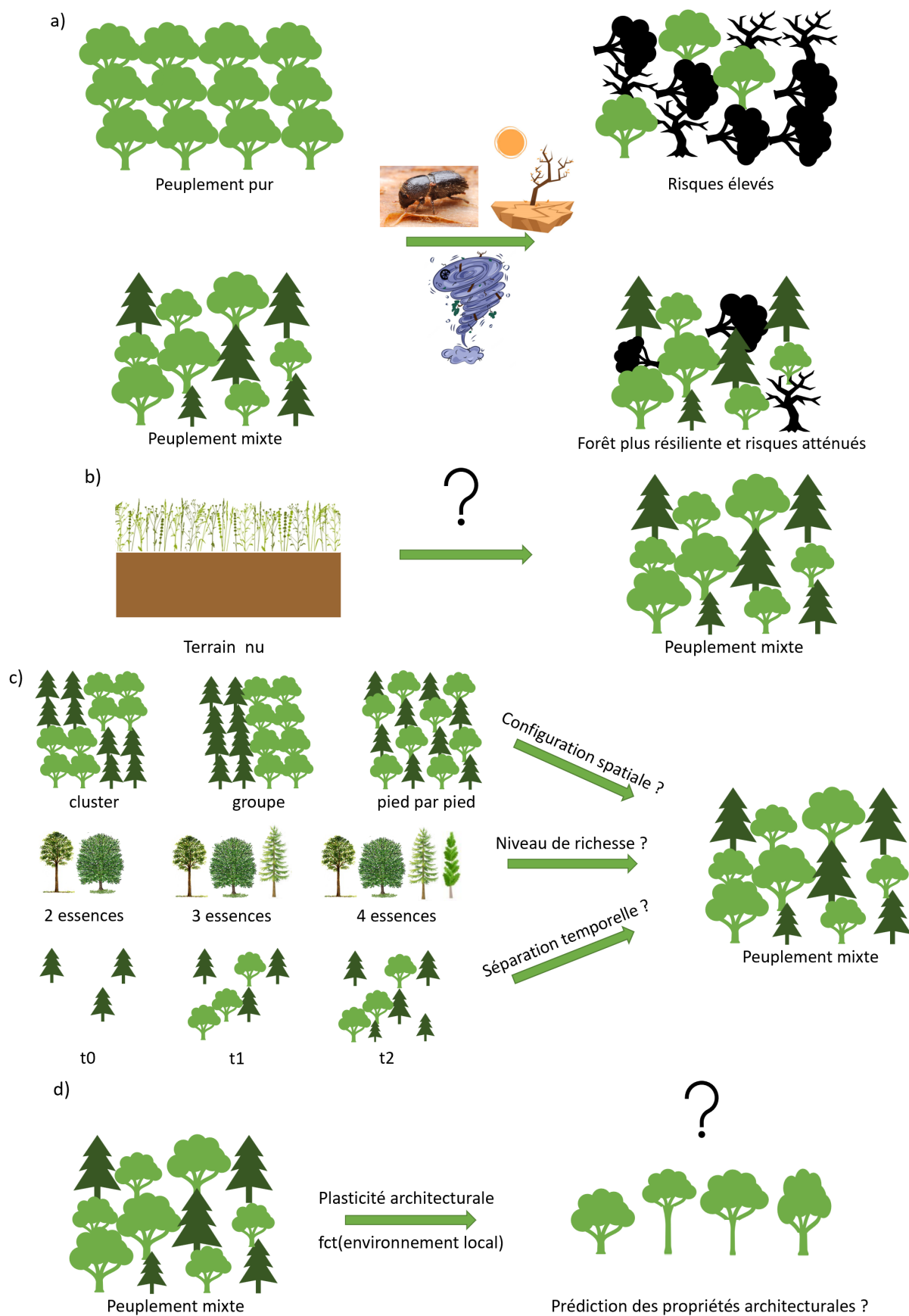


FIGURE 11 – Illustration du lien entre les thèmes abordés dans l'état de l'art et l'objectif du mémoire : intérêts des peuplements mélangés par rapport aux peuplements purs (a), conception d'une plantation mélangée à partir d'un terrain nu (b), difficultés de conception d'une plantation mélangée (c) et réponse des arbres aux conditions locales de leur environnement par leurs propriétés architecturales (agencement des branches, taille du houppier, grosseur du tronc, ...), qui dépendent donc de la manière avec laquelle le peuplement a été mis en place (niveau de richesse, configuration spatiale, configuration temporelle, ...)

3 Matériel et méthodes

3.1 FORBIO Gedinne

3.1.1 Gedinne : climat et sol

Gedinne est une commune de Belgique de la région des Ardennes, située dans la province de Namur. Le climatogramme de Gedinne pour la période 1991-2020, présenté à la figure 12, montre que le mois le plus chaud est le mois de juillet tandis que le mois le plus froid est le mois de janvier. La température moyenne au mois de juillet est de 17°C et la température moyenne maximale est de 22,1°C. Au mois de janvier, les températures moyenne et minimale moyenne sont respectivement de 1,6 et -1°C. La température moyenne annuelle est de 9°C tandis que les températures maximale et minimale moyennes annuelles valent respectivement 13,1 et 4,8°C (IRM, 2021).

Les précipitations moyennes annuelles s'élèvent quant à elles à 1192 mm dans la commune. Le mois le plus pluvieux est décembre, avec une quantité moyenne de précipitations de 159 mm tandis que le mois caractérisé par la quantité de précipitations la plus faible est celui d'avril, avec 70 mm en moyenne (IRM, 2021).

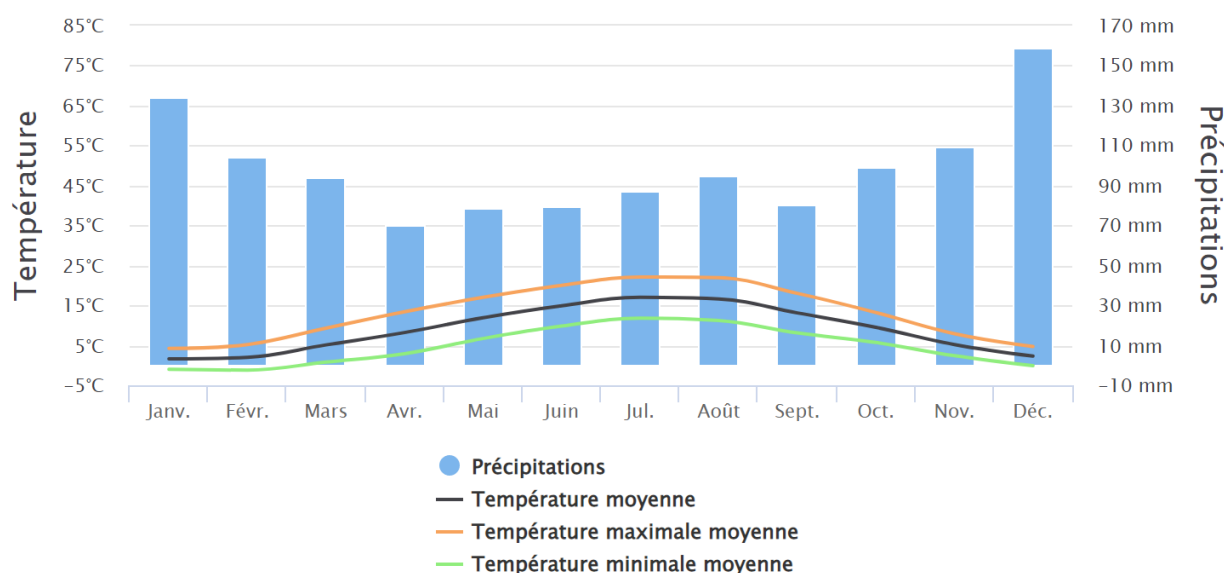


FIGURE 12 – Valeurs mensuelles des températures de l'air et des précipitations dans la commune de Gedinne, pour la période de référence 1991-2020 (IRM, 2021)

En ce qui concerne le sol, celui-ci présente une profondeur faible (60 cm environ) et s'est développé dans une couche de solifluxion caillouteuse où des loess périglaciaires et les produits d'altération du matériau parental, principalement des schistes et des grès, se sont mélangés. Le sol est caractérisé par une texture de limons caillouteux, avec un drainage favorable et un développement de profil dit B structural (Carte Numérique des Sols de Wallonie). Ce type de sol est appelé cambisol selon la classification de la WRB (2006). Avant l'installation du dispositif expérimental de FORBIO, le sol était occupé par de la forêt, et ce au moins depuis la fin du XVIII^e siècle. Une plantation d'épicéas a remplacé la forêt feuillue au début du XX^e siècle et a ensuite été mise à blanc en 2005 (Verheyen *et al.*, 2013).

Les caractéristiques générales du site sont rassemblées au sein du tableau 1.

TABLEAU 1 – Caractéristiques générales du site de Gedinne : coordonnées, altitude (Verheyen et al., 2013), températures (IRM, 2021), précipitations (IRM, 2021), type de sol (CNSW et WRB, 2006) et occupations passées du sol (Verheyen et al., 2013). Le dispositif comprend deux blocs ; Gribelle (Gr) et Gouverneurs (Go) (voir section 3.1.2).

Coordonnées géographiques	49°60'N 4°59'E (Gr) 49°59'N 4°59'E (Go)
Altitude (m)	367–376 (Gr) 421–426 (Go)
Température moyenne annuelle (°C)	9
Température maximale moyenne annuelle (°C)	13,1
Température minimale moyenne annuelle (°C)	4,8
Température moyenne du mois le plus chaud (juil.) (°C)	17
Température moyenne du mois le plus froid (janv.) (°C)	1,6
Précipitations moyennes annuelles (mm)	1192
Type de sol	Gbb (CNSW) Cambisol (WRB)
Occupations passées du sol	Fin du XVIII ^e siècle (peut-être déjà avant) jusqu'au début du XX ^e siècle : forêt feuillue Début du XX ^e siècle jusqu'à 2005 (mise à blanc) : plantation d'épicéas

3.1.2 Présentation du dispositif

Les dispositifs FORBIO sont au nombre de trois : Gedinne, Zedelgem et Hechtel-Eksel (Forest & Nature Lab, 2011). Ce sont donc des dispositifs belges, intégrés au réseau TreeDivNet. A Gedinne, le site est subdivisé en deux blocs nommés Gribelle et Gouverneurs, les deux étant séparés par quelques kilomètres et visant à servir de répliques. Le site de Gedinne a vu ses débuts en 2009, ce qui en fait un excellent candidat pour l'étude d'individus en phase d'éducation. Les plants étaient âgés de deux ans à la plantation.

Le design expérimental permet de tester quatre niveaux de richesse (niveau 1 : une essence, niveau 2 : deux essences, ...) au sein desquels différentes compositions spécifiques ont été installées, ce qui donne l'opportunité d'étudier cinq niveaux de composition spécifique. Cela mène donc à 20 modalités de mélange, auxquelles s'en ajoutent deux supplémentaires car trois provenances de hêtres ont été testées au niveau de richesse 1. Vingt-deux modalités sont alors présentes sur ce site, c'est pourquoi chacun des deux blocs comporte 22 parcelles. La distribution spatiale des niveaux de richesse au sein des deux blocs est présentée à la figure 13 (Forest & Nature Lab, 2011).

Cinq essences ont été plantées à des fins de recherche : le chêne sessile (*Quercus petraea*), le hêtre (*Fagus sylvatica*), l'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus*), le mélèze (*Larix decidua*) et le douglas (*Pseudotsuga menziesii*). Les communautés synthétiques à Gedinne sont installées par groupes de neuf plants d'une même essence pour tamponner la compétition dans le jeune âge (si pied par pied plus difficile de maintenir la diversité d'essences, voir explications point 2.3). Toutes les parcelles ont une longueur de 42m. Cependant, 13 d'entre elles ont une largeur de 37,5m alors que les 31 restantes conservent une largeur égale à leur longueur. Ces 31 dernières présentent donc une surface plus large ce qui leur permet d'accueillir 784 arbres. Les 13 autres parcelles en comportent 700. Ces chiffres correspondent aux individus plantés et donc il y a aujourd'hui moins d'individus vivants. Le dispositif permet d'étudier les cinq essences dans une approche de suivi, à la fois en mélange et en monoculture, en éliminant les facteurs environnementaux confondants étant donné que les plantations ont lieu en

même temps et à densité constante. Les conditions homogènes apportées par le site engendrent aussi une plus-value pour minimiser ces facteurs (Van de Peer *et al.*, 2017).

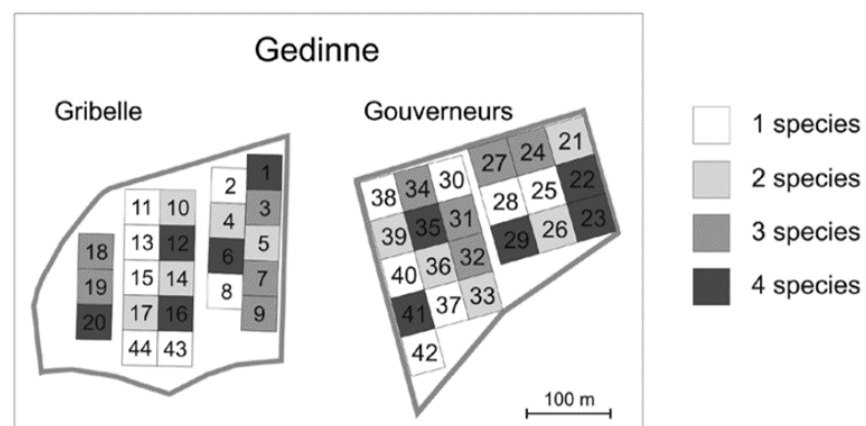


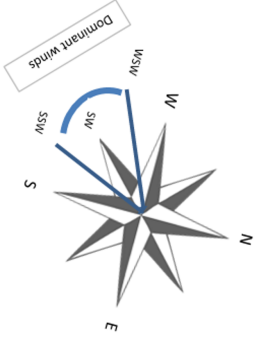
FIGURE 13 – *Distribution spatiale des quatre niveaux de richesse au sein des 22 parcelles présentes dans chacun des deux blocs : Gribelle vs Gouverneurs (Forest & Nature Lab, 2011)*

3.1.3 Structure d'un "plot"

A titre d'exemple, un mélange à trois essences est illustré à la figure 14 pour présenter la structure d'une parcelle. Il s'agit ici du plot 34, composé d'érable sycomore, de chêne sessile et de douglas. Les espèces sont plantées par bouquet (monospécifique) de neuf (3x3) et chaque plant est espacé de son voisin d'une distance (théorique) d'1m50. En bordure des parcelles, les groupes sont parfois de 12 pour éviter d'avoir un cluster de neuf et puis un de trois. Pour les mélanges à deux espèces, ces clusters de neuf individus d'une même essence sont positionnés en damier alors que pour ceux à plus de deux espèces, la position des clusters a été déterminée aléatoirement. Dans chaque parcelle figurent quatre placettes permanentes. Les placettes permanentes sont des zones dans lesquelles les arbres jouent un rôle de témoin, en vue de suivre leur évolution dans le temps. Ils n'ont donc subi aucune intervention (taille ou élagage) depuis leur plantation. Ces placettes comportent 16 arbres chacune, qui servent à représenter le mélange étudié. Par exemple, pour la parcelle 34 représentée, chaque placette permanente est constituée de manière à contenir à la fois le douglas, le chêne et l'érable. Ainsi, au total des quatre placettes, chacune de ces essences est représentée de façon équivalente.

Au sein de ces placettes permanentes, tous les arbres sont donc mesurés depuis l'installation (mesures non destructives) alors que pour les autres clusters, seulement les arbres centraux sont mesurés, qui eux subissent les tailles et élagages recommandés par le DNF. Les blocs restent en effet soumis au régime forestier car ils appartiennent à la commune de Gedinne. Ces arbres centraux sont soulignés sur le plan.

Chaque arbre présente un numéro fictif mais seuls les arbres encadrés en pointillés portent un numéro réel, lequel leur est attaché et indiqué sur une étiquette. Ces arbres ont été désignés préalablement aux premières interventions (2015-2016) comme individus d'avenir, et ce de façon irréversible. Cependant, depuis cette désignation, certains de ces arbres se sont vus perdre leur statut social dominant ou leur bonne conformation et donc, parmi ces arbres encadrés en pointillés, certains subissent des interventions (étiquettes rouges) tandis que d'autres pas (étiquettes bleues). Les arbres dont le numéro ne porte aucune couleur sur les plans sont morts. Ces plans datent de juillet 2021 et ne sont donc pas à jour.



24

3.2 Préselection des individus cibles

Avant de commencer les mesures à proprement parler, les arbres cibles ont été repérés. Le terme "arbre cible" désigne un arbre objectif non susceptible d'être prélevé lors des premières rotations. Les parcelles des deux blocs ont alors été parcourues une à une afin de choisir les chênes les mieux conformés car, comme mentionné dans l'introduction (point 1.2), les arbres cibles sont des chênes. Dix parcelles sur les 22 de chaque bloc contiennent du chêne. L'étude s'étend alors à un total de 20 parcelles. Pour chaque parcelle, un nombre de six arbres à choisir a été fixé sauf pour les mélanges à quatre essences, où la sélection s'est restreinte à un nombre de quatre car, au vu de la moindre proportion de chênes dans ces mélanges, en trouver six répondant aux critères détaillés ci-dessous augmente encore la difficulté déjà présente. En tout, 104 individus (52 par bloc) ont alors été sélectionnés. Le raisonnement est détaillé au tableau 2. En réalité, 106 chênes cibles ont été désignés car six chênes ont pu correspondre au protocole ci-dessous dans une des parcelles à quatre essences (le plot 35).

TABLEAU 2 – *Raisonnement amenant à la sélection de 104 chênes cibles : le tableau montre, pour chacun des niveaux de richesse, le nombre de parcelles qui comprennent du chêne. Six chênes cibles sont sélectionnés sur chaque parcelle, à l'exception des parcelles à quatre essences où seuls quatre chênes sont sélectionnés. 52 arbres sont choisis sur chacun des blocs, menant donc bien à un total de 104 arbres.*

	Niveaux de richesse	Nombre de parcelles pour chaque niveau de richesse	Composition spécifique des différents mélanges	Nombre d'arbres cibles sélectionnés par parcelle	Nombre total d'arbres cibles sélectionnés
	1	1	chêne	6	$1 \times 6 = 6$
	2	2	chêne – hêtre chêne – mélèze	6	$2 \times 6 = 12$
	3	3	chêne – hêtre – douglas érable – chêne – douglas érable – chêne – mélèze	6	$3 \times 6 = 18$
	4	4	chêne – hêtre – douglas - mélèze érable – chêne – douglas - hêtre érable – chêne – mélèze – douglas érable – chêne – mélèze – hêtre	4	$4 \times 4 = 16$
Total pour un bloc		10			52

Les critères de sélection consistent à choisir des individus idéalement dominants ou codominants et bien conformés. Dans les faits, ces critères sont rarement remplis, le nombre de six arbres (ou quatre pour les mélanges à quatre essences) est alors obtenu par la procédure suivante :

- Le critère de sélection principal a été de s'attacher à choisir des individus cibles représentatifs du mélange en présence. Les arbres cibles ont ainsi été sélectionnés selon leur position. En effet, leur position doit permettre la prise en compte de toutes les essences présentes dans le mélange étudié. Par exemple, si le mélange comprend du chêne, du hêtre, du douglas et du mélèze, le chêne sélectionné doit comprendre, dans son entourage appartenant à la placette de mesure, du mélèze, du douglas, du hêtre et du chêne. Pour autant, toutes les essences ne se veulent pas être représentées de façon équivalente en nombre (pas de recherche particulière d'un équilibre).
- Le critère de sélection ayant ensuite été considéré comme prioritaire a été de s'attacher à la bonne conformation de l'arbre, en se laissant la possibilité de prendre des arbres non dominants s'ils sont de bonne conformation, et ce pour autant qu'une éclaircie à leur profit permette d'assurer leur croissance.

- L'assouplissement par le critère précédant ne permettant toutefois pas d'atteindre le nombre de six, des arbres de conformation moins bonne ont été sélectionnés lorsqu'il a été considéré qu'une intervention d'élagage et/ou taille pourrait faire d'eux des sujets objectifs.
- Pour finir, dans le cas des mélanges avec de l'érable, le critère lié à l'environnement de l'arbre cible a souvent été assoupli. En effet, en raison d'un taux de mortalité élevé chez cette dernière essence, elle ne se trouve pas toujours dans l'environnement immédiat de l'arbre choisi.

3.3 Caractérisation des arbres cibles et de leur environnement

Les mesures se sont partitionnées sur trois niveaux (les arbres cibles, leurs branches et leurs voisins) et ont été collectées selon des placettes circulaires de rayon variable, dont les chênes préalablement choisis comme arbres cibles constituent le centre. Les mesures de branchaison ont uniquement été réalisées sur ces derniers.

3.3.1 A l'échelle de l'arbre cible

Pour les 106 chênes sélectionnés, les mesures suivantes ont été collectées :

- la circonférence, mesurée à 1m30 à l'aide d'un mètre ruban classique de 1m50 de long ;
- la hauteur totale de l'arbre (m), mesurée en visant le sommet de la cime avec un vertex ;
- la hauteur de la base du houppier (cm), mesurée grâce à une perche de 4m graduée tous les 10cm et placée contre le tronc. La hauteur de la base du houppier désigne la hauteur des premières feuilles vivantes (une fois projetées sur le tronc), comme le montre la photo de la figure 15.



FIGURE 15 – Utilisation de la perche pour la mesure de la hauteur de la base du houppier

3.3.2 A l'échelle des branches de l'arbre cible

Les mesures ont été restreintes à une hauteur de quatre mètres pour la totalité des chênes cibles. De cette façon, 60% de la hauteur totale est échantillonnée, la hauteur moyenne des chênes étant de 6,6 m, et le protocole de mesures reste homogène pour chacun des arbres cibles. En effet, comme cette étude porte sur les propriétés architecturales d'individus en phase d'éducation, l'intérêt se centre sur

la formation du fût. Mesurer jusqu'à quatre mètres est donc largement suffisant car l'acquisition du fût concerne les six premiers mètres de la hauteur totale chez les chênes (Office National des Forêts, 2010) or, la première branche apparaît en moyenne déjà à 30% de la hauteur totale.

Les mesures sont plus précises dans les deux premiers mètres que dans les deux suivants, étant donné les difficultés techniques pour prendre des mesures au-delà de deux mètres.

Les choix posés **pour les deux premiers mètres** sont les suivants :

- Se limiter à prendre les branches d'un diamètre supérieur à un seuil fixé à 1cm. Ces diamètres (mm) sont mesurés avec un pied à coulisse à l'insertion des branches.
- La hauteur de toutes les branches sélectionnées est mesurée, à l'aide de la perche de 4m graduée tous les 10cm.
- Pour chaque branche, son caractère vivant (V) ou mort (M) a été indiqué. Les branches sont dites mortes lorsqu'elles sont défeuillées et cassantes lorsqu'on tente de les plier.
- L'angle d'insertion par rapport à la verticale de ces branches est qualifié selon trois catégories (0-30°, 30-60° et 60-90°) avec une équerre imprimée sur feuille A4, servant de repère. Par souci de simplicité, chacune de ces catégories s'est vue attribuer un chiffre, à savoir 1, 2 et 3 respectivement. Cet angle d'inclinaison des branches sera noté θ par la suite.
- L'orientation de chaque branche a également été considérée, et ce suivant huit (sous-)directions cardinales (N, E, S, O, N-E, S-E, N-O, S-O), déterminées à l'aide d'une boussole.

Dans les deux mètres suivants, les mêmes mesures ont été relevées. Cependant, étant donné que les diamètres des branches n'ont pas pu être mesurés au pied à coulisse au-delà de deux mètres, un gabarit a été conçu par l'équipe technique pour former des catégories de grosseur, subdivisées en trois classes : 1-3 cm, 3-5 cm et > 5 cm. Ce gabarit a été placé au bout d'une tige métallique de 3m. Comme les trois catégories choisies sont assez grossières, elles ont été affinées en soulignant pour chaque branche la limite la plus proche. Si le diamètre de la branche est proche du milieu de la catégorie alors rien n'a été souligné. Par exemple, si le diamètre est proche de 10/30mm, le chiffre 10/30 est souligné. Si le diamètre est proche de 20mm par contre, aucun des deux chiffres de cette catégorie 10-30 n'est souligné. Le tableau 3 illustre ce propos.

TABLEAU 3 – *Illustration des relevés de diamètres de branches au-delà de deux mètres ; exemple pour la catégorie 10-30 mm. Les catégories sont affinées en soulignant le chiffre qui est le plus proche du diamètre mesuré.*

Diamètre à l'insertion des branches (mm)	Catégories de diamètre
Proche de 10	Cat. <u>10</u> -30
Proche de 20	Cat. 10- <u>30</u>
Proche de 30	Cat. 10- <u>30</u>

Au-delà de quatre mètres, le nombre de fourches a toutefois été compté. Ce qui a ici été nommé fourches reprend toute branche dont l'angle par rapport à la verticale est inférieur à 30°. Dans ces fourches sont alors reprises, au sens sylvicole, des fourches mais aussi des branches redressées.

La figure 16 permet de schématiser et résumer les mesures réalisées aux échelles arbre cible et branches. Le tableau 4 reprend quant à lui les mesures réalisées au niveau des branches, en différenciant celles relevées en deçà et au-delà de deux mètres.

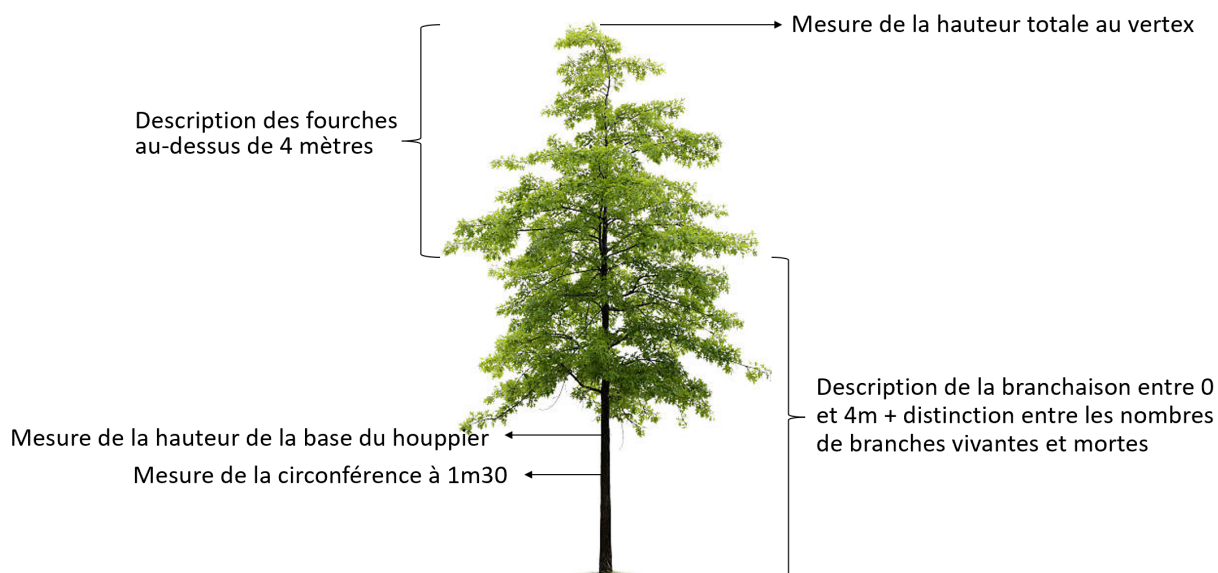


FIGURE 16 – Résumé schématique des mesures réalisées sur les chênes cibles et leurs branches

TABLEAU 4 – Tableau récapitulatif des mesures réalisées à l'échelle des branches : les différents types de mesures sont indiqués en italique en lignes alors que les distinctions de mesures selon la hauteur sont référencées dans les colonnes en gras. Au-delà de quatre mètres, aucune mesure n'a été réalisée mais les fourches ont été comptées.

Hauteur des branches Mesures à l'échelle branches	Entre 0 et 2 mètres	Entre 2 et 4 mètres	Au-delà de 4 mètres
Diamètre à l'insertion (mm)	Mesure de toutes les branches d'un diamètre > ou = à 10 mm au pied à coulisse	Classification des branches au sein de trois catégories : 10-30 mm, 30-50 mm et > 50 mm	Indication du nombre de fourches uniquement
Angle d'insertion (°)	Classification des angles en trois catégories : 0-30°, 30-60° et 60-90°		
Mortalité	Indication du caractère vivant/mort de chaque branche		
Hauteur des branches (m)	Mesure de la hauteur de toutes les branches à 10 cm près		
Orientation des branches	Indication selon huit (sous-)directions cardinales : N, E, S, O, N-E, S-E, N-O, S-O		

3.3.3 A l'échelle des voisins

Pour les arbres voisins à chaque chêne sélectionné et compris dans le rayon de mesure, les informations suivantes ont été relevées :

- l'espèce ;
- la circonférence, mesurée à 1m30 à l'aide d'un mètre ruban classique ;
- l'orientation de l'arbre par rapport au chêne cible, selon huit (sous-)directions cardinales (N, E, S, O, N-E, S-E, N-O, S-O) appréhendées par une boussole comme pour l'orientation des branches ;
- la distance de l'arbre par rapport au chêne cible, déterminée en plaçant la mire sur ce dernier et en tenant le vertex au centre du tronc du voisin considéré, la hauteur de référence pour placer ces deux objets étant d'1m30.

Le rayon de mesure a été choisi empiriquement de sorte à ne considérer que les arbres de l'entourage du chêne cible susceptibles d'impacter sa morphologie. Cet impact est principalement lié à la hauteur des sujets. En effet, pour une distance identique entre l'individu central et un voisin considéré, l'essence la plus haute, à savoir le mélèze, exerce logiquement plus d'impact sur cet individu central qu'un hêtre, dont la hauteur est en moyenne plus faible. La distance de mesure par rapport au chêne central a alors été ajustée suivant l'essence :

- Pour les érables, chênes et hêtres, les individus ont été mesurés dans un rayon de 3,5m ;
- Pour les douglas, les individus ont été mesurés dans un rayon de 4,5m ;
- Pour les mélèzes, les individus ont été mesurés dans un rayon de 5,5m.

Une fiche de terrain complétée est disponible à titre d'exemple dans l'annexe A, dans le but de pouvoir visualiser l'ensemble des données qui ont été collectées et expliquées dans cette section sur la méthodologie mise en place.

Les fiches de terrain comprennent les nombres de branches vivantes et mortes totaux. En effet, ceux-ci ont été déduits des mesures de la branchaison en vue du traitement de données, dans lequel cette information est utilisée. De plus, pour cette même raison, le bloc, le numéro de parcelle et le numéro d'arbre ont été indiqués pour chaque arbre cible.

3.4 Traitement des données

3.4.1 Conception de la base de données

Les fiches de terrain papier se sont remplies au cours des journées de terrain. Toutes les fiches ont donc progressivement été encodées dans un fichier Excel, en vue de constituer une base de données dans Access par la suite. Plusieurs modifications ont alors été apportées aux données brutes.

Premièrement, toutes les catégories de diamètre de branche ont dû être remplacées par un chiffre. Le raisonnement a été de subdiviser les catégories en trois morceaux et d'attribuer le chiffre correspondant au centre de chacun de ces trois intervalles. Par exemple, pour la catégorie 10-30 mm, si le diamètre est plus proche de 10 alors 13,33 est indiqué, s'il est plus proche de 20 alors 20 est indiqué et pour finir, s'il est plus proche de 30 alors 26,66 est indiqué. Ce raisonnement est illustré à la figure 17.

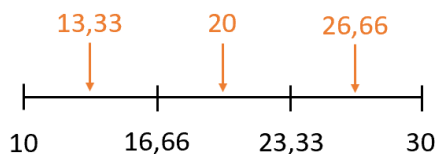


FIGURE 17 – Illustration du raisonnement employé pour donner un chiffre unique aux catégories de branches selon que le diamètre de la branche soit plus proche de la borne inférieure, le milieu ou la borne supérieure de la catégorie ; exemple pour la catégorie 10-30 mm

Deuxièmement, pour les arbres du voisinage qui comportent plus d'un axe principal, ceux-ci ont été différenciés en indiquant les différentes circonférences séparées d'un "+". Cette notation ne pouvant pas non plus être interprétée par la base de données, une moyenne quadratique a été réalisée pour les arbres voisins dont les circonférences sont multiples. Ainsi, ces circonférences ont été agrégées en une section globale (somme de $c^2/4\pi$) et ensuite une circonférence unique a été déduite de cette section.

Troisièmement, comme les catégories d'angle ont été notées par les chiffres 1, 2 et 3, ces chiffres ont été remplacés par la médiane des catégories, à savoir respectivement 15, 45 et 75°.

Pour terminer, toutes les variables dimensionnelles (hauteurs, diamètres et circonférences) ont été converties en mètres afin d'éviter des erreurs liées aux unités dans les calculs ultérieurs.

La base de données comporte finalement quatre tables intitulées arbre, branches, voisins et parcelle. Pour lier ces tables entre elles, c'est le numéro des arbres cibles qui est employé. Les clefs primaires de ces quatre tables sont respectivement le numéro de l'arbre cible, le numéro de branche, le numéro du voisin et le numéro de parcelle.

3.4.2 Choix des indicateurs pour caractériser l'effet du mélange sur l'architecture de l'arbre cible

3.4.2.1 A l'échelle de l'arbre cible

L'indicateur dbh^2h est employé comme proxi du volume $[m^3]$. Il constitue l'unique variable explicative de l'architecture des arbres cibles à l'échelle arbre. En effet, dbh veut dire "diameter breast height", c'est à dire le diamètre à 1m30.

Les indicateurs suivants sont quant à eux utilisés comme variables réponses pour caractériser les propriétés architecturales des chênes cibles :

- le rapport h_{tot}/dbh (hauteur totale $[m]$ /diamètre à 1m30 $[m]$), appelé par simplicité rapport h/d par la suite, pour caractériser l'élancement $[-]$;
- la proportion du houppier vivant, c'est-à-dire la longueur du houppier ($l_{houppier}$) ramenée à la hauteur totale (h_{tot}). Elle se calcule donc comme suit :

$$\frac{l_{houppier}}{h_{tot}} = 1 - \frac{h_{houppier}}{h_{tot}} [-] \quad (1)$$

où $h_{houppier}$ est la hauteur de la base du houppier de l'arbre cible. Cette proportion est multipliée par 100 pour être exprimée en pourcent.

- le nombre de branches vivantes entre 0 et 4m ;
- un indicateur de branchaison défini par la somme des diamètres de chacune des branches par arbre cible au carré multipliés par la racine du cosinus de leur angle, divisée par dbh^2 . L'équation est décrite ci-dessous :

$$\frac{\sum(d^2 \times \sqrt{\cos \theta} \times coeff M/V)}{dbh^2} [-] \quad (2)$$

Un coefficient est donné a priori aux branches mortes ou vivantes, noté $coeff M/V$. En effet, les branches mortes sont moins gênantes, ce qui peut être pris en compte par un facteur de 0,25 ou 0,5 par exemple. Une valeur de 0,3 a été fixée. De plus, la racine du cosinus est appliquée à l'angle (appelé θ , voir point 3.3.2) de sorte à pénaliser sa contribution d'autant plus que la branche est verticale. Il s'agit en effet de l'angle d'insertion des branches par rapport à la verticale. Les résultats de l'équation doivent être comparés avant et après division par dbh^2 pour tester l'effet taille (dimension). Cette équation est en réalité une version plus complète et exacte du rapport entre la somme des diamètres des branches et le diamètre de l'arbre, ce qui donne une idée du caractère dense et grossier des branches par rapport

à la stature de l'arbre.

La forme de l'arbre se qualifie par le rapport h/d et la proportion de houppier vivant.

Divers indicateurs ont également été avancés pour caractériser plus particulièrement les fourches (indicateurs variables réponses) :

- le nombre de fourches total sur l'arbre rapporté à la longueur du houppier vivant. Le nombre de fourches total correspond à la somme du nombre de branches caractérisées par un angle 1 (angle compris entre 0 et 30° par rapport à la verticale) dans les quatre premiers mètres et du nombre de fourches au-delà de quatre mètres. Cet indicateur se note :

$$\frac{\#fourches_{tot}}{l_{houppier}} [m^{-1}] \quad (3)$$

- Le nombre de fourches total peut aussi être ramené à la hauteur totale. Il est alors indiqué par le rapport :

$$\frac{\#fourches_{tot}}{h_{tot}} [m^{-1}] \quad (4)$$

- De façon équivalente, le nombre de fourches peut être ramené à la hauteur des quatre premiers mètres si seules les fourches en deçà de quatre mètres sont comptabilisées. Cet indicateur prend alors la notation qui suit :

$$\frac{\#fourches_{<4m}}{h_{4m}} [m^{-1}] \quad (5)$$

3.4.2.2 À l'échelle des voisins

Les indicateurs à l'échelle des voisins servent uniquement comme variables explicatives. Les indicateurs suivants sont utilisés :

- la surface terrière, modulée selon les différentes tailles de placettes dans lesquelles les essences ont été mesurées. Les sections des tiges des trois essences feuillues (chêne, hêtre, érable) sont donc sommées et ramenées à la surface d'un cercle de rayon de 3,5m, tandis que les surfaces terrières des douglas et des mélèzes tiennent compte des rayons de 4,5 et 5,5 m respectivement. La densité [m^2/ha] exercée sur chacun des arbres cibles est donc calculée selon trois sous-groupes en fonction du rayon de mesure. Il s'agit alors d'une approche basée sur un rayon fixe.
- un indice de compétition, nommé NCI (neighbourhood competition index), permettant d'ajuster le poids de l'arbre voisin en fonction de sa circonférence et de la distance qui le sépare de l'individu cible. Cet indice de compétition est obtenu par l'équation suivante (Canham *et al.*, 2004) :

$$\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^n \lambda_i \frac{(dbh_{ij})^\alpha}{(distance_{ij})^\beta} \quad (6)$$

Le coefficient λ traduit la variabilité du caractère compétitif des différentes essences, ce qui permet de prendre en compte des différences de compétition exercée sur l'arbre cible selon les essences. Le coefficient permet ainsi d'ajuster la somme des sections des arbres voisins suivant l'espèce, ce qui permet de tenir compte du caractère de l'essence face à la lumière. En effet, pour une même densité en surface terrière, les propriétés de l'entourage en termes de tolérance à l'ombrage peuvent influencer l'architecture de l'arbre cible (voir section 2.1.3). C'est pourquoi ce caractère vis-à-vis de la lumière, considéré par l'intermédiaire du coefficient λ , est en fait plus intéressant

dans l'étude de l'impact du voisinage que l'identité de l'essence en elle-même.

La lettre i réfère aux espèces (donc i varie ici entre un et cinq) et j se rapporte aux arbres voisins. α et β donnent la forme des effets du diamètre et de la distance sur la compétition exercée par l'arbre voisin. Ces paramètres sont fixés aux valeurs de 2 et 0,5 respectivement (Canham *et al.*, 2004). Le NCI s'exprime donc en $m^{3/2}$. Contrairement à l'approche précédente qui rend compte de l'effet de la compétition exercée par les voisins au travers de leur surface terrière, cette approche est basée sur la distance effective qui sépare chacun des voisins de l'arbre cible considéré.

3.4.3 Conception du modèle à partir des variables réponses et explicatives

Le modèle utilisé pour caractériser les propriétés architecturales des arbres cibles en fonction de l'effet de la taille et de la compétition exercée par le voisinage prend la forme ci-dessous :

$$y = \alpha + \beta[\text{effet taille}] + \gamma[\text{effet voisinage}] \quad (7)$$

Les variables réponses sont notées par la lettre y . L'effet bloc est considéré comme fixe (un facteur aléatoire nécessite au moins cinq niveaux) et est intégré à l'intercept α . La référence est le site de Gribelle et donc le coefficient du bloc donne toujours une valeur pour Gouverneurs en comparaison de Gribelle. L'indicateur dbh^2h a été choisi pour rendre compte de l'effet taille, supposé univarié.

Pour rappel, les indicateurs présentés à l'échelle de l'arbre cible comme variables réponses du modèle sont :

- le rapport h/d ;
- la proportion du houppier vivant (Eq.(1)) ;
- le nombre de branches vivantes entre 0 et 4m ;
- l'indicateur mettant en relation les caractéristiques de la branchaison avec le diamètre de l'arbre cible, appelé plus simplement indicateur de branchaison par la suite (Eq.(2)) ;
- les trois indicateurs avancés pour qualifier les fourches (Eq.(3) à (5)).

Afin de rendre compte au mieux de l'effet du voisinage sur chacune de ces variables réponses caractérisant les propriétés architecturales des chênes cibles, le modèle décrit à l'équation 7 a été testé sous onze variantes. La première est la plus simple car elle ne tient pas compte de la compétition. L'équation 7 prend alors la forme qui suit :

$$y = \alpha + \beta[dbh^2h] \quad (8)$$

La deuxième version prend compte de la compétition exercée par le voisinage mais pour autant elle ne tient pas compte de la distance qui sépare les voisins de l'arbre cible. C'est alors la surface terrière qui est ici utilisée, BA (basal area), mais sans différenciation de coefficient suivant les essences. Ce modèle s'écrit alors :

$$y = \alpha + \beta[dbh^2h] + \gamma BA_{tot} \quad (9)$$

Le troisième modèle vise ensuite à affiner le précédent en différenciant l'effet compétitif des feuillus de celui des conifères. Cela donne alors :

$$y = \alpha + \beta[dbh^2h] + \gamma_{fe} BA_{fe} + \gamma_{con} BA_{con} \quad (10)$$

Dans la même idée, le quatrième modèle scinde la surface terrière des feuillus pour tenir compte de l'effet de chacune des essences feuillues séparément. Le chêne, le hêtre et l'érable sont notés respectivement 1, 2 et 3, ce qui permet d'écrire le modèle tel que :

$$y = \alpha + \beta[dbh^2h] + \gamma_1BA_1 + \gamma_2BA_2 + \gamma_3BA_3 + \gamma_{con}BA_{con} \quad (11)$$

Comme on s'attend à ce que l'effet du mélèze sur les propriétés architecturales des chênes cibles soit plus élevé au vu de sa vitesse de croissance soutenue et donc de son effet d'abri vertical sur les chênes, la variable BA_{con} est ici scindée pour différencier l'effet du mélèze de celui du douglas. Le douglas et le mélèze sont notés respectivement 4 et 5. Le modèle devient ainsi tel que :

$$y = \alpha + \beta[dbh^2h] + \gamma_{fe}BA_{fe} + \gamma_4BA_4 + \gamma_5BA_5 \quad (12)$$

Le sixième modèle, qui est le dernier à traduire l'effet du voisinage par la surface terrière, comporte plus de paramètres car il sépare la contribution de chacune des cinq essences à la surface terrière totale. Cela permet de tester si la qualité statistique du modèle est meilleure ou pas en scindant la surface terrière totale des feuillus BA_{fe} en BA_1 (chêne), BA_2 (hêtre) et BA_3 (érable) et celle des conifères BA_{con} en BA_4 (douglas) et BA_5 (mélèze).

$$y = \alpha + \beta[dbh^2h] + \gamma_1BA_1 + \gamma_2BA_2 + \gamma_3BA_3 + \gamma_4BA_4 + \gamma_5BA_5 \quad (13)$$

Les cinq modèles suivants suivent le même raisonnement que les cinq modèles précédents mais considèrent cette fois que l'effet de la compétition exercée par le voisinage s'explique par l'indice de compétition décrit à l'équation 6, et non plus par la surface terrière. Ainsi, la plus-value apportée par la comptabilisation de l'effet de la distance peut, s'il y en a une, être évaluée. Ces cinq variantes sont présentées ci-dessous :

$$y = \alpha + \beta[dbh^2h] + \gamma_{tot}NCI_{tot} \quad (14)$$

$$y = \alpha + \beta[dbh^2h] + \gamma_{fe}NCI_{fe} + \gamma_{con}NCI_{con} \quad (15)$$

$$y = \alpha + \beta[dbh^2h] + \gamma_1NCI_1 + \gamma_2NCI_2 + \gamma_3NCI_3 + \gamma_{con}NCI_{con} \quad (16)$$

$$y = \alpha + \beta[dbh^2h] + \gamma_{fe}NCI_{fe} + \gamma_4NCI_4 + \gamma_5NCI_5 \quad (17)$$

$$y = \alpha + \beta[dbh^2h] + \gamma_1NCI_1 + \gamma_2NCI_2 + \gamma_3NCI_3 + \gamma_4NCI_4 + \gamma_5NCI_5 \quad (18)$$

Afin de juger de la nécessité d'intégrer ou non l'effet du bloc et de la taille au modèle, la relation entre la variable réponse et le bloc uniquement a également été ajoutée.

Le tableau 5 résume les différentes variables explicatives considérées pour chacune des variantes du modèle et donne un identifiant à chacune d'elles afin de pouvoir s'y référer par la suite (lm pour linear model).

TABLEAU 5 – *Récapitulatif des diverses variantes considérées pour le modèle et des effets testés pour chacune : BA est la surface terrière (m^2/ha), NCI est l'indice de compétition du voisinage ($m^{3/2}$) défini à l'équation 6 et les chiffres 1, 2, 3, 4 et 5 qualifient, respectivement, le chêne, le hêtre, l'érable, le douglas et le mélèze. L'effet taille est traduit par le produit du diamètre à hauteur de poitrine au carré par la hauteur totale et "tot", "fe" et "con" sont les abréviations de total, essences feuillues et conifères.*

Variante du modèle	Effets testés dans le modèle
Lm_0	bloc[Gouverneurs]
Lm_1	bloc[Gouverneurs] + dbh ² h
Lm_2	bloc[Gouverneurs] + dbh ² h + BA _{tot}
Lm_3	bloc[Gouverneurs] + dbh ² h + BA _{fe} + BA _{con}
Lm_4	bloc[Gouverneurs] + dbh ² h + BA ₁ + BA ₂ + BA ₃ + BA _{con}
Lm_5	bloc[Gouverneurs] + dbh ² h + BA _{fe} + BA ₄ + BA ₅
Lm_6	bloc[Gouverneurs] + dbh ² h + BA ₁ + BA ₂ + BA ₃ + BA ₄ + BA ₅
Lm_7	bloc[Gouverneurs] + dbh ² h + NCI _{tot}
Lm_8	bloc[Gouverneurs] + dbh ² h + NCI _{fe} + NCI _{con}
Lm_9	bloc[Gouverneurs] + dbh ² h + NCI ₁ + NCI ₂ + NCI ₃ + NCI _{con}
Lm_10	bloc[Gouverneurs] + dbh ² h + NCI _{fe} + NCI ₄ + NCI ₅
Lm_11	bloc[Gouverneurs] + dbh ² h + NCI ₁ + NCI ₂ + NCI ₃ + NCI ₄ + NCI ₅

3.4.4 Étapes pour choisir le meilleur modèle : analyses statistiques et visualisations graphiques

Les logiciels R et JMP Pro 16 ont été employés pour réaliser les opérations décrites dans cette section.

Pour commencer, l'ajustement entre chacune des variables réponses et chacune des variables explicatives (dbh²h, BA et NCI) est vérifié de sorte à s'assurer que l'ajustement choisi soit approprié (régression linéaire simple sans transformation de variable par défaut). Seules des transformations sur les variables explicatives ont été testées pour faciliter l'interprétation des résultats et la comparaison entre les différentes relations. Cinq transformations sur les variables explicatives sont ainsi employées : exponentielle ($\exp(x)$), logarithme népérien ($\ln(x)$), $1/x$, x^2 et $x^{1/2}$. Dans le cas où l'une de ces régressions linéaires avec transformation présente un R^2 ajusté plus élevé que celui de la régression linéaire sans transformation, elle est alors substituée à cette dernière, pour autant que la distribution graphique des points adopte une allure qui justifie d'utiliser cette transformation plutôt qu'aucune. En effet, lorsque le R^2 ajusté est plus grand pour l'une des cinq transformations que pour une simple régression linéaire non transformée mais que la différence entre les R^2 ajustés est minime ou que les points sont répartis de façon très hétérogène et/ou avec des valeurs extrêmes, il est préférable de ne faire aucune transformation pour éviter de démultiplier les transformations réalisées sur les différentes variables explicatives.

Une fois cette étape préliminaire achevée, les coefficients pour chacune des douze variantes du modèle ont été analysés afin de juger de la significativité de chaque variable explicative, et ce pour chacune des variables réponses. Le critère BIC a été utilisé pour déterminer le modèle le plus parcimonieux (celui ayant la valeur la plus basse).

Ensuite, les coefficients pour la relation variable réponse - bloc (variante lm_0 du modèle) permettent d'évaluer l'influence ou non du bloc sur chacune des variables réponses qui caractérisent l'architecture des chênes cibles. Cela revient à une ANOVA pour chacune des variables réponses en fonction

du bloc.

Dans le cas où un effet significatif du bloc sur la variable réponse a été identifié, il convient alors de vérifier si celui-ci n'est pas redondant avec l'effet taille, qui traduit souvent déjà l'effet du bloc. En effet, un site plus fertile résulte en une croissance moyenne plus soutenue et donc un dbh^2h plus important. Cela peut être appréhendé de manière graphique en représentant la variable réponse en fonction du dbh^2h et en affichant l'effet bloc. En effet, si l'effet taille explique celui du bloc, on peut idéalement s'attendre à une concentration des points liés à chacun des deux blocs sur une portion différente de la relation entre la variable réponse et dbh^2h . Cela est illustré à la figure 18. Dans ce cas, l'effet taille est conservé tandis que l'effet du bloc peut être retiré.

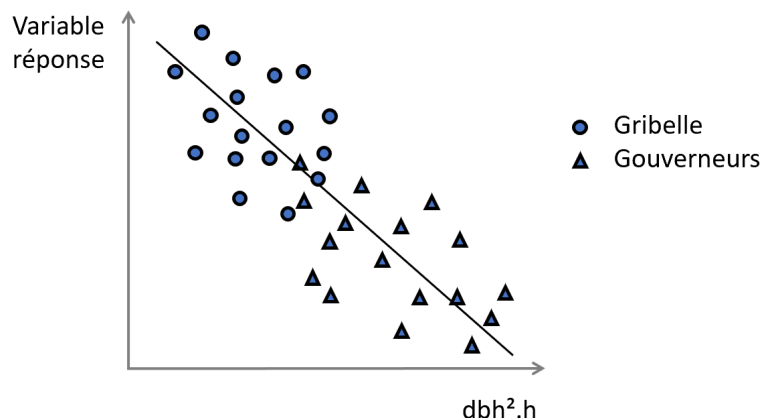


FIGURE 18 – Relation variable réponse - effet taille : dispersion des points idéale lorsque l'effet de la taille est partiellement confondu avec l'effet du bloc. La redondance de l'effet bloc par rapport à celui de la taille se perçoit par la distribution des points le long de la relation ajustant la variable réponse à l'effet de la taille.

Pour terminer, comme certaines des variables explicatives (notamment effets bloc et taille) sont écartées dans les étapes précédentes, une procédure de sélection par la méthode d'analyse statistique pas à pas (sens montant et BIC minimum comme règle d'arrêt) est utilisée afin d'en comparer les résultats avec les choix réalisés. Cette procédure automatique sert ainsi de référence pour déterminer le modèle le plus adéquat pour chacune des variables réponses. Les décisions prises en termes de choix de modèle sont de cette façon alimentées par l'ensemble des étapes décrites dans cette section mais elles sont surtout déterminées par les résultats de la procédure pas à pas.

3.4.5 Conception d'histogrammes empilés pour étudier la contribution des différentes variables explicatives à chacune des variables réponses prédites

Une fois un modèle choisi pour chacune des variables réponses, des histogrammes empilés représentant les variables réponses moyennes prédites en fonction de la composition spécifique sont conçus pour chacune d'elles afin de pouvoir visualiser la contribution des différentes variables explicatives conservées dans chacun des modèles retenus. Les résultats des dix différentes compositions spécifiques peuvent ainsi être comparés entre eux.

Pour concevoir ces histogrammes, en premier lieu, les variables explicatives utilisées sont moyennées par composition spécifique. Ensuite, ces moyennes par composition spécifique sont multipliées avec les coefficients estimés des variables explicatives, pour obtenir la contribution de chacune des variables explicatives à la valeur moyenne prédite de l'indicateur, et ce pour chacun des modèles retenus. Les

contributions obtenues sont donc empilées sur un histogramme où chaque variable explicative porte une couleur qui lui est propre. La somme des contributions de chaque variable explicative doit donc être égale à la moyenne prédite de la variable réponse. L'axe des ordonnées permet de lire ces contributions des différentes variables explicatives, il peut donc comporter une partie en deçà de zéro.

Les valeurs moyennes prédites des indicateurs qualifiant les propriétés architecturales des chênes cibles sont calculées pour chaque composition spécifique afin de les afficher par la suite sur l'axe vertical de droite. Elles sont représentées par un point sur chaque barre, chacune correspondant à une composition spécifique. Pour terminer, une comparaison de moyennes pour chaque variable réponse en fonction de la composition spécifique est réalisée dans JMP Pro afin d'afficher le rapport de connexion de lettres sur les barres de chaque histogramme. Les moyennes sont comparées paire par paire avec un test de Tukey. Deux compositions spécifiques qui présentent une lettre commune ont donc des moyennes prédites de la variable réponse statistiquement équivalentes tandis que si elles présentent des lettres différentes, leurs moyennes prédites sont significativement différentes. Les histogrammes permettent ainsi de visualiser les mélanges qui mènent à minimiser ou maximiser, selon ce qui est souhaité, les valeurs des indicateurs architecturaux.

Le raisonnement suivi pour obtenir les contributions des variables explicatives à l'indicateur prédit est représenté à la figure 19 dans le cas de la conception de l'histogramme empilé du modèle complet (lm_11) pour le nombre de fourches total ramené à la longueur du houppier. Cet histogramme est illustré à la figure 22 de l'annexe F. D'abord, les moyennes des variables explicatives sont calculées pour chacune des compositions spécifiques (1). Ensuite, elles sont multipliées aux coefficients estimés du modèle complet (2). Les contributions de chacune des variables explicatives à la valeur moyenne prédite de l'indicateur pour chaque composition spécifique sont alors obtenues (1×2) et il ne reste qu'à représenter l'histogramme empilé (dans Excel), puis à y afficher l'axe de droite avec les valeurs moyennes prédites de l'indicateur et pour terminer, y afficher le rapport de connexion de lettres.

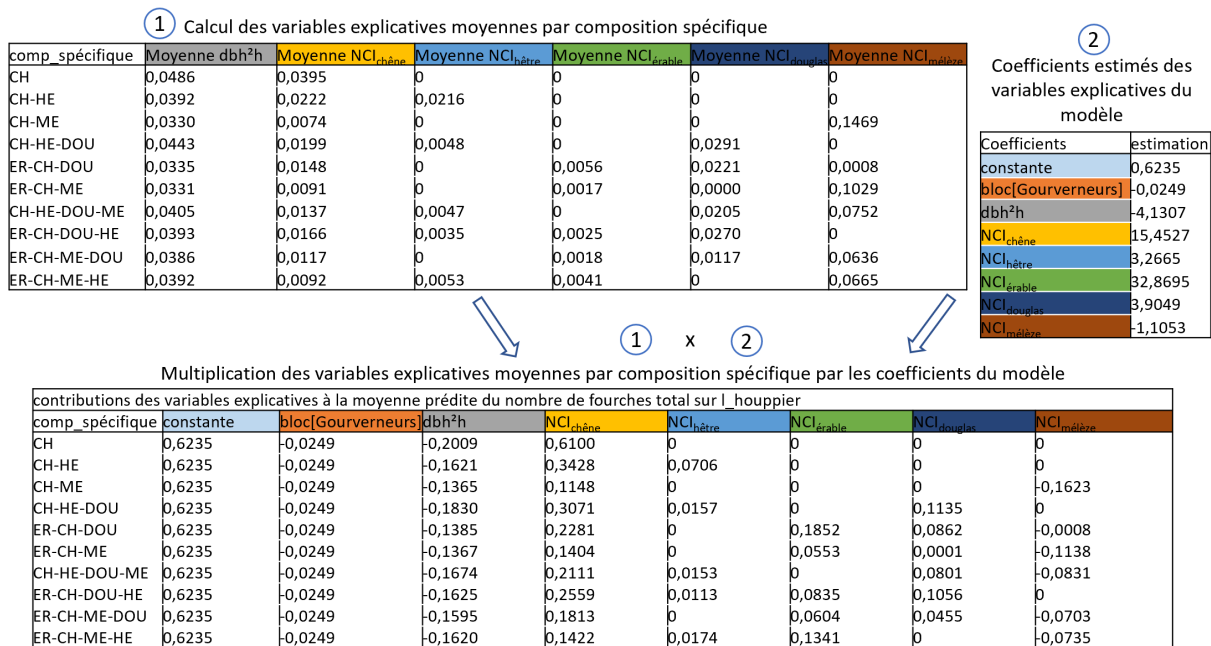


FIGURE 19 – Calcul des contributions des variables explicatives aux valeurs moyennes prédites des variables réponses dans chacune des dix compositions spécifiques. Ici, le modèle complet pour l'indicateur nombre de fourches total/l_{houppier} est utilisé comme exemple. Une couleur a été attribuée à chacune des variables explicatives (y compris la constante de la régression linéaire).

4 Résultats

4.1 Contexte

Comme mentionné dans l'introduction, ce mémoire vise à identifier si certains mélanges peuvent bénéficier aux propriétés architecturales des jeunes chênes, et ce de manière significative. Plus largement, cet objectif s'inscrit dans la recherche de recommandations sylvicoles quant à la manière de concevoir les plantations mélangées. En effet, comme l'architecture des essences est plastique face aux conditions environnementales, en particulier aux interactions inter- et intraspécifiques, elle dépend de la composition spécifique du mélange (voir point 2.1.3). C'est pourquoi cette section résultats se centre et se structure autour des indicateurs des propriétés architecturales des chênes cibles développés, de sorte à ce qu'à l'issue de cette section, les compositions spécifiques étudiées sur le site de FORBIO Gedinne puissent être liées à ces indicateurs architecturaux. La conception de régressions linéaires permet d'étudier ces liens. Le raisonnement suivi pour choisir une régression linéaire, qui sert de modèle pour expliquer chacune des variables réponses en fonction de l'effet du bloc, de la taille des chênes cibles et de la composition spécifique, est donc détaillé pour parvenir à mettre en évidence les effets bénéfiques de certains mélanges sur les propriétés architecturales des chênes cibles.

4.2 Résultats préliminaires

4.2.1 Présentation des valeurs moyennes et des écart-types : dimensions par essence, variables explicatives et variables réponses

Les tableaux 6 et 7 montrent les dimensions moyennes des chênes cibles et des arbres de leur voisinage. La hauteur moyenne est donnée pour les chênes cibles uniquement étant donné que les hauteurs des arbres voisins n'ont pas été mesurées. Le mélèze présente en moyenne le diamètre le plus important tandis que l'érable présente celui le plus faible, comme attendu. Les chênes et les hêtres ont un diamètre moyen similaire et sont plus gros que les érables mais moins gros que les douglas, eux-mêmes moins gros que les mélèzes.

Les mesures de diamètre sont les plus variables pour l'érable et les plus constantes pour le mélèze. En effet, l'écart-type correspond à environ 67% de la valeur moyenne des diamètres pour l'érable tandis qu'il équivaut à environ 32% de la valeur moyenne des diamètres pour le mélèze.

TABLEAU 6 – *Diamètre à hauteur de poitrine et hauteur totale des 106 chênes cibles : moyenne et écart-type*

	Dimensions des chênes cibles	
	Diamètre [cm]	Hauteur totale [m]
Moyenne	7,1	6,6
Ecart-type	2,1	1,2

TABLEAU 7 – *Diamètre à hauteur de poitrine des cinq essences, mesuré sur les arbres du voisinage : moyenne et écart-type*

	Diamètres des voisins [cm]				
	Chêne	Hêtre	Erable	Mélèze	Douglas
Moyenne	5,2	5,4	3,6	13,0	7,9
Ecart-type	2,6	2,4	2,4	4,2	3,4

Les tableaux 8 et 9 donnent les valeurs moyennes des variables explicatives et réponses, respecti-

vement. Ces valeurs serviront à interpréter les résultats dans la discussion. Les indices de compétition de chacune des essences sont moyennés uniquement sur les compositions spécifiques dans lesquelles les essences sont présentes, pour pouvoir comparer ces valeurs entre elles. Comme pour les diamètres, l'indice de compétition du mélèze présente la valeur moyenne la plus importante parmi les cinq essences, ainsi que l'écart-type le plus faible.

TABLEAU 8 – Variables explicatives : moyenne et écart-type

	Variables explicatives							
	hd ² [m ³]	Surface terrière totale [m ² /ha]	Indice de compétition du voisinage total [m ^{3/2}]	NCI _{chêne} [m ^{3/2}]	NCI _{hêtre} [m ^{3/2}]	NCI _{érable} [m ^{3/2}]	NCI _{douglas} [m ^{3/2}]	NCI _{mélèze} [m ^{3/2}]
Moyenne	0,0389	16,6	0,0784	0,0169	0,0090	0,0037	0,0230	0,0941
Ecart-type	0,0277	6,9	0,0479	0,0129	0,0086	0,0044	0,0176	0,0506

La comparaison des valeurs observées et prédites des variables réponses par les modèles au tableau 9 montre qu'à part pour le facteur d'élancement, les moyennes observées et prédites des variables sont égales. En ce qui concerne les écart-types, la gamme de variabilité des valeurs prédites est largement réduite par rapport à celle des valeurs observées, et ce pour les sept variables réponses. La gamme de variabilité des valeurs moyennes observées varie en effet entre 15% et 79% tandis que celle des valeurs moyennes prédites varie entre 11% et 32%. L'écart-type de la proportion du houppier vivant est donc le plus faible proportionnellement à sa valeur moyenne, à la fois pour les valeurs observée et prédite. L'écart-type du nombre de fourches en deçà de quatre mètres, ramené à une hauteur de quatre mètres, est quant à lui le plus élevé par rapport à sa valeur moyenne observée. Pour la valeur moyenne prédite, c'est cependant le nombre de fourches total, ramené à la longueur du houppier vivant, qui présente l'écart-type le plus élevé par rapport à sa valeur moyenne.

TABLEAU 9 – Variables réponses : moyenne et écart-type pour les valeurs observées et prédites par chacun des modèles choisis pour expliquer chacune des variables réponses

	Variables réponses						
	h/d [-]	Indicateur branchaison (Eq. (2)) [-]	Proportion du houppier vivant (Eq. (1)) (%)	Nombre de branches vivantes entre 0 et 4m	$\frac{\# \text{fourches}_{tot}}{l_{houppier}}$ (Eq. (3)) [m ⁻¹]	$\frac{\# \text{fourches}_{tot}}{h_{tot}}$ (Eq. (4)) [m ⁻¹]	$\frac{\# \text{fourches}_{<4m}}{h_{4m}}$ (Eq. (5)) [m ⁻¹]
	Valeurs observées						
Moyenne	97,3	0,7906	71,7	12	0,78	0,54	0,47
Ecart-type	22,4	0,3667	11,1	6	0,48	0,31	0,37
	Valeurs prédites						
	Valeurs observées						
	Valeurs prédites						
Moyenne	101,7	0,7906	71,7	12	0,78	0,54	0,47
Ecart-type	20,5	0,2182	7,7	3	0,25	0,13	0,14

4.2.2 Effet du bloc sur les variables explicatives taille, surface terrière et indice de compétition du voisinage

La réalisation d'une ANOVA à un facteur testant l'effet du bloc sur la taille (hd²) dans JMP Pro confirme (3.4.4) que le site de Gouverneurs présente une fertilité plus grande que celui de Gribelle. Une P valeur inférieure à 0,0001 est obtenue à l'issue d'un test de Student. La taille moyenne des chênes cibles à Gouverneurs est de 0,0508 m³ tandis que celle à Gribelle est de 0,0265 m³.

Les tests de Student des ANOVA testant l'effet du bloc sur la surface terrière totale et l'indice de compétition total montrent également que les valeurs moyennes sont significativement différentes

entre les deux blocs (P valeur de 0,0001 et 0,0015 respectivement). Les valeurs moyennes de la surface terrière totale (BA_{tot}) et l'indice de compétition total (NCI_{tot}) valent $19,8 \text{ m}^2/\text{ha}$ et $0,0917 \text{ m}^{3/2}$ à Gouverneurs tandis qu'elles valent $13,3 \text{ m}^2/\text{ha}$ et $0,0645 \text{ m}^{3/2}$ à Gribelle. Les trois ANOVA, avec les tests de Student, peuvent être consultées à l'annexe D.

4.2.3 Effet de la composition spécifique sur les variables explicatives taille, surface terrière et indice de compétition du voisinage

En réalisant une ANOVA à un facteur testant l'effet la composition spécifique sur la taille (hd^2) dans JMP Pro, une P valeur (test de Fisher-Snedecor pour l'analyse de la variance) de 0,9487 est obtenue. La composition spécifique du mélange n'a donc pas d'influence sur la taille des chênes cibles. Par contre, les ANOVA à un facteur testant l'effet de la composition spécifique sur BA_{tot} et NCI_{tot} donnent des P valeurs inférieures à 0,0001. La composition spécifique du mélange impacte donc la compétition exercée par le voisinage des chênes cibles sur eux.

Les figures 20 et 21 représentent, sous forme de boîtes à moustaches, la surface terrière totale en fonction de la composition spécifique et l'indice de compétition total en fonction de la composition spécifique, respectivement, afin de pouvoir comparer les moyennes entre les différentes compositions spécifiques. Ces moyennes ont été comparées par paires grâce à un test de Tukey et les rapports de connexion de lettres ont été affichés sur les figures.

Pour la surface terrière, les mélanges chêne-mélèze et chêne-hêtre-douglas-mélèze présentent une surface terrière moyenne significativement plus élevée que dans la monoculture de chênes et les mélanges chêne-hêtre, chêne-hêtre-douglas, érable-chêne-douglas et érable-chêne-douglas-hêtre. Autrement dit, les mélanges chêne-mélèze et chêne-hêtre-douglas-mélèze présentent une surface terrière moyenne significativement plus grande que tous les mélanges qui ne contiennent pas de mélèze.

Pour le NCI_{tot} , les mélanges chêne-mélèze, érable-chêne-mélèze et chêne-hêtre-douglas-mélèze affichent un indice de compétition total significativement supérieur à celui de la monoculture de chênes et des mélanges chêne-hêtre, chêne-hêtre-douglas, érable-chêne-douglas et érable-chêne-douglas-hêtre. Comme pour la surface terrière totale, ces cinq compositions spécifiques qui ne comportent pas de mélèze montrent un indice de compétition total significativement inférieur (aux mélanges CH-ME, ER-CH-ME et CH-HE-DOU-ME).

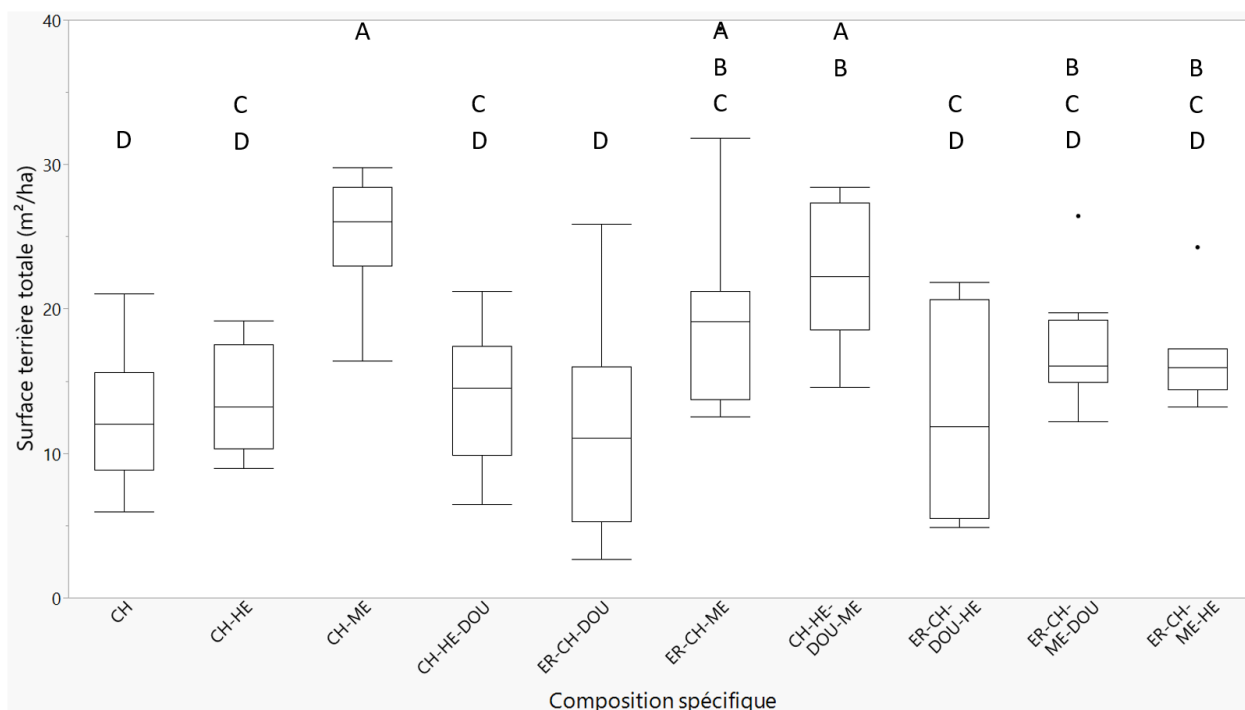


FIGURE 20 – Boîte à moustaches de la surface terrière totale (m^2/ha) selon la composition spécifique. Les lettres permettent de comparer les moyennes pour chaque composition spécifique : des compositions spécifiques ne présentant pas la même lettre sont en moyenne significativement différentes. Les mélanges chêne-mélèze et chêne-hêtre-douglas-mélèze présentent une surface terrière totale moyenne significativement plus grande à celle des cinq compositions spécifiques qui ne contiennent pas de mélèze.

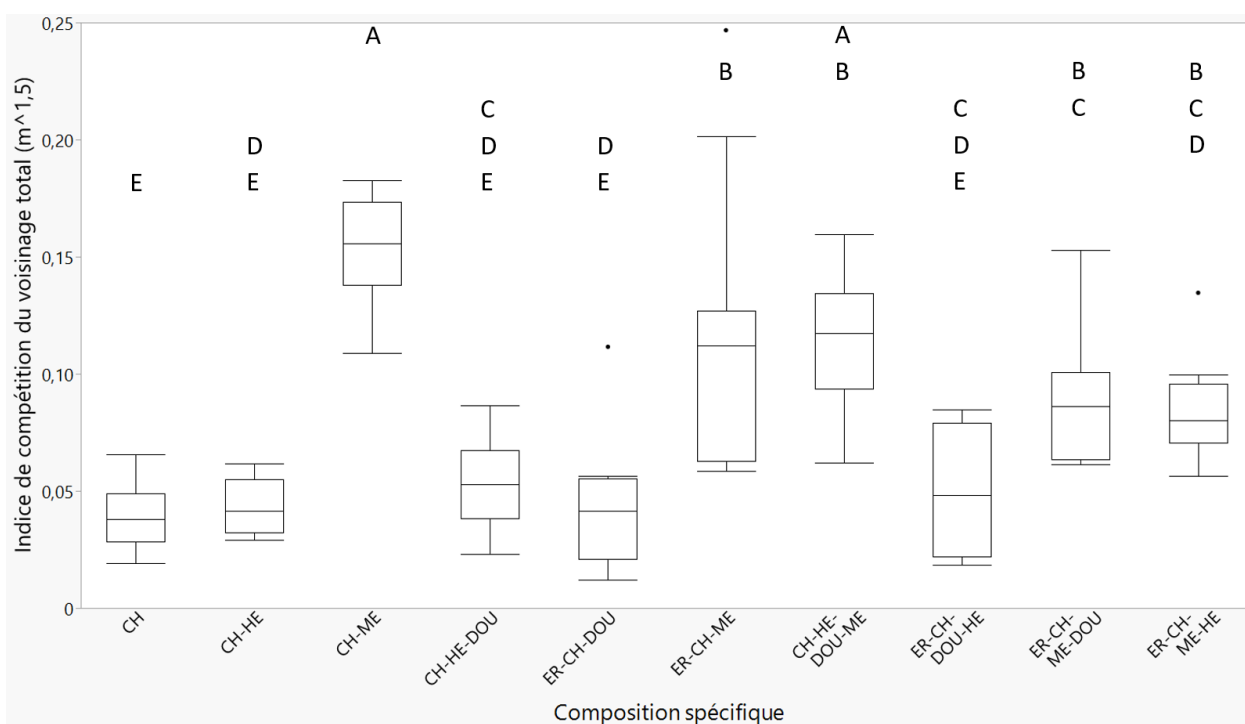


FIGURE 21 – Boîte à moustaches de l'indice de compétition du voisinage total ($m^3/2$) selon la composition spécifique. Les lettres permettent de comparer les moyennes pour chaque composition spécifique : des compositions spécifiques ne présentant pas la même lettre sont en moyenne significativement différentes. Les mélanges chêne-mélèze, érable-chêne-mélèze et chêne-hêtre-douglas-mélèze présentent un indice de compétition total moyen significativement plus grand à celui des cinq compositions spécifiques qui ne contiennent pas de mélèze.

4.3 Choix des modèles pour expliquer les variables réponses

4.3.1 Facteur d'élancement

4.3.1.1 Ajustement de h/d aux variables explicatives

Pour le rapport h/d , une transformation logarithme népérien a été appliquée sur la taille (hd^2), tandis qu'une régression linéaire simple sans transformation est conservée pour la surface terrière et l'indice de compétition du voisinage.

Les formes que prend l'allure de la relation entre h/d et hd^2 , BA_{tot} et NCI_{tot} respectivement sont présentées à la figure 22 tandis que les coefficients de détermination ajustés pour chacune des cinq transformations appliquées sur les variables explicatives sont donnés à l'annexe B. Comme la visualisation graphique montre une dispersion diffuse des points pour la surface terrière et l'indice de compétition, cela confirme qu'il n'y a pas de raison de substituer l'ajustement linéaire par défaut par un autre pour ces variables.

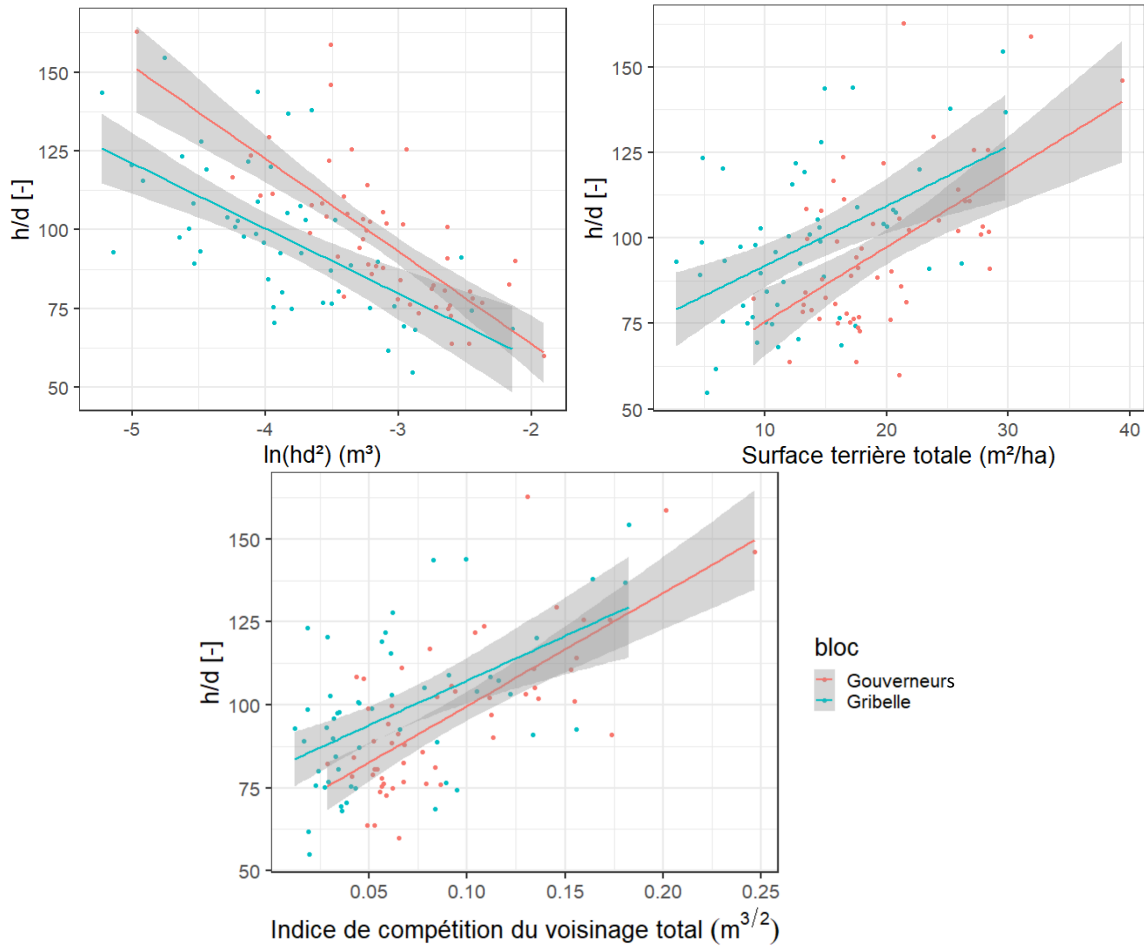


FIGURE 22 – Ajustement du rapport h/d en fonction de la taille, la surface terrière totale et l'indice de compétition total respectivement

4.3.1.2 Effets du bloc et de la taille et analyse des statistiques de qualité de l'ajustement par les différentes variantes du modèle

En comparant les modèles lm_0 (ne considère que l'effet bloc) et lm_1 (considère l'effet bloc et l'effet taille), on voit que l'effet du bloc n'est pas significatif considéré seul (P valeur = 0,8378) mais

en ajoutant l'effet de la taille par contre, les deux effets présentent une P valeur inférieure à 0,0001.

Le meilleur modèle, au regard des BIC, est le lm_7 (bloc + $\ln(hd^2)$ + NCI_{tot}). Pour ce modèle, les effets du bloc et de la taille sont significatifs. Ces variables explicatives sont alors conservées. Les valeurs des statistiques de qualité et des estimations des coefficients sont consultables à l'annexe C pour toutes les variables réponses.

Graphiquement, l'effet du bloc ne semble pas lié à l'effet de la taille (figure 22) car les points expérimentaux liés à Gouverneurs se situent distinctement plus hauts que ceux liés à Gribelle.

4.3.1.3 Choix du modèle le plus adéquat

La procédure de sélection pas à pas inclut le bloc et le $\ln(hd^2)$ au modèle (voir annexe E). Elle sélectionne également l'indice de compétition total et celui du mélèze pour expliquer l'effet du voisinage. Cela donne alors un modèle qui considère les effets suivants : bloc + $\ln(hd^2)$ + NCI_5 + NCI_{tot} .

Cependant, considérer l'indice de compétition total en plus de celui du mélèze semble peu pertinent car cela serait redondant. Afin de trouver un compromis entre le modèle lm_7 , qui présente le BIC le plus faible mais ne différencie pas l'effet des différentes essences, et le modèle donné par la procédure de sélection, c'est le modèle lm_10 qui est choisi, car il permet de mettre en évidence l'effet du mélèze tout en considérant l'information de la totalité des essences.

Le tableau 10 résume les statistiques de qualité de l'ajustement ainsi que les coefficients des variables explicatives pour, respectivement, le modèle lm_7 , le modèle sélectionné par la procédure d'analyse statistique pas à pas et le modèle finalement choisi, lm_10 .

TABLEAU 10 – Récapitulatif des statistiques de qualité de l'ajustement pour le rapport h/d , ainsi que des estimations des coefficients et des P valeurs. Le premier modèle est celui qui présente le BIC le plus faible parmi les variantes testées (lm_7), le deuxième est celui retenu par la procédure de sélection et le troisième est le modèle finalement déterminé comme le plus adéquat pour expliquer le facteur d'élancement h/d des chênes cibles (lm_10). Les valeurs en orange permettent de repérer les variables explicatives dont l'effet est significatif (seuil de significativité à 0,05).

Modèle	Effets considérés	R ² ajusté	AICc	BIC	Coefficients	Estimations	P valeurs
Modèle au BIC le plus faible (lm_7)	bloc + $\ln(hd^2)$ + NCI_{tot}	0,776	808,13	820,84	constante bloc[Gouverneurs] $\ln(hd^2)$ NCI_{tot}	-2,50 4,10 -22,33 276,77	0,6768 0,0015 <,0001 <,0001
Modèle de la procédure de sélection	bloc + $\ln(hd^2)$ + $NCI_{mélèze}$ + NCI_{tot}	0,777	808,87	824,00	constante bloc[Gouverneurs] $\ln(hd^2)$ $NCI_{mélèze}$ NCI_{tot}	1,97 4,91 -22,07 71,36 190,14	0,7795 0,0008 <,0001 0,2321 0,0134
Modèle choisi (lm_10)	bloc + $\ln(hd^2)$ + NCI_{dec} + $NCI_{douglas}$ + $NCI_{mélèze}$	0,778	809,56	827,06	constante bloc[Gouverneurs] $\ln(hd^2)$ NCI_{dec} $NCI_{douglas}$ $NCI_{mélèze}$	-2,20 4,52 -22,52 290,52 166,47 274,77	0,7777 0,0025 <,0001 0,0101 0,0347 <,0001

L'analyse des P valeurs permet alors de remarquer que l'indice de compétition du mélèze pour le

modèle fourni par la procédure de sélection n'a pas d'effet significatif (P valeur de 0,2321). La variante lm_10 du modèle permet donc de différencier l'effet du mélèze de façon à rendre l'ensemble des effets du modèle significatifs tout en ayant du sens du point de vue de la composition spécifique (pas de redondance dans les effets des différentes essences). Cette variante présente ainsi une vraisemblance statistique moindre (BIC plus élevé) que celle lm_7 mais au profit d'une meilleure capacité informative sur l'effet de la composition spécifique du voisinage.

Les estimations des coefficients de la variante lm_10 permettent d'étudier le sens des effets des différentes variables explicatives sur le facteur d'élancement. Comme l'estimation du coefficient du bloc porte un signe positif, cela signifie que les chênes cibles de Gouverneurs sont plus élancés que ceux de Gribelle. La taille affecte quant à elle négativement le facteur d'élancement donc au plus les chênes cibles sont volumineux, au plus le rapport h/d tend à diminuer car le diamètre à hauteur de poitrine augmente proportionnellement plus que la hauteur totale.

Le modèle retenu ne permet pas d'identifier l'effet spécifique des trois essences feuillues mais montre quand-même que l'intensification de la compétition exercée par les feuillus sur les chênes cibles accroît le facteur d'élancement. La compétition exercée par le douglas et le mélèze résulte de même en une stature plus élancée. Ces tendances se vérifient visuellement à la figure 22.

L'histogramme empilé à la figure 23 illustre ces effets pour chacune des variables explicatives conservées dans le modèle final. Cet histogramme permet d'étudier la contribution des différentes variables explicatives à la valeur prédite du facteur d'élancement moyen (voir explications point 3.4.5). Comme pour les boîtes à moustaches aux figures 20 et 21, le rapport de connexion de lettres a été affiché afin de pouvoir identifier les différences entre les facteurs d'élancement moyens prédits pour chaque composition spécifique.

On remarque ainsi que la présence du mélèze tend à augmenter le facteur d'élancement des chênes cibles. Cependant, cette présence n'engendre pas systématiquement de différence significative par rapport aux compositions spécifiques qui ne contiennent pas de mélèze. La compétition exercée par le mélèze est la deuxième variable explicative contribuant le plus à la moyenne prédite, après la taille. Ces contributions importantes se remarquent aussi de par l'analyse des corrélations issues de l'analyse en composantes principales du jeu de données (annexe G). La corrélation entre le facteur d'élancement et l'indice de compétition du mélèze y vaut en effet 0,64 tandis que celle entre le facteur d'élancement et le logarithme népérien de la taille y est de -0,6.

Le coefficient estimé du NCI du mélèze est en fait presque aussi grand que celui des essences feuillues réunies, et il est plus grand que celui du douglas (tableau 10). De plus, non seulement le coefficient du NCI du mélèze est grand mais la valeur moyenne du NCI du mélèze est aussi la plus grande parmi les NCI des cinq essences (voir tableau 8), expliquant sa contribution importante à la valeur moyenne prédite du facteur h/d .

Ceci dit, contrairement à la taille qui présente une large contribution à la moyenne dans chacune des compositions spécifiques mais ne paraît pas expliquer les différences entre elles, ce qui se confirme par l'ANOVA testant l'effet de la composition spécifique sur la taille à la section 4.2.2, la compétition exercée par le mélèze a une contribution moindre mais semble largement expliquer les différences significatives de valeurs du rapport h/d prédit entre les compositions.

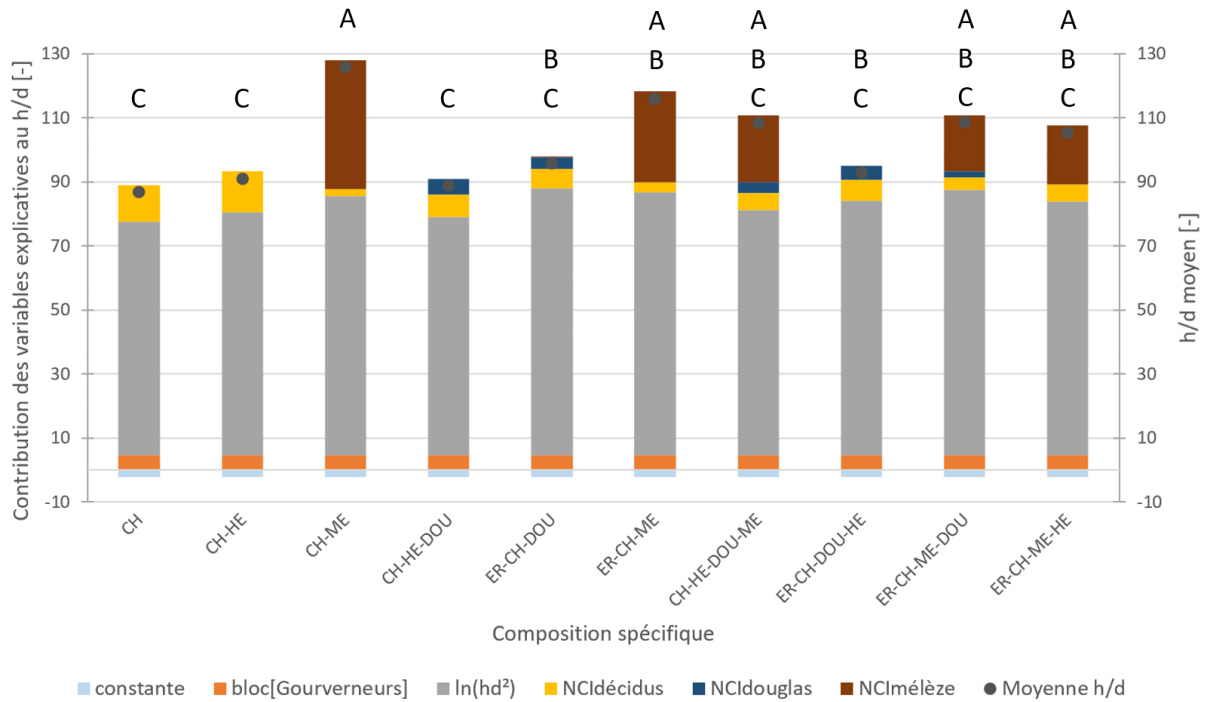


FIGURE 23 – Contribution des variables explicatives au rapport h/d [-] (axe de gauche) selon la composition spécifique pour le modèle choisi. La moyenne prédite du h/d selon ce modèle est affichée sur l'axe de droite. Les compositions spécifiques qui portent la même lettre présentent des valeurs prédites du facteur d'élancement moyen non significativement différentes.

4.3.2 Indicateur de branchaison

4.3.2.1 Ajustement de l'indicateur de branchaison aux variables explicatives

Comme pour le rapport h/d , seule la taille a subi une transformation. Il s'agit également d'une transformation logarithme népérien (voir les R^2 ajustés pour les ajustements de l'indicateur en fonction de hd^2 , BA_{tot} et NCI_{tot} à l'annexe B).

Les ajustements de l'indicateur de branchaison (équation 2 pour rappel) en fonction de hd^2 , BA_{tot} et NCI_{tot} sont représentés à la figure 24. Remplacer la régression linéaire simple non transformée par un autre ajustement ne semble visuellement pas très pertinent pour la surface terrière et l'indice de compétition car cela risquerait de donner trop de poids à quelques points extrêmes dont la valeur pourrait simplement être due au hasard. Cela soutient le choix, basé sur les comparaisons des R^2 ajustés, de conserver des régressions linéaires sans transformation pour ces deux variables explicatives.

4.3.2.2 Effets du bloc et de la taille et analyse des statistiques de qualité de l'ajustement par les différentes variantes du modèle

La variante lm_0 de l'indicateur pénalisant la branchaison, ramené au diamètre à hauteur de poitrine au carré, présente une P valeur inférieure à 0,0001 pour le bloc. En ajoutant l'effet de la taille au modèle (lm_1), l'effet du bloc reste significatif (P valeur de 0,0011) et celui de la taille l'est également (P valeur de 0,0039). Ces variantes lm_0 et lm_1 du modèle peuvent être consultées, comme pour la variable réponse précédente, à l'annexe C (tableau 3).

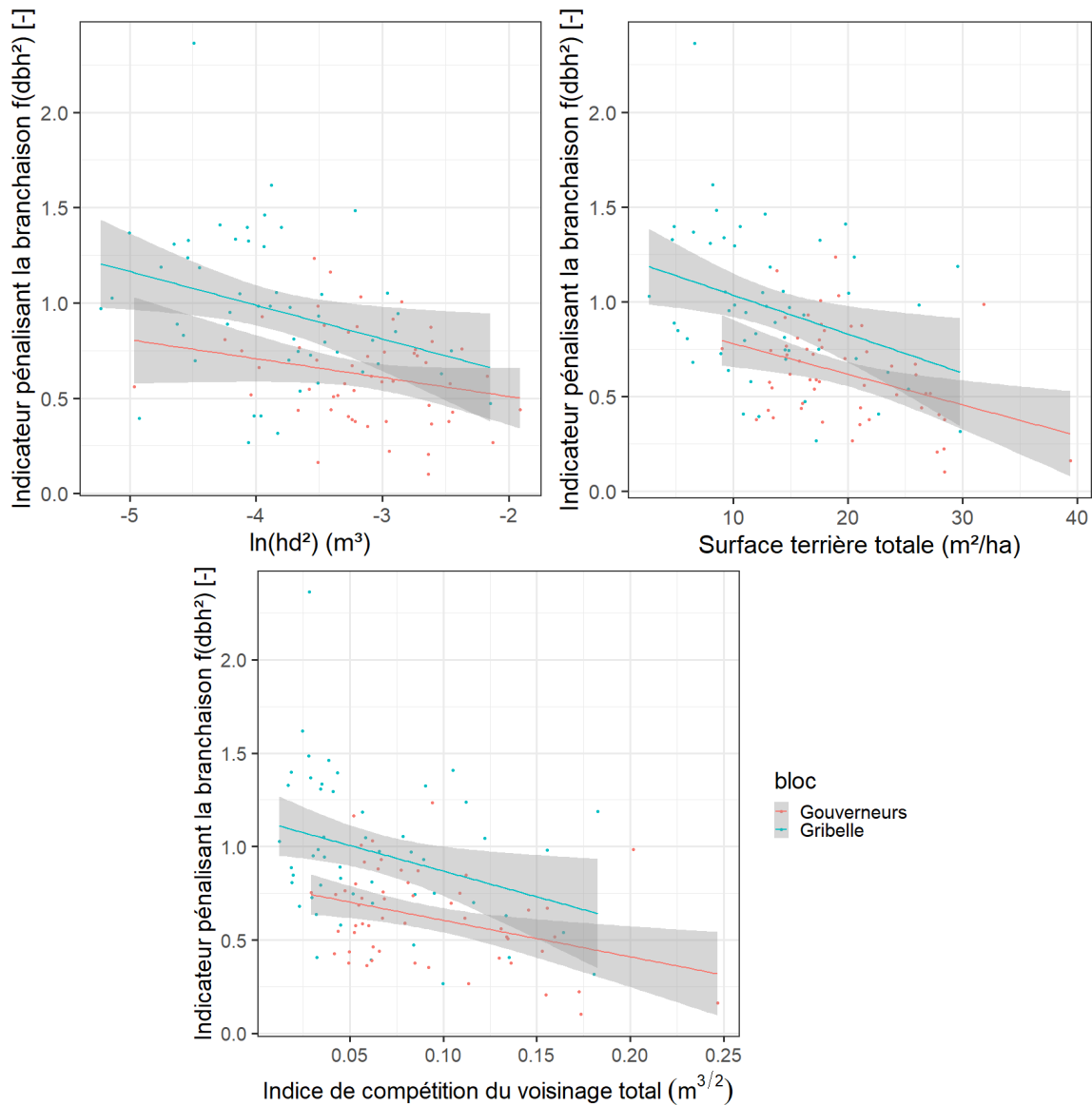


FIGURE 24 – Ajustement de l'indicateur pénalisant la branchaison, ramené au diamètre à hauteur de poitrine au carré, en fonction de la taille, la surface terrière totale et l'indice de compétition total respectivement

La variante lm_7 ($bloc + \ln(hd^2) + NCI_{tot}$) présente à nouveau le BIC le plus faible. L'effet du bloc y est significatif (P valeur de 0,0285) et celui de la taille aussi (P valeur de 0,0005), tout comme pour la variante lm_1 . L'augmentation de la P valeur du bloc lorsque l'effet de la taille est ajouté au modèle suggère toutefois que l'effet du bloc puisse être confondu partiellement avec celui de la taille.

Par ailleurs, la distribution des points de la relation indicateur branchaison - $\ln(hd^2)$, présentée à la figure 24, laisse penser, tout comme l'analyse des estimations des coefficients pour lm_7 , que l'effet taille est lié à celui du bloc. En effet, les points liés à Gouverneurs se concentrent sur la droite de la régression tandis que ceux liés à Gribelle se concentrent sur sa gauche (voir explication point 3.4.4 et figure 18 matériel et méthodes). De plus, les intervalles de confiance des deux blocs se chevauchent.

4.3.2.3 Choix du modèle le plus adéquat

La procédure de sélection pas à pas confirme que l'effet du bloc est expliqué par celui de la taille en incluant uniquement le $\ln(hd^2)$ (voir annexe E). Pour expliquer l'effet de la compétition exercée par

le voisinage, c'est la surface terrière totale qui est choisie, ce qui donne un modèle prenant en compte les effets suivants : $\ln(hd^2) + BA_{tot}$.

Cependant, comme les BIC sont globalement plus faibles pour les variantes comprenant les NCI que les BA (voir annexe C), les modèles qui expliquent l'effet de la compétition par l'indice NCI sont préférentiellement choisis. Le modèle finalement retenu est donc un compromis entre la variante lm_7 et le modèle donné par la procédure pas à pas, c'est-à-dire un modèle qui inclut seulement l'effet de la taille et explique l'effet du voisinage par l'indice de compétition total. Ici, on ne met pas en évidence l'effet d'une essence en particulier par souci de cohérence avec la procédure de sélection, et avec le raisonnement suivi pour les autres variables réponses par la même occasion.

Le tableau 11 résume les statistiques de qualité de l'ajustement ainsi que les coefficients des variables explicatives pour, respectivement, le modèle lm_7, le modèle sélectionné par la procédure d'analyse statistique pas à pas et le modèle finalement choisi.

TABLEAU 11 – *Récapitulatif des statistiques de qualité de l'ajustement pour l'indicateur pénalisant la branchaison $f(dbh^2)$, ainsi que des estimations des coefficients et des P valeurs. Le premier modèle est celui qui présente le BIC le plus faible parmi les variantes testées (lm_7), le deuxième est celui retenu par la procédure de sélection et le troisième est le modèle finalement déterminé comme le plus adéquat (voir équation 2). Les valeurs en orange permettent de repérer les variables explicatives dont l'effet est significatif (seuil de significativité à 0,05).*

Modèle	Effets considérés	R ² ajusté	AICc	BIC	Coefficients	Estimations	P valeurs
Modèle au BIC le plus faible (lm_7)	bloc + $\ln(hd^2)$ + NCI_{tot}	0,366	46,40	59,12	constante bloc[Gouverneurs] $\ln(hd^2)$ NCI_{tot}	0,42 -0,08 -0,16 -2,55	0,0116 0,0285 0,0005 <,0001
Modèle de la procédure de sélection	$\ln(hd^2)$ + BA_{tot}	0,355	46,94	57,20	constante $\ln(hd^2)$ BA_{tot}	0,52 -0,18 -0,02	0,0033 <,0001 <,0001
Modèle choisi	$\ln(hd^2)$ + NCI_{tot}	0,341	49,21	59,47	constante $\ln(hd^2)$ NCI_{tot}	0,27 -0,22 -2,96	0,0785 <,0001 <,0001

Le critère BIC du lm_7 montre une valeur assez similaire à celle du modèle retenu, ce qui confirme à nouveau que l'effet du bloc ne doit pas être intégré au modèle. Par ailleurs, on remarque que remplacer BA par NCI amène à une légère baisse de la qualité statistique du modèle mais cela se fait au profit d'une meilleure adéquation aux résultats des différentes variantes du modèle testées, pour lesquelles utiliser le NCI plutôt que le BA donne des BIC plus faibles (voir tableau 3 annexe C). Pour terminer, au niveau des P valeurs des variables explicatives, elles présentent une valeur significative pour chacun des trois modèles.

En ce qui concerne le sens des effets, la taille et l'indice de compétition total présentent une relation inversement proportionnelle à l'indicateur de branchaison. En effet, au plus la taille est importante, au plus l'indicateur pénalisant la branchaison diminue. Cela signifie que le volume des chênes cibles bénéficie aux propriétés de leur branchaison. L'estimation du coefficient du NCI_{tot} est négative également, et donc au plus la compétition s'intensifie, au plus les propriétés de la branchaison des chênes cibles sont favorables à la qualité du bois (branches plus horizontales, moins épaisses et/ou moins de branches vivantes). Ces tendances se vérifient visuellement à la figure 24.

L'histogramme empilé est présenté à la figure 25 et permet d'illustrer ces effets de la taille et de l'indice de compétition du voisinage total sur l'indicateur de branchaison. Les compositions spécifiques de lettre A exclusivement sont les mélanges chêne-hêtre, érable-chêne-douglas et érable-chêne-douglas-hêtre. Dans les modalités de lettre B exclusivement, seul figure le mélange chêne-mélèze. Ces trois compositions de lettre A présentent donc des valeurs moyennes significativement plus élevées que la composition chêne-mélèze. Par comparaison avec l'histogramme empilé du modèle le plus complet (figure 19 de l'annexe F), lm_11 (tableau 3 de l'annexe C), on remarque qu'au sein des cinq essences, c'est d'abord la compétition exercée par le mélèze qui contribue le plus au NCI_{tot} , puis celle exercée par le chêne. En fait, l'analyse en composantes principales du jeu de données fait apparaître une corrélation de 0,93 entre NCI_{tot} et $NCI_{mélèze}$ (annexe G).

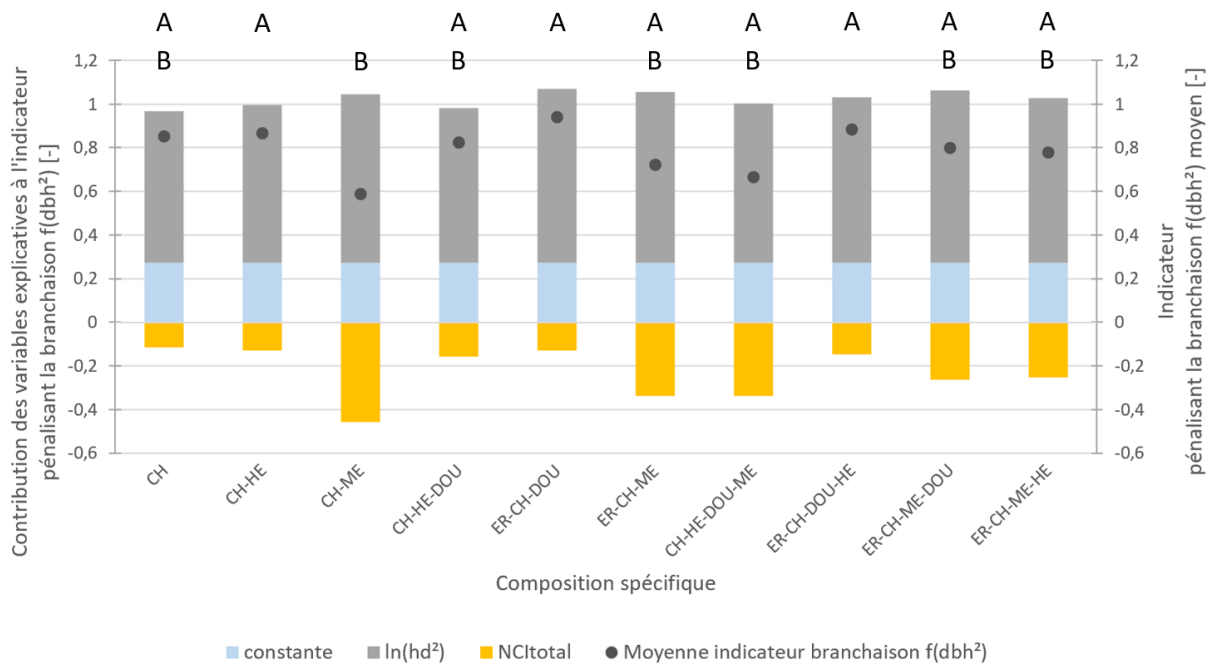


FIGURE 25 – Contribution des variables explicatives à l'indicateur de branchaison $f(dbh^2)$ [-] (axe de gauche) selon la composition spécifique pour le modèle choisi. La moyenne prédite de l'indicateur selon ce modèle est affichée sur l'axe de droite. Les compositions spécifiques qui portent la même lettre présentent des valeurs moyennes prédites non significativement différentes.

Les contributions du mélèze et du chêne expliquent donc que le mélange qui soit le plus avantageux en termes des propriétés de la branchaison des chênes cibles soit le mélange chêne-mélèze. Ceci est cependant à nuancer par le fait qu'à part les trois mélanges qui ne portent que la lettre A et le mélange chêne-mélèze qui ne porte que la lettre B, les six autres portent les deux lettres et donc les valeurs moyennes de l'indicateur pénalisant la branchaison pour ces six compositions spécifiques ne peuvent pas être considérées significativement différentes de celle du mélange chêne-mélèze.

En ce qui concerne la contribution du logarithme de la taille à l'indicateur de branchaison moyen prédit pour chacune des compositions spécifiques, comme pour le facteur d'élancement, il s'agit de la variable explicative dont la contribution est la plus importante mais d'une composition à l'autre, cette contribution reste assez constante. Par contre, la contribution du NCI_{tot} est moins importante mais elle justifie de manière plus marquée les différences de moyennes prédites entre les différentes compositions spécifiques.

4.3.3 Proportion du houppier vivant

4.3.3.1 Ajustement de la proportion du houppier vivant aux variables explicatives

Aucune transformation n'a été appliquée sur les variables explicatives pour la proportion du houppier vivant (voir les R^2 ajustés à l'annexe B pour les différentes transformations sur les variables explicatives).

Les ajustements de la proportion du houppier vivant (équation 1 pour rappel) sont représentés à la figure 26 pour chacune des trois variables explicatives hd^2 , BA et NCI. Il n'y a en effet pas de raison de substituer l'ajustement linéaire sans transformation par un autre avec transformation au vu de la forte dispersion des données pour les relations entre ces variables et la proportion du houppier vivant.

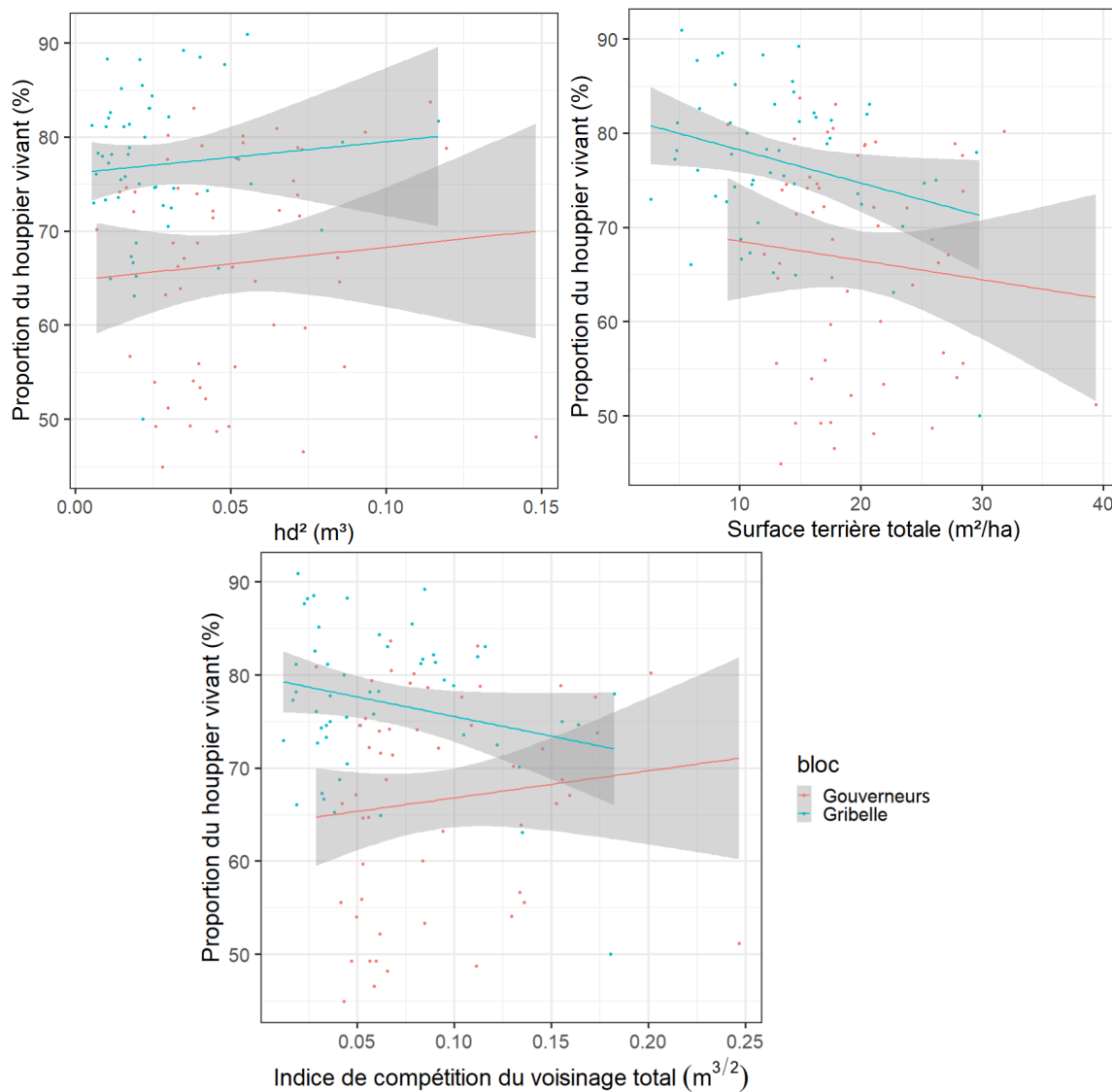


FIGURE 26 – Ajustement de la proportion du houppier vivant en fonction de la taille, la surface terrière totale et l'indice de compétition total respectivement

4.3.3.2 Effets du bloc et de la taille et analyse des statistiques de qualité de l'ajustement par les différentes variantes du modèle

L'ANOVA de la proportion du houppier vivant en fonction du bloc (lm_0) indique un effet significatif du bloc, avec une P valeur inférieure à 0,0001. Lorsque la taille est ajoutée au modèle (variante lm_1), son effet n'est pas marqué (P valeur de 0,3695) tandis que celui du bloc reste avec une P valeur inférieure à 0,0001 (voir tableau 4 annexe C).

La variante du modèle qui présente le BIC le plus faible est la lm_8 ($bloc + hd^2 + NCI_{dec} + NCI_{con}$). Le bloc et la taille y ont des P valeurs de 0,07 et 0,0245 respectivement. Cependant, la représentation graphique de la proportion du houppier en fonction de la taille à la figure 26 ne semble pas montrer de relation entre ces deux variables, au vu de la forte dispersion des points expérimentaux qui rend difficile de commenter ces chiffres.

4.3.3.3 Choix du modèle le plus adéquat

Seules les variables NCI_{dec} et BA_{con} sont sélectionnées par la procédure de sélection (voir annexe E). Ni l'effet du bloc ni celui de la taille ne sont donc intégrés au modèle retenu. Cependant, utiliser l'indice de compétition pour les feuillus mais la surface terrière pour les conifères n'est pas très pertinent et donc les NCI sont utilisés dans les deux cas pour le modèle final, ce qui constitue un compromis entre le modèle de la procédure pas à pas et la variante lm_8 . Les NCI sont à nouveau préférés aux BA car les différentes variantes testées du modèle présentent globalement des BIC plus faibles lorsque l'effet de la compétition est expliqué par les NCI plutôt que par les BA (voir annexe C).

Les statistiques de qualité, ainsi que les coefficients des variables explicatives, sont donnés au tableau 12 pour lm_8 , le modèle fourni par la procédure pas à pas et le modèle final respectivement.

TABLEAU 12 – Récapitulatif des statistiques de qualité de l'ajustement pour la proportion du houppier vivant, ainsi que des estimations des coefficients et des P valeurs. Le premier modèle est celui qui présente le BIC le plus faible parmi les variantes testées (lm_8), le deuxième est celui retenu par la procédure de sélection et le troisième est le modèle finalement déterminé comme le plus adéquat pour expliquer la part de la hauteur totale des chênes cibles occupée par des branches vivantes (voir équation 1). Les valeurs en orange permettent de repérer les variables explicatives dont l'effet est significatif (seuil de significativité à 0,05).

Modèle	Effets considérés	R ² ajusté	AICc	BIC	Coefficients	Estimations	P valeurs
Modèle au BIC le plus faible (lm_8)	$bloc + hd^2 + NCI_{dec} + NCI_{con}$	0,496	745,91	761,04	constante bloc[Gouverneurs] hd^2 NCI_{dec} NCI_{con}	87,16 -1,87 71,84 -591,16 -88,51	<,0001 0,07 0,0245 <,0001 <,0001
Modèle de la procédure de sélection	$NCI_{dec} + BA_{con}$	0,479	747,05	757,31	constante NCI_{dec} BA_{con}	92,17 -629,45 -0,65	<,0001 <,0001 <,0001
Modèle choisi	$NCI_{dec} + NCI_{con}$	0,474	748,14	758,40	constante NCI_{dec} NCI_{con}	91,37 -623,39 -101,44	<,0001 <,0001 <,0001

Le modèle final présente un BIC plus faible que la variante lm_8 , ce qui conforte le choix d'avoir retiré le bloc et la taille du modèle, car ils n'y apportent pas de plus-value. Tout comme pour la variable réponse précédente, remplacer la surface terrière par l'indice de compétition cause une légère

baisse de la qualité statistique du modèle mais au profit d'une meilleure cohérence. Les effets de la compétition exercée par les essences décidues et par les conifères indiquent dans les trois cas des P valeurs inférieures à 0,0001.

Les estimations des coefficients qui qualifient l'effet du voisinage montrent qu'au plus la compétition exercée par les essences feuillues et résineuses sur le chêne cible central est intense, au moins la proportion du houppier vivant est importante. Les valeurs des estimations sont effectivement négatives, ce qui signifie que l'intensification de la compétition exercée par le voisinage résulte en une proportion relative de tronc exempt de branches vivantes plus importante. Ces effets sont illustrés, comme pour les variables réponses précédentes, par l'histogramme empilé à la figure 27.

Six compositions spécifiques présentent la lettre C. Cependant, parmi ces compositions, seules deux ne présentent pas la lettre A. Ces deux compositions réfèrent au mélange chêne-hêtre et aux parcelles de chêne pures. La monoculture porte toutefois aussi la lettre B, et donc la proportion moyenne prédite du houppier vivant dans celle-ci est en fait équivalente à celle de toutes les autres compositions spécifiques, excepté le mélange érable-chêne-douglas. Le mélange chêne-hêtre ne traduit quant à lui une valeur moyenne significativement plus basse que par rapport à quatre compositions spécifiques (ER-CH-DOU, ER-CH-ME, ER-CH-DOU-HE et ER-CH-ME-DOU). La moyenne prédite de la proportion du houppier vivant n'est donc pas significativement différente entre les mélanges chêne-hêtre et chêne-mélèze.

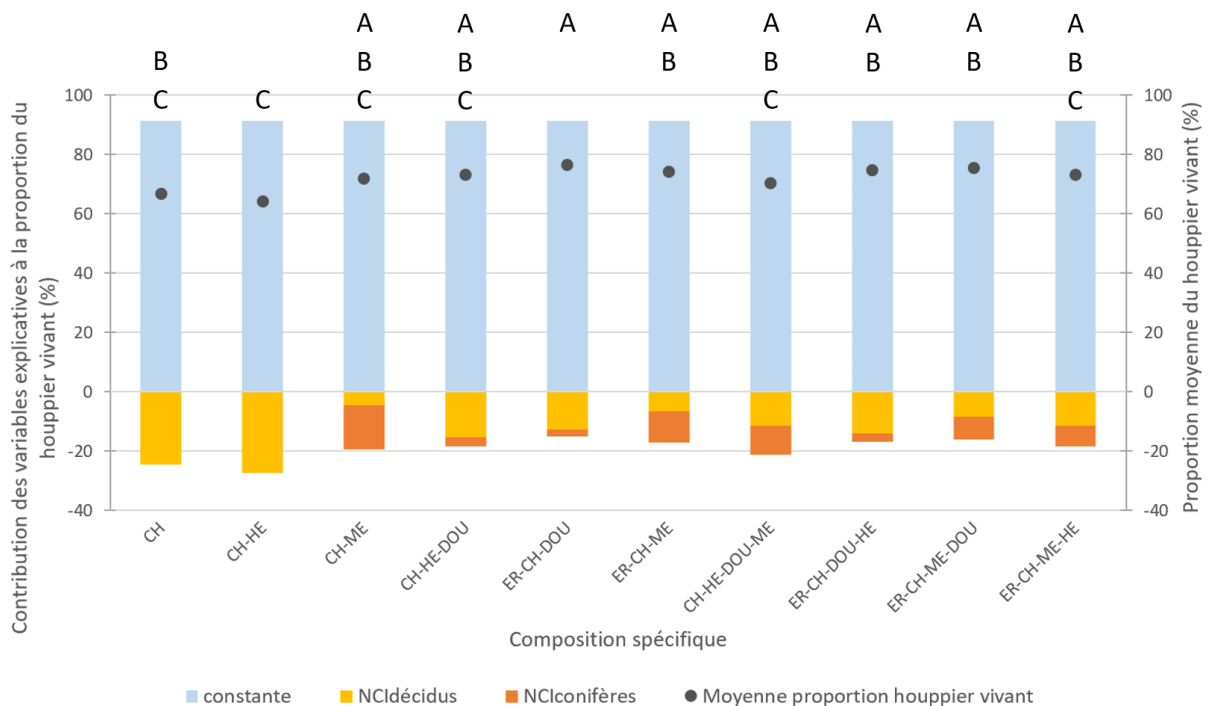


FIGURE 27 – Contribution des variables explicatives à la proportion du houppier vivant (%) (axe de gauche) selon la composition spécifique pour le modèle choisi. La moyenne prédite de cette proportion selon ce modèle est affichée sur l'axe de droite. Les compositions spécifiques qui portent la même lettre présentent des valeurs moyennes prédites non significativement différentes.

La constante de la régression linéaire du modèle choisi constitue en fait la majeure contribution à la moyenne prédite de la proportion du houppier. Cela explique que, malgré les différences de contribution des indices de compétition à la moyenne entre les différentes compositions spécifiques, les moyennes

ne paraissent pas différer de façon flagrante d'une composition à l'autre. La composition qui ressort comme la plus avantageuse en termes de proportion du houppier reste toutefois le mélange chêne-hêtre, dont la contribution du NCI à la moyenne prédite occupe une part plus importante que dans les autres compositions. En fait, l'analyse en composantes principales du jeu de données conforte ce résultat car le NCI des essences décidues entretient une corrélation de 0,88 avec le NCI du chêne et une corrélation de 0,53 avec le NCI du hêtre (annexe G). Comme la proportion du houppier vivant présente elle-même une corrélation de -0,57 avec le NCI des essences décidues, cela justifie que le mélange chêne-hêtre soit mis en évidence. Le NCI des essences résineuses présente quant à lui une corrélation de 0,96 avec le NCI du mélèze.

4.3.4 Nombre de branches vivantes entre 0 et 4m

4.3.4.1 *Ajustement du nombre de branches vivantes entre 0 et 4m aux variables explicatives*

Aucune des variables explicatives n'a été transformée pour le nombre de branches vivantes en deçà de quatre mètres (voir les R^2 ajustés à l'annexe B pour les différentes transformations sur les variables explicatives).

Les ajustements du nombre de branches vivantes entre 0 et 4m en fonction de hd^2 , BA_{tot} et NCI_{tot} sont représentés à la figure 28. La conservation des régressions linéaires sans transformation se justifie visuellement pour ces trois variables explicatives. En effet, remplacer la régression linéaire simple sans transformation par un autre ajustement avec transformation ne paraît pas très pertinent car trop de poids serait donné à quelques points extrêmes dont la valeur pourrait simplement être due au hasard. De plus, les points se distribuent de manière assez hétérogène.

4.3.4.2 *Effets du bloc et de la taille et analyse des statistiques de qualité de l'ajustement par les différentes variantes du modèle*

En comparant l'ANOVA du modèle pour le nombre de branches vivantes dans les quatre premiers mètres en fonction du bloc (lm_0) avec la variante lm_1 du modèle (voir annexe D et/ou tableau 5 annexe C), on remarque que l'effet du bloc présente une P valeur inférieure à 0,0001 dans les deux cas. La taille, une fois ajoutée, joue également un rôle significatif (P valeur de 0,0056).

Le meilleur modèle, au regard des BIC, est, comme pour la proportion du houppier vivant, le lm_8 (bloc + hd^2 + NCI_{dec} + NCI_{con}). Les effets du bloc et de la taille y sont significatifs (P valeurs de 0,0407 et 0,0024 respectivement). Les différentes variantes du modèle peuvent être consultées à l'annexe C, pour rappel (tableau 5).

L'effet du bloc semble être partiellement confondu avec celui de la taille, au vu de la relation entre le nombre de branches vivantes dans les premiers mètres et la taille présentée à la figure 28. Les points liés à Gouverneurs se concentrent effectivement sur la droite de la régression tandis que ceux liés à Gribelle se concentrent sur sa gauche (voir explication point 3.4.4 et figure 18 matériel et méthodes).

4.3.4.3 *Choix du modèle le plus adéquat*

La procédure de sélection pas à pas n'inclut pas le bloc mais bien le hd^2 au modèle (voir annexe E), ce qui renforce l'idée que l'effet bloc est lié à celui de la taille. La surface terrière totale et l'indice

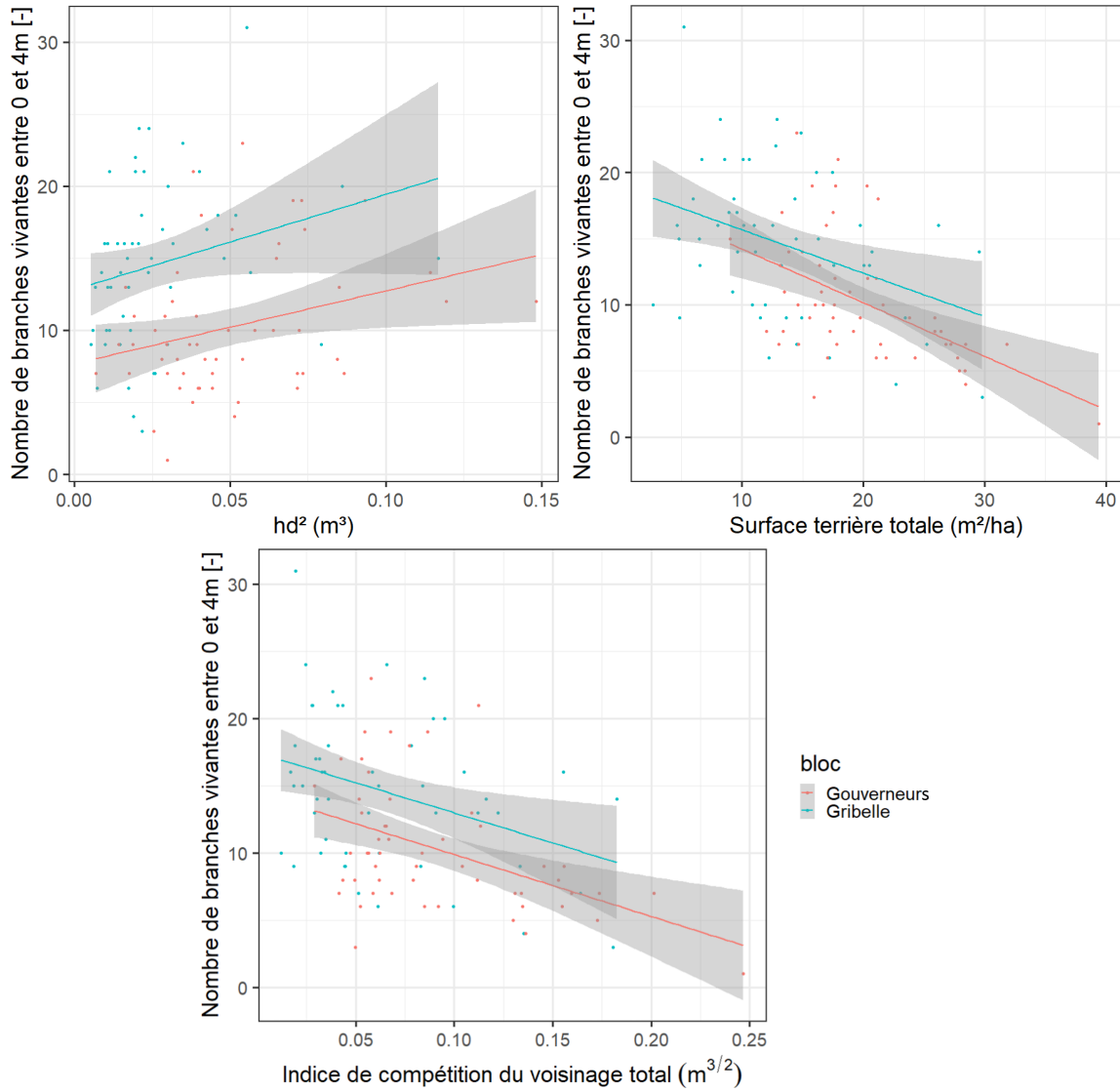


FIGURE 28 – Ajustement du nombre de branches vivantes en deçà de 4m en fonction de la taille, la surface terrière totale et l'indice de compétition total respectivement

de compétition du chêne sont quant à eux sélectionnés pour expliquer l'effet du voisinage. Cela donne alors un modèle qui considère les effets suivants : $hd^2 + NCI_1 + BA_{tot}$.

Cette sélection n'est à nouveau pas très logique sur le plan écologique. Afin de trouver un compromis entre le modèle `lm_8`, qui présente le BIC le plus faible mais ne met pas l'effet des différentes essences en évidence, et le modèle donné par la procédure de sélection, le modèle retenu sépare les essences feuillues, ce qui permet de différencier l'effet du chêne tout en considérant l'information de la totalité des essences. Ce modèle final inclut donc la taille, l'effet de la compétition exercée par chacune des essences feuillues séparément, et l'effet groupé des essences résineuses. Les NCI sont à nouveau privilégiés aux BA car ils présentent toujours les BIC les plus faibles si on compare les différentes variantes testées du modèle (tableau 5 annexe C).

Le tableau 13 résume les statistiques de qualité de l'ajustement ainsi que les coefficients des variables explicatives pour, respectivement, la variante `lm_8` du modèle, le modèle sélectionné par la procédure d'analyse statistique pas à pas et le modèle finalement choisi.

TABLEAU 13 – Récapitulatif des statistiques de qualité de l'ajustement pour le nombre de branches vivantes entre 0 et 4m, ainsi que des estimations des coefficients et des P valeurs. Le premier modèle est celui qui présente le BIC le plus faible parmi les variantes testées (lm_8), le deuxième est celui retenu par la procédure de sélection et le troisième est le modèle finalement déterminé comme le plus adéquat pour expliquer l'abondance de branches vivantes dans les quatre premiers mètres des chênes cibles. Les valeurs en orange permettent de repérer les variables explicatives dont l'effet est significatif (seuil de significativité à 0,05).

Modèle	Effets considérés	R ² ajusté	AICc	BIC	Coefficients	Estimations	P valeurs
Modèle au BIC le plus faible (lm_8)	bloc + hd ² + NCI _{dec} + NCI _{con}	0,37	626,30	641,43	constante bloc[Gouverneurs] hd ² NCI _{dec} NCI _{con}	18,06 -1,20 55,77 -189,71 -63,93	<,0001 0,0407 0,0024 <,0001 <,0001
Modèle de la procédure de sélection	hd ² + NCI _{chêne} + BA _{tot}	0,343	629,57	642,29	constante hd ² NCI _{chêne} BA _{tot}	20,35 46,94 -118,15 -0,47	<,0001 0,0079 0,0019 <,0001
Modèle choisi	hd ² + NCI _{chêne} + NCI _{hêtre} + NCI _{érable} + NCI _{con}	0,349	631,07	648,57	constante hd ² NCI _{chêne} NCI _{hêtre} NCI _{érable} NCI _{con}	20,28 47,62 -265,48 -164,99 -251,96 -75,51	<,0001 0,0081 <,0001 0,0161 0,0823 <,0001

Le modèle final permet donc de différencier l'effet du chêne tout en assurant qu'il n'y ait pas de redondance dans les effets des différentes essences, et que le modèle comptabilise ainsi la composition spécifique de manière sensée. Cela se fait au prix d'une moindre vraisemblance statistique (BIC plus élevé) que celle du lm_8 mais au profit d'une meilleure capacité informative sur l'effet de la composition spécifique du voisinage. L'analyse des P valeurs indique que l'indice de compétition de l'érable n'a peut-être pas d'effet significatif (P valeur de 0,0823) mais au vu de sa P valeur proche du seuil de significativité, on préfère le conserver par sécurité. Le seuil de significativité est en effet placé à 0,05 mais les variables dont la P valeur est inférieure à 0,1 sont tout de même considérées comme susceptibles d'impacter la variable réponse, par souci de précaution.

Les estimations des coefficients du modèle retenu montrent qu'au plus le volume des chênes cibles est important, au plus le nombre de branches vivantes dans les quatre premiers mètres augmente. En ce qui concerne les indices de compétition par contre, l'intensification de la compétition exercée par les conifères sur les chênes cibles tend à décroître le nombre de branches vivantes dans les quatre premiers mètres. La compétition exercée par les feuillus, en particulier le chêne, puis le hêtre, résulte de même en un rôle de compression horizontale. Ces tendances peuvent être visualisées à la figure 28. Le sens des effets de ces variables explicatives sur la variable réponse peut également être visualisé sur l'histogramme empilé de la figure 29.

Comme pour l'indicateur pénalisant la branchaison, seule une composition spécifique présente la lettre B exclusivement tandis que seules trois compositions spécifiques présentent la lettre A exclusivement. Cette composition spécifique de lettre B uniquement, dont la valeur moyenne prédite est significativement plus faible que celles des trois compositions de lettre A, est à nouveau le mélange chêne-mélèze. Les trois mélanges de lettre A uniquement sont chêne-hêtre-douglas, érable-chêne-douglas et érable-chêne-douglas-hêtre. Toutes les autres compositions présentent les deux lettres. En fait, par

comparaison avec l’histogramme empilé du modèle le plus complet (figure 21 annexe F), on peut remarquer que parmi les sept mélanges qui portent la lettre B se trouvent les cinq mélanges avec du mélèze. Comme pour l’indicateur pénalisant la branchaison, c’est le mélèze qui exerce la compétition la plus forte parmi les voisins, puis le chêne, d’où le fait que ce soit le mélange chêne-mélèze qui se démarque le plus pour minimiser le nombre de branches vivantes dans les premiers mètres des chênes cibles. Ces deux indicateurs, celui pénalisant la branchaison et le nombre de branches vivantes en deçà de quatre mètres, présentent en fait une corrélation de 0,6 (voir analyse en composantes principales annexe G).

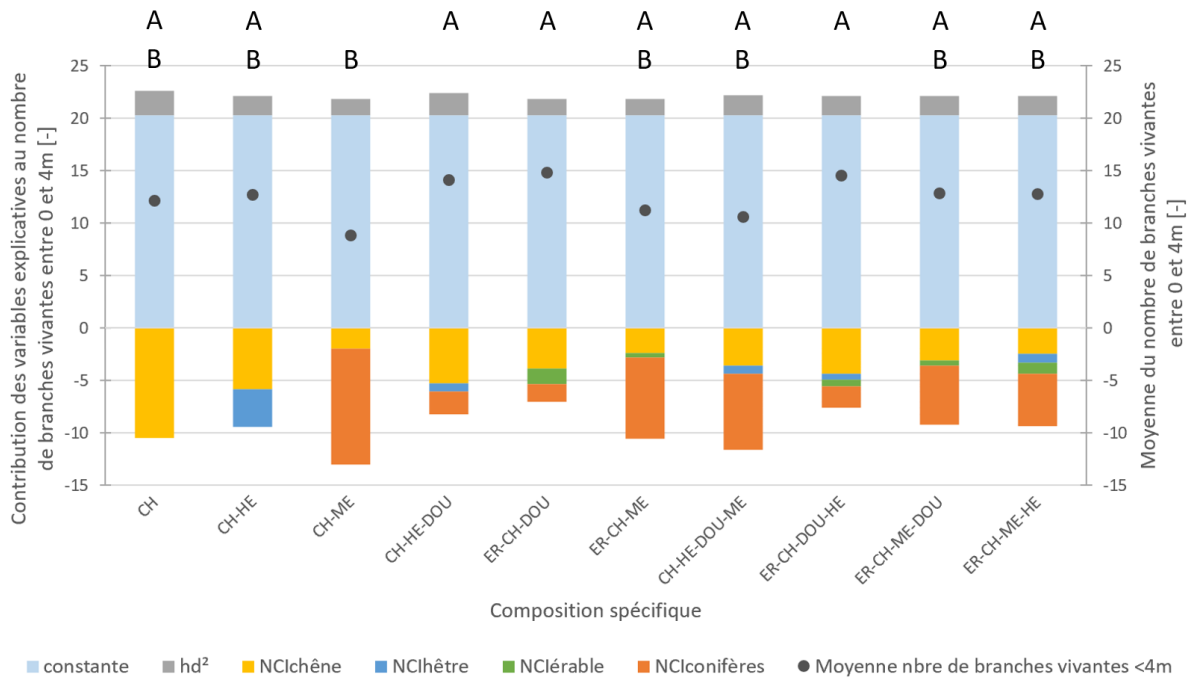


FIGURE 29 – Contribution des variables explicatives au nombre de branches vivantes en deçà de 4m [-] (axe de gauche) selon la composition spécifique pour le modèle choisi. La moyenne prédite de ce nombre de branches selon ce modèle est affichée sur l’axe de droite. Les compositions spécifiques qui portent la même lettre présentent des valeurs moyennes prédites non significativement différentes.

Ici, la part de la constante aux valeurs moyennes prédites du nombre de branches vivantes en deçà de quatre mètres est à nouveau la plus importante. La taille contribue par contre très peu. C’est la contribution des indices de compétition du voisinage, en particulier ceux du chêne et du mélèze, qui explique les différences de valeurs moyennes prédites entre les compositions spécifiques.

4.3.5 Nombre de fourches total ramené à la longueur du houppier vivant

4.3.5.1 Ajustement du nombre de fourches total, ramené à la longueur du houppier vivant, aux variables explicatives

Une fois de plus, aucune des variables explicatives n’a été transformée (voir les R^2 ajustés à l’annexe B pour les différents essais de transformation sur les variables explicatives).

Les relations entre le nombre de fourches total, ramené à la longueur du houppier vivant (équation 3 pour rappel), et, respectivement, hd^2 , BA_{tot} et NCI_{tot} sont représentées graphiquement à la figure 30. À nouveau, la distribution hétérogène des points et la présence de quelques points extrêmes qui pourraient biaiser l’ajustement justifient le maintien d’une régression linéaire sans transformation pour

l'ensemble des variables explicatives.

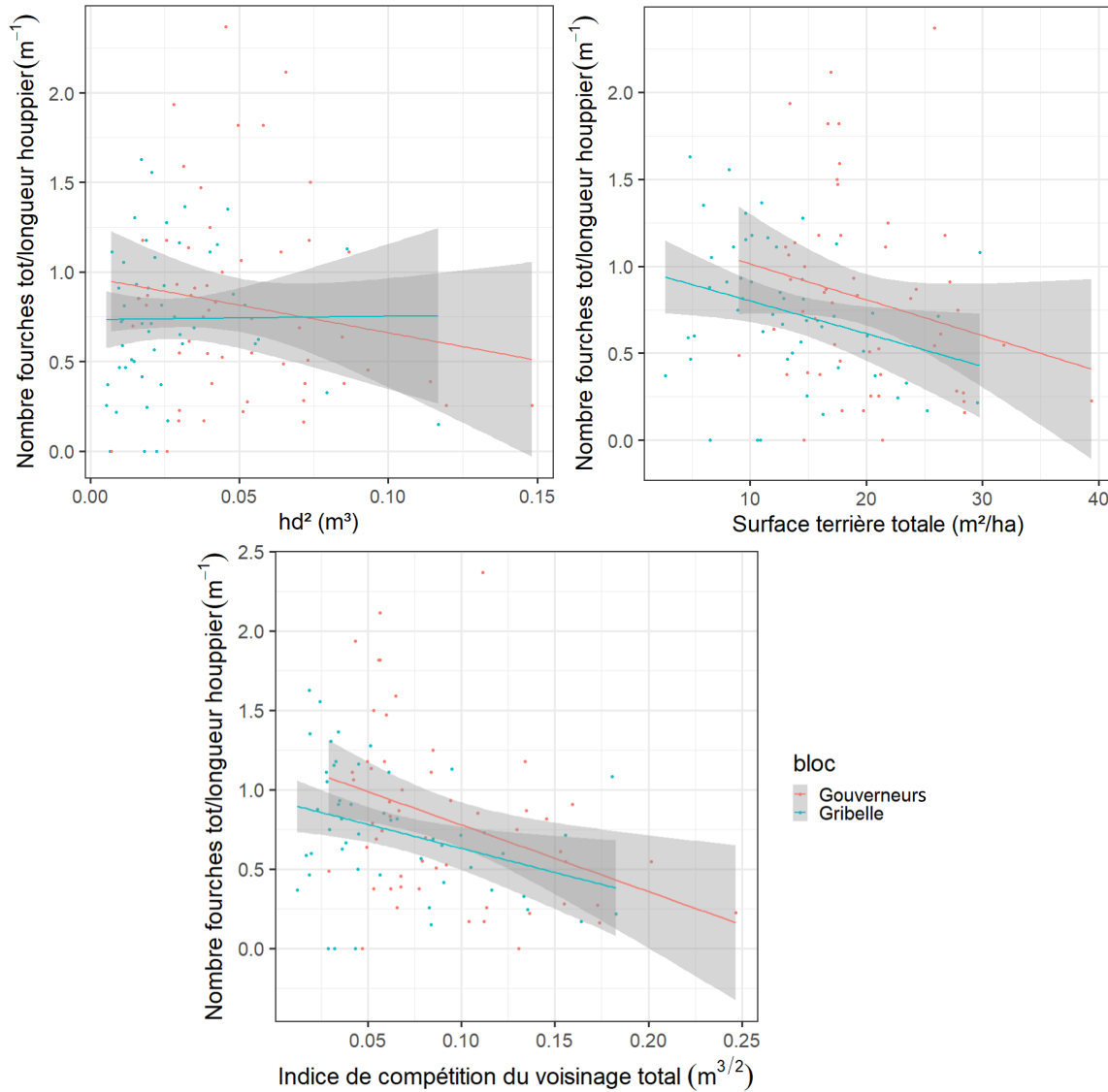


FIGURE 30 – Ajustement du nombre de fourches total/ l_{houppier} en fonction de la taille, la surface terrière totale et l'indice de compétition total respectivement

4.3.5.2 Effets du bloc et de la taille et analyse des statistiques de qualité de l'ajustement par les différentes variantes du modèle

L'ANOVA du nombre de fourches total ramené à la longueur du houppier en fonction du bloc (lm_0) indique un effet non significatif du bloc, avec une P valeur de 0,4227 (voir tableau 6 annexe C ou annexe D). L'ajout de la taille au modèle (variante lm_1) donne des P valeurs de 0,2479 et 0,3164 pour les effets du bloc et de la taille respectivement, qui ne sont donc pas significatifs (voir tableau 6 annexe C).

La variante lm_8 du modèle présente une fois de plus le BIC le plus faible ($\text{bloc} + \text{hd}^2 + \text{NCI}_{\text{dec}} + \text{NCI}_{\text{con}}$). Le bloc n'y est pas significatif mais la taille oui (P valeurs de 0,461 et 0,0394 respectivement).

4.3.5.3 Choix du modèle le plus adéquat

La taille, les indices de compétition du chêne, de l'érable, ainsi que la surface terrière du mélèze sont sélectionnés par la procédure pas à pas (voir annexe E). Le modèle prend alors en compte les effets suivants : $hd^2 + NCI_1 + NCI_3 + BA_5$.

Le modèle retenu prend donc la forme $hd^2 + NCI_1 + NCI_3 + NCI_5$. En effet, comme cette fois la procédure de sélection n'inclut pas l'information de la totalité des essences, on se limite alors à remplacer la surface terrière du mélèze par son indice de compétition, pour rester cohérent avec le processus de décision suivi pour les variables réponses précédentes. Le bloc a été retiré du modèle final, étant donné que son influence sur la fourchaison est négligeable. Le tableau 14 résume les statistiques de qualité ainsi que les coefficients des variables explicatives pour, respectivement, le modèle lm_8 , le modèle sélectionné par la procédure d'analyse statistique pas à pas et le modèle finalement choisi.

TABLEAU 14 – Récapitulatif des statistiques de qualité de l'ajustement pour le nombre de fourches total/houppier, ainsi que des estimations des coefficients et des P valeurs. Le premier modèle est celui qui présente le BIC le plus faible parmi les variantes testées (lm_8), le deuxième est celui retenu par la procédure de sélection et le troisième est le modèle finalement déterminé comme le plus adéquat pour expliquer cet indicateur de la fourchaison des chênes cibles. Les valeurs en orange permettent de repérer les variables explicatives dont l'effet est significatif (seuil de significativité à 0,05).

Modèle	Effets considérés	R ² ajusté	AICc	BIC	Coefficients	Estimations	P valeurs
Modèle au BIC le plus faible (lm_8)	bloc + $hd^2 + NCI_{dec} + NCI_{con}$	0,189	130,68	145,82	constante bloc[Gouverneurs] hd^2 NCI_{dec} NCI_{con}	0,82 0,04 -3,61 9,00 -1,95	<,0001 0,461 0,0394 0,0394 0,0826
Modèle de la procédure de sélection	$hd^2 + NCI_{chêne} + NCI_{érable} + BA_{mélèze}$	0,251	122,21	137,34	constante hd^2 $NCI_{chêne}$ $NCI_{érable}$ $BA_{mélèze}$	0,76 -4,00 13,06 29,44 -0,01	<,0001 0,0137 0,0011 0,0222 0,0220
Modèle choisi	$hd^2 + NCI_{chêne} + NCI_{érable} + NCI_{mélèze}$	0,251	122,24	137,37	constante hd^2 $NCI_{chêne}$ $NCI_{érable}$ $NCI_{mélèze}$	0,75 -4,03 13,14 29,51 -1,87	<,0001 0,0129 0,001 0,0219 0,0223

L'analyse des P valeurs permet de remarquer que la différenciation de l'effet du mélèze de l'indice de compétition des conifères permet de rendre l'ensemble des effets du modèle significatifs (P valeurs de 0,0826 pour NCI_{con} , de la variante lm_8 du modèle, et 0,0223 pour NCI_5 du modèle retenu). Le modèle retenu, tout comme celui fourni par la procédure pas à pas, présente une meilleure qualité statistique que la variante lm_8 . Le remplacement de la surface terrière du mélèze par son indice de compétition amène à des variations négligeables des statistiques de qualité, des estimations des coefficients et des P valeurs des variables explicatives.

Au plus la taille est importante, au plus le nombre de fourches total ramené à la longueur de houppier vivant diminue. Cela signifie que les chênes cibles de plus gros volume présentent proportionnellement moins de fourches pour une même part de leur hauteur totale occupée par des branches vivantes. Les estimations des coefficients des NCI du chêne et de l'érable sont quant à elles positives,

et donc au plus la compétition qu'ils exercent s'intensifie, au plus les fourches des chênes cibles sont abondantes, par rapport à la longueur de leur houppier vivant. Au plus la concurrence du mélèze s'intensifie par contre, au moins les chênes cibles présentent de fourches pour une même part de leur hauteur totale occupée par des branches vivantes.

L'histogramme empilé du modèle retenu est présenté à la figure 31 et montre le sens des effets décrits. Les deux mélanges qui ressortent le plus de par leur faible valeur moyenne prédite sont les mélanges chêne-mélèze et érable-chêne-mélèze. Ce dernier présente toutefois aussi la lettre E, tout comme les trois autres mélanges contenant du mélèze non cités (cinq en tout). La concurrence exercée par le mélèze minimise donc à nouveau cet indicateur, qui qualifie l'abondance de fourches chez les chênes cibles par rapport à la longueur de leur houppier, étant donné la relation inversement proportionnelle qui existe entre eux.

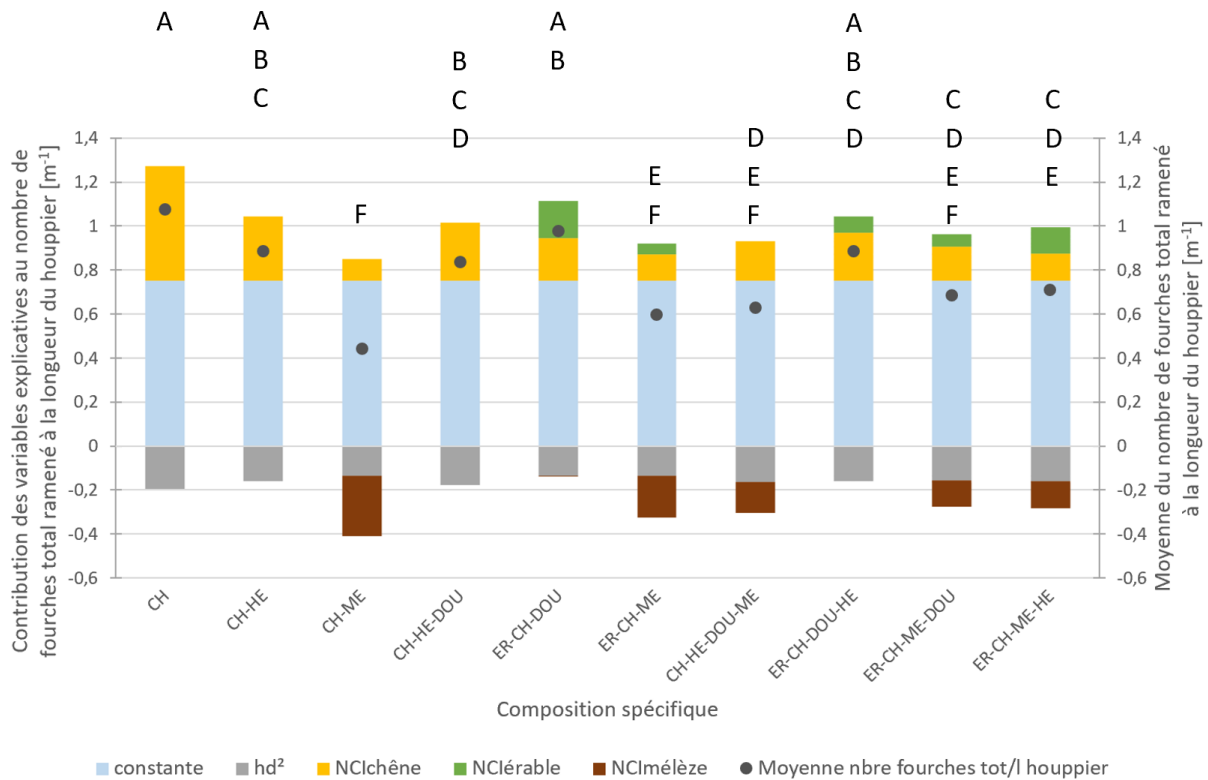


FIGURE 31 – Contribution des variables explicatives au nombre de fourches total ramené à la longueur du houppier [m^{-1}] (axe de gauche) selon la composition spécifique pour le modèle choisi. La moyenne prédite de ce nombre de fourches selon ce modèle est affichée sur l'axe de droite. Les compositions spécifiques qui portent la même lettre présentent des valeurs moyennes prédites non significativement différentes.

Comme pour le nombre de branches vivantes en deçà de quatre mètres, la part de la constante à la moyenne de cet indicateur des fourches des chênes cibles est importante tandis que celle de la taille est faible. Ce sont à nouveau les indices de compétition des essences (seulement ici chêne, érable et mélèze) qui expliquent les différences de valeurs moyennes prédites d'une composition à l'autre.

4.3.6 Nombre de fourches total ramené à la hauteur totale

4.3.6.1 Ajustement du nombre de fourches total, ramené à la hauteur totale, aux variables explicatives

Comme en attestent les distributions de points très ressemblantes entre les figures 30 et 32, le raisonnement suivi pour ajuster le nombre de fourches total ramené à la hauteur totale (équation 4 pour rappel) est très similaire à celui du nombre de fourches total ramené à la longueur du houppier vivant. Ces deux indicateurs des fourches sont d'ailleurs très corrélés (corrélation de 0,93), comme en atteste l'analyse en composantes principales à l'annexe G. Ce sont donc à nouveau uniquement des régressions linéaires non transformées qui ajustent ce deuxième indicateur de fourchaison en fonction de, respectivement, la taille, la surface terrière totale et l'indice de compétition total.

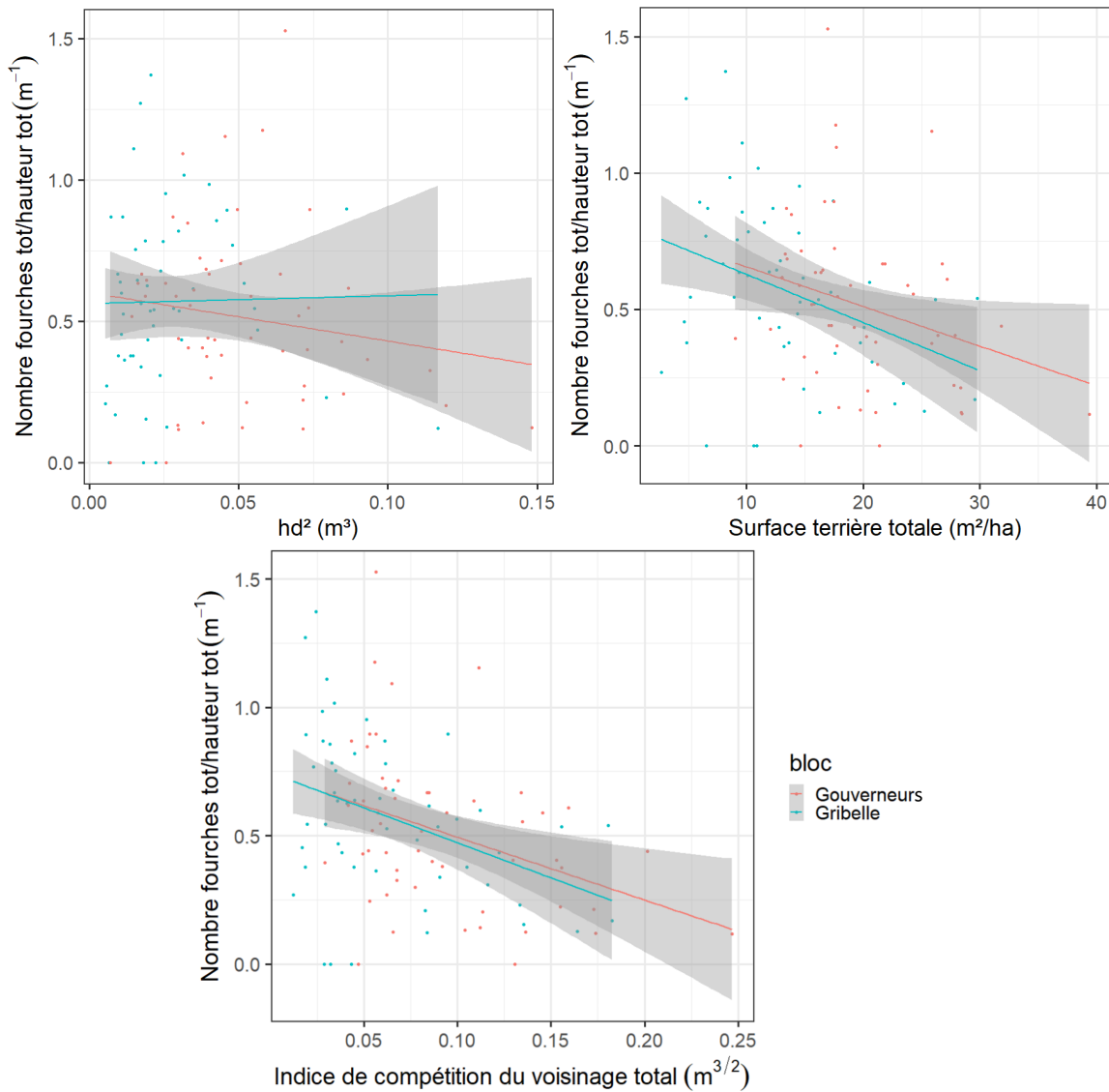


FIGURE 32 – Ajustement du nombre de fourches total/ h_{tot} en fonction de la taille, la surface terrière totale et l'indice de compétition total respectivement

4.3.6.2 Effets du bloc et de la taille et analyse des statistiques de qualité de l'ajustement par les différentes variantes du modèle

Comme pour le premier indicateur qualifiant les fourches des chênes cibles, le bloc n'a ni d'effet significatif dans la variante lm_0 du modèle, ni dans la variante lm_1 (P valeurs de 0,3691 et 0,6518 respectivement). La taille n'y influence pas non plus significativement le nombre de fourches total ramené à la hauteur totale (P valeur de 0,421) (voir tableau 7 annexe C).

Pour la variante lm_7 du modèle, qui présente le BIC le plus faible, les effets du bloc et de la taille restent négligeables (P valeurs de 0,3828 et 0,1607 respectivement). Ils peuvent alors être retirés du modèle. En effet, la taille et le bloc ne paraissent pas influencer le nombre de fourches au vu de la distribution des points de la relation entre le nombre de fourches total ramené à la hauteur totale et la taille, représentée à la figure 32.

4.3.6.3 Choix du modèle le plus adéquat

Seule la surface terrière du mélèze est sélectionnée par la procédure d'analyse statistique pas à pas (voir annexe E). Cela confirme que la taille et le bloc ne sont pas nécessaires pour expliquer la variable réponse nombre de fourches total/hauteur totale. Le modèle final considère alors uniquement l'effet de la compétition exercée par le mélèze, exprimé par son indice de compétition.

Les statistiques de qualité et les coefficients des variables explicatives sont donnés au tableau 15 pour chacun des trois modèles lm_7, procédure pas à pas et modèle final. Le modèle proposé par la procédure pas à pas et le modèle retenu présentent tous deux un BIC largement plus faible que la variante lm_7 du modèle. Le remplacement de la surface terrière du mélèze par son indice de compétition ne change à nouveau pas grand chose sur le plan statistique. Dans les trois cas, l'effet de la compétition se traduit par une P valeur inférieure à 0,0001.

TABLEAU 15 – Récapitulatif des statistiques de qualité de l'ajustement pour le nombre de fourches total/ h_{tot} , ainsi que des estimations des coefficients et des P valeurs. Le premier modèle est celui qui présente le BIC le plus faible parmi les variantes testées (lm_7), le deuxième est celui retenu par la procédure de sélection et le troisième est le modèle finalement déterminé comme le plus adéquat pour expliquer cet indicateur de la fourchaison des chênes cibles. Les valeurs en orange permettent de repérer les variables explicatives dont l'effet est significatif (seuil de significativité à 0,05).

Modèle	Effets considérés	R ² ajusté	AICc	BIC	Coefficients	Estimations	P valeurs
Modèle au BIC le plus faible (lm_7)	bloc + hd^2 + NCl_{tot}	0,143	44,56	57,28	constante bloc[Gouverneurs] hd^2 NCl_{tot}	0,81 0,03 -1,62 -2,69	<,0001 0,3828 0,1607 <,0001
Modèle de la procédure de sélection	$BA_{mélèze}$	0,159	40,23	47,99	constante $BA_{mélèze}$	0,64 -0,01	<,0001 <,0001
Modèle choisi	$NCl_{mélèze}$	0,159	40,25	48,00	constante $NCl_{mélèze}$	0,64 -2,17	<,0001 <,0001

Comme pour l'indicateur des fourches précédent, la compétition exercée par le mélèze est estimée par une valeur négative et donc, au plus la compétition exercée par le mélèze est importante au voisinage des chênes cibles, au moins ceux-ci présentent de fourches pour une hauteur totale donnée. Le NCI du

mélèze est donc la seule variable explicative de ce modèle final, comme le montre l'histogramme empilé à la figure 33.

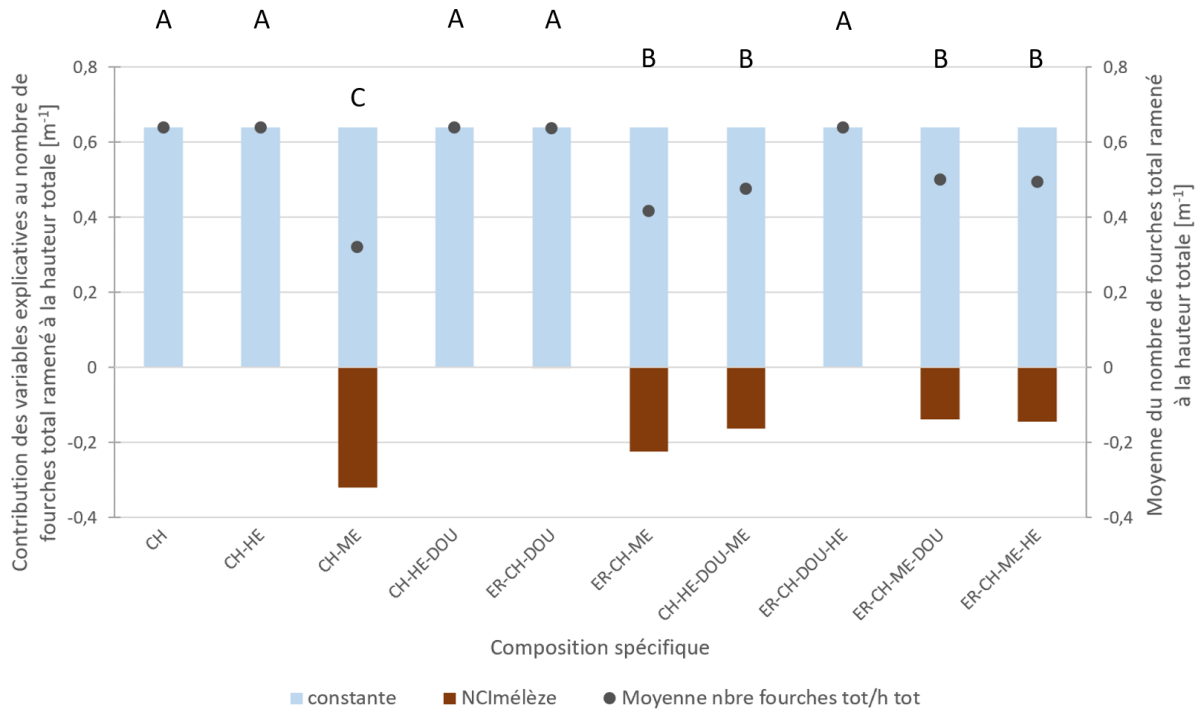


FIGURE 33 – Contribution des variables explicatives au nombre de fourches total ramené à la hauteur totale $[m^{-1}]$ (axe de gauche) selon la composition spécifique pour le modèle choisi. La moyenne prédite de ce nombre de fourches selon ce modèle est affichée sur l'axe de droite. Les compositions spécifiques qui portent la même lettre présentent des valeurs moyennes prédites non significativement différentes.

Trois catégories de valeurs moyennes prédites pour le nombre de fourches total, ramené à la hauteur totale, se démarquent sur l'histogramme empilé. Cette fois, un mélange unique ressort sans équivoque comme étant le plus approprié pour minimiser le nombre de fourches total des chênes cibles pour une hauteur totale donnée. Il s'agit de la composition chêne-mélèze encore une fois. La constante occupe une large part de contribution à la valeur moyenne prédite pour chacune des compositions mais c'est la concurrence exercée par le mélèze qui fait diminuer plus ou moins l'indicateur prédit entre les compositions spécifiques où le mélèze est présent.

4.3.7 Nombre de fourches entre 0 et 4m ramené à une hauteur de 4m

Le raisonnement suivi pour déterminer le meilleur modèle de ce dernier indicateur de la fourchaison ne sera pas développé pour la simple raison qu'il est identique à celui de la variable réponse précédente. En effet, le nombre de fourches total ramené à la hauteur totale et le nombre de fourches en deçà de 4m ramené à une hauteur de 4m sont supposés être sensiblement équivalents, car il s'agit de deux expressions différentes du même indicateur. Cela se confirme en observant les figures 32 et 34 où on peut remarquer que les régressions linéaires pour chacun des ajustements du nombre de fourches en fonction de la taille, BA_{tot} et NCI_{tot} respectivement sont très similaires pour les deux indicateurs. Les valeurs observées de ces deux indicateurs des fourches sont en fait très corrélées. La corrélation entre le nombre de fourches total, ramené à la hauteur totale, et le nombre de fourches en deçà de quatre mètres, ramené à une hauteur de quatre mètres, est ainsi de 0,85. De la même façon, la corrélation entre le nombre de fourches total, ramené à la longueur du houppier, et le nombre de fourches en

deçà de quatre mètres, ramené à une hauteur de quatre mètres, est de 0,81 (voir corrélations issues de l'analyse en composantes principales annexe G).

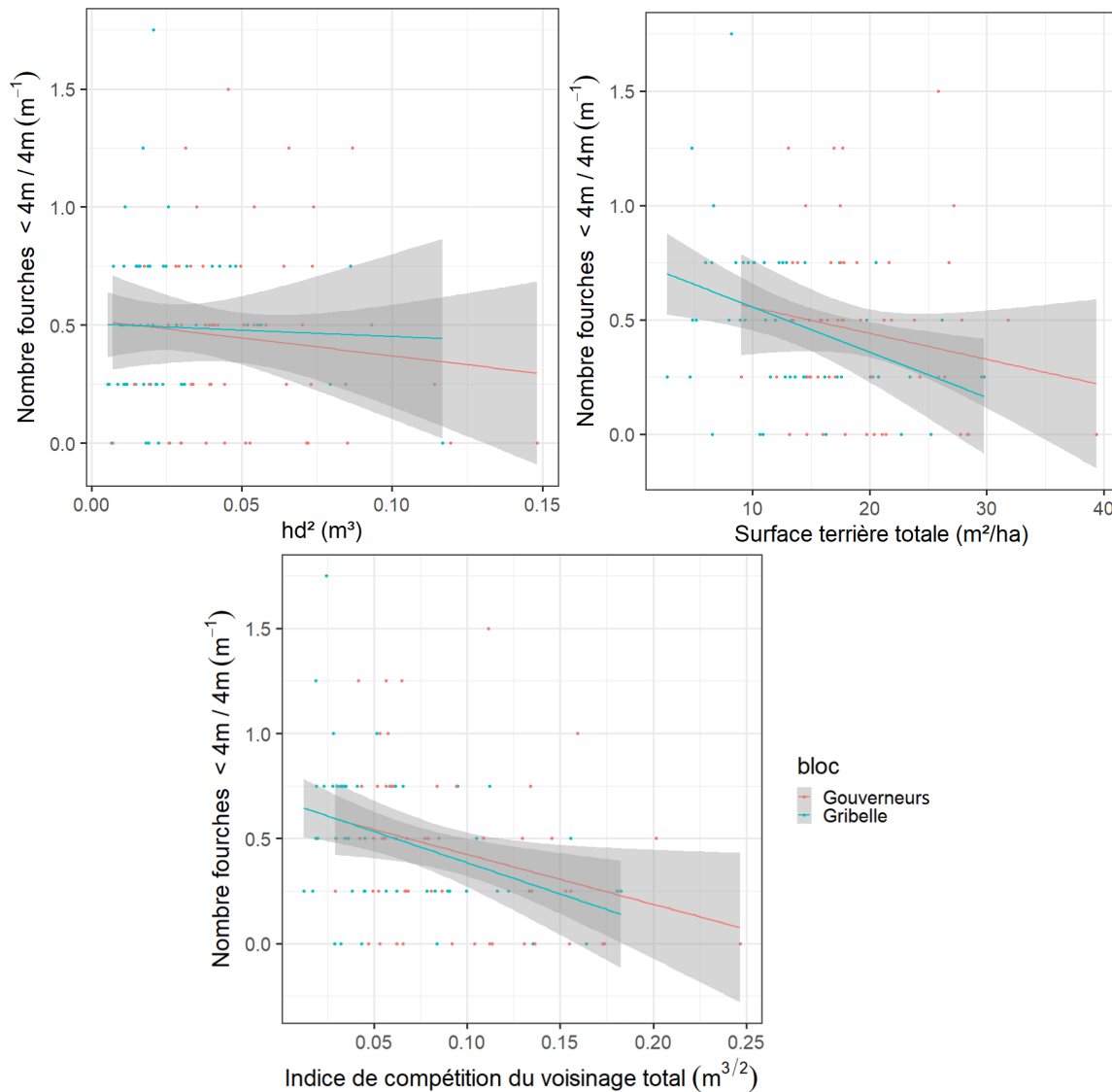


FIGURE 34 – Ajustement du nombre de fourches en deçà de 4m/h_{4m} en fonction de la taille, la surface terrière totale et l'indice de compétition total respectivement

Toutes les informations utilisées pour alimenter la réflexion sont, comme pour les six indicateurs des propriétés architecturales précédents, disponibles au sein des annexes B à E.

En guise de résumé, l'étude des P valeurs des coefficients des différentes variantes du modèle montre que le bloc et la taille peuvent être écartés du modèle final. La variante lm_7 du modèle est celle qui montre le BIC le plus bas et les variantes qui expliquent la compétition exercée par le voisinage par l'indice de compétition NCI plutôt que par la surface terrière BA présentent des BIC plus faibles ou équivalents. La procédure de sélection pas à pas ne choisit que l'indice de compétition du mélèze. La seule différence avec le nombre de fourches total ramené à la hauteur totale est donc que le modèle proposé par la procédure pas à pas est le modèle final pour cet indicateur du nombre de fourches en deçà de 4m ramené à une hauteur de 4m. La conclusion reste cependant identique : au plus la compétition exercée par le mélèze est importante au voisinage des chênes cibles, au moins

ceux-ci présentent de fourches dans les quatre premiers mètres. Le mélange chêne-mélèze ressort par conséquent, à nouveau sans équivoque, comme étant le plus approprié pour minimiser le nombre de fourches dans les quatre premiers mètres des chênes cibles. L'histogramme empilé est très ressemblant à celui de l'indicateur des fourches pour la hauteur totale et a donc été placé à l'annexe F (figure 25 de l'annexe).

4.4 Récapitulatif des résultats et des modèles choisis pour les différentes variables réponses

Cette dernière partie des résultats vise à résumer les informations données dans la sous-section précédente et à y apporter une conclusion, au travers du tableau récapitulatif 16. Cela permet également une transition vers la discussion, où les résultats seront analysés au vu de leur pertinence et de références à la littérature scientifique. Pour simplifier l'information par rapport aux descriptions des modèles choisis, pour chaque variable réponse, seules les compositions spécifiques qui portent exclusivement la lettre de la catégorie de valeurs moyennes prédites la plus basse sont retenues dans la troisième colonne du tableau (lettre issue de la comparaison des moyennes prédites par le modèle final entre compositions, voir les histogrammes empilés aux figures 23, 25, 27, 29, 31 et 33).

On remarque déjà que la composition spécifique chêne-mélèze est citée pour cinq des sept indicateurs des propriétés architecturales des chênes cibles. Il s'agit donc du mélange qui apparaît comme le plus bénéfique à la conformation des chênes cibles, en termes de nombre de fourches, de nombre de branches vivantes et de propriétés de la branchaison.

TABLEAU 16 – Récapitulatif des équations résultant des modèles choisis pour chacune des variables réponses, ainsi que des compositions spécifiques qui minimisent les valeurs moyennes prédites de chacune des variables réponses

Variables réponses	Equations des modèles choisis	Compositions spécifiques pour lesquelles les valeurs des variables réponses sont les plus intéressantes
h/d [-]	$-2,20 + 4,52 \times \text{bloc}[\text{Gouverneurs}] - 22,52 \times \ln(\text{hd}^2) + 290,52 \times \text{NCI}_{\text{dec}} + 166,47 \times \text{NCI}_{\text{douglas}} + 274,77 \times \text{NCI}_{\text{mélèze}}$	Chêne Chêne-hêtre Chêne-hêtre-douglas
Indicateur branchaison (Eq. (2)) [-]	$0,27 - 0,22 \times \ln(\text{hd}^2) - 2,96 \times \text{NCI}_{\text{tot}}$	Chêne-mélèze
Proportion du houppier vivant (Eq. (1)) (%)	$91,37 - 623,39 \times \text{NCI}_{\text{dec}} - 101,44 \times \text{NCI}_{\text{con}}$	Chêne-hêtre
Nombre de branches vivantes entre 0 et 4m	$20,28 + 47,62 \times \text{hd}^2 - 265,48 \times \text{NCI}_{\text{chêne}} - 164,99 \times \text{NCI}_{\text{hêtre}} - 251,96 \times \text{NCI}_{\text{érable}} - 75,51 \times \text{NCI}_{\text{con}}$	Chêne-mélèze
$\frac{\# \text{fourches}_{\text{tot}}}{l_{\text{houppier}}}$ (Eq. (3)) [m ⁻¹]	$0,75 - 4,03 \times \text{hd}^2 + 13,14 \times \text{NCI}_{\text{chêne}} + 29,51 \times \text{NCI}_{\text{érable}} - 1,87 \times \text{NCI}_{\text{mélèze}}$	Chêne-mélèze
$\frac{\# \text{fourches}_{\text{tot}}}{h_{\text{tot}}}$ (Eq. (4)) [m ⁻¹]	$0,64 - 2,17 \times \text{NCI}_{\text{mélèze}}$	Chêne-mélèze
$\frac{\# \text{fourches}_{<4m}}{h_{4m}}$ (Eq. (5)) [m ⁻¹]	$0,57 - 2,37 \times \text{NCI}_{\text{mélèze}}$	Chêne-mélèze

5 Discussion

5.1 Discussion globale

Premièrement, dans tous les modèles, l'indice de compétition du voisinage a été choisi plutôt que la surface terrière pour expliquer l'effet de la compétition exercée par les voisins car l'indice a mené à des résultats statistiques plus vraisemblables. Cela peut venir du fait que la contribution de chaque arbre dans l'indice de compétition est pondérée proportionnellement à sa taille et de manière inversement proportionnelle à la distance qui le sépare de l'arbre cible alors que, dans le cas de la surface terrière, seule la pondération par la taille est considérée. La prise en compte de la distance réelle qui sépare chaque chêne cible de ses voisins mesurés peut donc mieux expliquer l'effet de leur compétition sur le chêne central. En effet, la surface terrière prend compte, comme le NCI, de la grosseur des arbres voisins mais par contre la distance considérée est celle du rayon de mesure de la placette circulaire des essences et donc cette distance est fixe (voir point 3.4.2.2 pour les explications des variables explicatives caractérisant l'effet du voisinage sur l'architecture des chênes cibles). Cela démontre que considérer une distance effective apporte une plus-value dans la prédiction par rapport à la prise en compte de distances constantes (Canham *et al.*, 2004).

La taille ne varie pas significativement d'une composition spécifique à l'autre (voir point 4.2.3), ce qui se confirme visuellement sur les histogrammes empilés. Selon Pretzsch et Schütze (2015), le mélange n'influence en effet pas la taille moyenne mais bien sa gamme de distribution (voir figure 7), ce qui explique qu'une ANOVA testant l'effet de la composition spécifique sur la taille aboutisse à une valeur non significative.

La composition spécifique chêne-mélèze apparaît comme la plus bénéfique à cinq des sept indicateurs des propriétés architecturales des chênes cibles. L'effet de la concurrence exercée par le mélèze est le plus mis en évidence (pour rappel, corrélations de 0,93 entre NCI_{tot} et $NCI_{mélèze}$ et 0,96 entre $NCI_{conifères}$ et $NCI_{mélèze}$), suivi de la concurrence exercée par le chêne (pour rappel, corrélation de 0,88 entre $NCI_{décidus}$ et $NCI_{chêne}$).

On peut se demander pourquoi de tous les mélanges qui comportent à la fois du mélèze et du chêne, c'est celui ne comportant que ces deux essences qui ressort en priorité. Une possibilité est que ce mélange intrinsèque chêne-mélèze permette de valoriser au mieux les bénéfices de la complémentarité des vitesses de croissance de ces deux essences sur l'architecture des chênes. Le mélèze joue en effet un rôle d'abri important au vu de sa croissance en hauteur soutenue, ce qui pourrait contribuer à expliquer son influence bénéfique sur la qualité de la branchaison et la fourchaison. Le mélèze forme ainsi un abri vertical pour le chêne car il crée de l'ombre, au vu de sa hauteur plus importante, en réduisant la quantité de lumière qui atteint chaque chêne (voir le facteur couvert au point 2.1.3 parmi les facteurs qui déterminent l'architecture de l'arbre). De plus, le mélèze comprime latéralement les troncs de chêne, ce qui évite aussi l'apparition de branches basses ou redressées. Dans les autres mélanges à plus de deux essences comprenant du mélèze, il se peut donc que la compétition interspécifique avec les autres essences amoindrisse le bon fonctionnement de cette complémentarité chêne-mélèze. De plus, l'effet du mélèze diminue étant donné que sa proportion est moindre dans les mélanges à plus de deux essences.

Le mélèze ralentit cependant la croissance en grosseur des chênes cibles de par son rôle d'abri (voir plus loin 5.3.1), ce qui pourrait à terme mettre à mal la croissance et la survie des chênes. En fait,

l'effet du mélèze a évolué au cours du temps car son effet de compression latérale s'est progressivement transformé en abri vertical étant donné l'amplification du contraste entre les hauteurs du mélèze et du chêne avec le développement du mélange dans le temps. L'influence positive du mélèze sur la majorité des indicateurs des propriétés architecturales utilisés dans cette étude est donc à nuancer au vu de la pénalisation de la croissance en grosseur des chênes causée par la dominance en hauteur du mélèze, qui amoindrit les bénéfices initiaux de l'éducation des fûts de chêne.

En ce qui concerne les limites des prédictions réalisées, un premier point est le faible nombre d'individus mesurés. En effet, 106 chênes cibles sont pris en compte. Pour confirmer les conclusions tirées et corroborer les résultats, il faudrait élargir la taille de l'échantillon pour en améliorer la fiabilité statistique.

Pour chacun des modèles choisis comme les plus adéquats, les R^2 ajustés présentent des valeurs assez faibles, à part pour le facteur d'élancement dont la régression linéaire retenue montre un R^2 ajusté proche de 0,8. Pour les six autres indicateurs qualifiant les propriétés de l'architecture des chênes cibles, les R^2 sont compris entre 0,14 et 0,47 (valeurs de, dans l'ordre, 0,34, 0,47, 0,35, 0,25, 0,16 et 0,14). Ces valeurs traduisent un faible pouvoir de prédiction des modèles, avec des équations de régression modélisées qui ne sont capables d'expliquer qu'entre 14 et 47 % de la variabilité des observations (Patenaude et Mathieu, 2020). En fait, un modèle a été choisi pour chacune des variables réponses alors que la variable réponse n'est probablement parfois pas exclusivement expliquée par les variables explicatives à disposition. De plus, une part d'arbitraire réside dans la décision de conserver ou pas l'effet de la taille ou encore de mettre en évidence l'effet de certaines essences du voisinage mais pas d'autres. Cela peut venir du défaut de la méthode par sélection pas à pas qui ne tient pas compte de la cohérence biologique, écologique des variables sélectionnées et se base plutôt sur leur pouvoir explicatif sur le plan statistique.

Cependant, les modèles retenus donnent des résultats significatifs, ce qui rend compte de la contribution effective des variables explicatives. Une part plus importante de la variabilité reste toutefois inexpliquée, ce qui peut en partie s'expliquer par la différence de gamme de valeurs selon les variables réponses étudiées. En effet, expliquer une variable qui évolue dans une gamme de valeurs réduite est plus complexe.

Les paramètres α et β ont été fixés aux valeurs de 2 et 0,5 respectivement dans l'équation du NCI (équation (6)). La qualité de la prédiction de chaque variable réponse pourrait être améliorée en estimant ces deux paramètres pour chacune des cinq essences (Canham *et al.*, 2006) mais pour cela, un jeu de données de taille suffisante est nécessaire.

5.2 Complémentarité et redondance entre les indicateurs

Les quatre premiers indicateurs sont complémentaires. Cela peut se remarquer au travers des corrélations entre le nombre de branches vivantes entre 0 et 4m et les trois indicateurs suivants : facteur d'élancement, indicateur de branchaison et proportion du houppier vivant. Il présente en effet une corrélation de -0,52 avec le facteur d'élancement, 0,6 avec l'indicateur de branchaison, et 0,55 avec la proportion du houppier vivant. Ces quatre indicateurs rendent compte des effets de gainage et d'abri induits par la concurrence du voisinage, en particulier par celle du chêne et du mélèze. En effet, des arbres plus élancés présentent proportionnellement moins de branches (voir explications plus loin).

En ce qui concerne les indicateurs des fourches, seul un des trois pourrait être retenu, en fonction de l'intérêt du gestionnaire, étant donné la redondance qui existe entre eux (corrélations de 0,93 entre nombre de fourches_{tot}/h_{tot} et nombre de fourches_{tot}/l_{houppier}, 0,85 entre nombre de fourches_{tot}/h_{tot} et nombre de fourches_{<4m}/h_{4m} et 0,81 entre nombre de fourches_{tot}/l_{houppier} et nombre de fourches_{<4m}/h_{4m}).

5.3 Discussion par variable réponse

5.3.1 Facteur d'élancement

Le modèle choisi pour expliquer le facteur d'élancement des chênes cibles présente un R^2 ajusté de 0,78. Cela signifie que la régression linéaire se prête bien pour expliquer le rapport h/d par les effets du bloc, du logarithme de la taille et des indices de compétition des essences décidues, du douglas et du mélèze.

Le facteur d'élancement des chênes cibles est plus grand sur le site de Gouverneurs que sur celui de Gribelle, ce qui peut s'expliquer par une fertilité du site plus importante (voir explications point 4.2.2). En effet, l'allocation des ressources se fait prioritairement dans la croissance en hauteur (croissance primaire) par rapport à la croissance en grosseur (croissance secondaire) et donc, si les ressources nutritives sont plus abondantes sur le site de Gouverneurs, celles-ci seront prioritairement allouées à la croissance en hauteur dans le jeune âge. De plus, les ressources individuelles par arbre sont plus faibles étant donné que la concurrence est plus élevée à Gouverneurs et donc la croissance en grosseur des chênes est défavorisée (Barnes *et al.*, 1998). En effet, comme la compétition, qui traduit elle-même des conditions de site plus favorables, est plus forte à Gouverneurs (voir point 4.2.2), la croissance en grosseur des chênes y est proportionnellement plus réduite. La figure 35 illustre les priorités d'allocation du carbone au sein des différentes parties d'un arbre. De plus, dans un site plus fertile, la compétition pour la lumière se manifeste plus vite et plus fortement, et donc une lutte pour l'accès à la lumière pourrait expliquer un plus fort élancement.

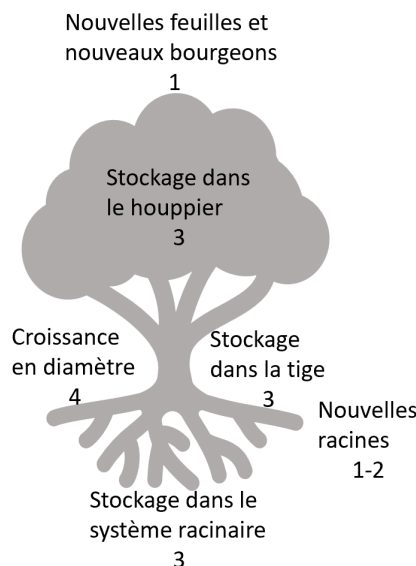


FIGURE 35 – Allocation du carbone : les parties de l'arbre dont les chiffres sont les plus petits correspondent à une priorité d'allocation supérieure (adapté de Barnes *et al.*, 1998)

Pour l'effet de la taille sur le facteur d'élancement, il n'est pas surprenant que la relation soit inversement proportionnelle (corrélation de -0,6 entre le facteur d'élancement et le logarithme de la

taille, voir annexe G) étant donné que la taille est proportionnelle au carré du diamètre à 1m30 et donc l'impact de la croissance en diamètre est plus important que celui de la croissance en hauteur totale. L'augmentation de la taille (proxi du volume) engendre alors une décroissance du rapport h/d . La taille est la variable explicative contribuant le plus à la valeur moyenne prédite du rapport h/d (voir histogramme empilé figure 23). Cela s'explique par le fait que le facteur d'élancement et la taille des arbres contiennent les deux mêmes variables : le diamètre à hauteur de poitrine et la hauteur totale.

Comme expliqué lors de la description de l'histogramme empilé du facteur d'élancement prédit à la figure 23, la compétition exercée par le mélèze est la deuxième variable explicative contribuant le plus à la moyenne prédite (après la taille), et explique les différences de valeurs du facteur h/d entre les compositions spécifiques, étant donné le contraste entre la hauteur totale d'un chêne et celle d'un mélèze. Le facteur d'élancement présente, comme mentionné précédemment, une corrélation de 0,64 avec l'indice de compétition du mélèze. La pression concurrentielle exercée par les mélèzes, étant beaucoup plus hauts (10,5 mètres environ), accentue le déficit de croissance en grosseur chez les chênes. En effet, comme la disponibilité en lumière est limitée, les chênes répondent au stress en désinvestissant dans la croissance en grosseur pour donner la priorité à la croissance en hauteur et rester dans la course pour accéder à la lumière (Sevrin, 1997 ; Barnes *et al.*, 1998). Les chênes sessiles présentent en particulier une grande plasticité phénotypique de croissance en adaptant davantage leur mécanisme d'allocation à leur environnement. Les variations de l'allocation de croissance sont déterminées par la densité du peuplement et le statut social de l'arbre, lesquels peuvent constituer des indicateurs de la pression concurrentielle et de l'accès à la lumière. La plasticité phénotypique des chênes en association avec les mélèzes se marque donc davantage car les chênes occupent un statut plus dominé et expérimentent ainsi un degré de compétition plus important. Les arbres surcimés montrent alors un investissement supérieur dans leur croissance en hauteur relativement à leur croissance en grosseur par rapport aux arbres dominants (Trouvé *et al.*, 2015).

La compétition exercée par les essences joue un rôle de gainage des troncs des chênes cibles, ce qui mène à une augmentation du facteur h/d . Un facteur de 100 environ est attendu pour des chênes jeunes de 7cm de diamètre à hauteur de poitrine (dbh moyen des chênes cibles, voir tableau 6) (Stăncioiu *et al.*, 2021 ; Tian *et al.*, 2023). Comme la valeur moyenne prédite du facteur d'élancement est proche de 100 (voir tableau 9), la stabilité des mélanges en l'état actuel n'est donc, en moyenne, pas considérée à risque. Pour l'instant, les chênes sont toujours en phase d'éducation et donc la hauteur du fût n'est pas encore atteinte, mais il faut quand-même veiller à ce que les peuplements restent stables par la suite. Pour assurer la stabilité des peuplements face aux vents, les compositions spécifiques d'intérêt doivent être celles qui tendent à minimiser le facteur d'élancement car plusieurs mélanges exposent un facteur d'élancement des chênes supérieur à 100 (histogramme empilé figure 23). Cependant, il est en fait difficile d'identifier un nombre restreint de compositions spécifiques qui minimiseraient le facteur d'élancement des chênes cibles étant donné que la majorité des compositions présentent des valeurs prédites non significativement différentes. Comme les mélanges avec du mélèze augmentent le rapport h/d des chênes cibles, les cinq mélanges sans mélèze semblent à privilégier par rapport à ceux avec mélèze afin de réduire les risques d'instabilité. Cependant, la stabilité du peuplement ne dépend pas que des chênes mais de l'ensemble du peuplement. De plus, ce sont surtout les arbres dominants qui confèrent au peuplement sa stabilité, à savoir ici les mélèzes. Le risque d'instabilité est donc contrebalancé par le fait que les mélèzes protègent les chênes du vent et que les chênes sont à un stade de développement peu à risque de chablis.

La figure 36 illustre le lien entre le facteur d'élancement et la stabilité au vent (Freytet *et al.*, 2020). Une fois la phase d'éducation achevée, la compétition conditionnée par le mélèze devra ainsi être régulée pour améliorer cet aspect lié à la stabilité des chênes d'avenir. Il conviendra donc de passer en éclaircie pour libérer les arbres d'avenir de la concurrence et permettre leur grossissement pour rééquilibrer le rapport entre leur hauteur et leur grosseur. Cependant, l'éclaircie devra être légère et réalisée de manière progressive pour éviter que les chênes cibles ne se couvrent de gourmands par une éclaircie trop brutale (Sevrin, 1997). En effet, l'investissement prioritaire dans la croissance en hauteur chez les jeunes arbres est valorisé, grâce à la densité importante, pour obtenir une hauteur de fût souhaitée (six à huit mètres pour des chênes), avec un minimum de branches basses (Office National des Forêts, 2010). Ensuite, la concurrence est libérée pour favoriser la croissance en grosseur et le développement du houppier (Daniel *et al.*, 1979 ; Barnes *et al.*, 1998).

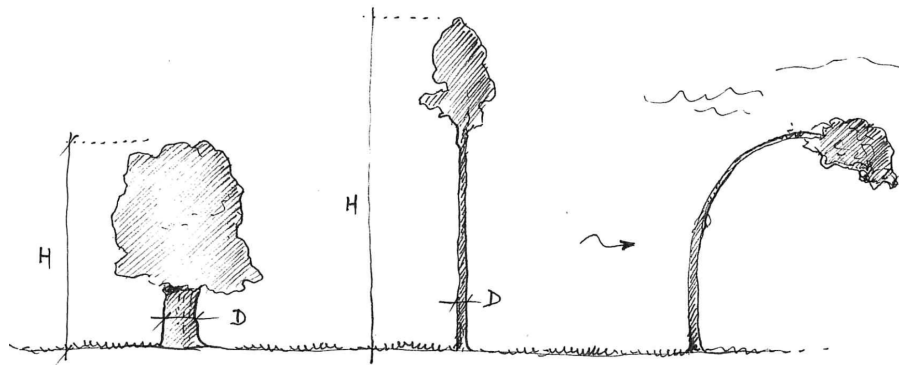


FIGURE 36 – Le rapport entre la hauteur totale de l'arbre et son diamètre mesuré à 1,30 m est un indicateur de sa stabilité (Freytet *et al.*, 2020). Dans les peuplements peu éclaircis, les arbres ne grossissent pas suffisamment par rapport à leur croissance en hauteur. Ils présentent alors une stature élancée, les rendant vulnérables vis-à-vis des coups de vent (risque de rupture ou de flexion).

5.3.2 Indicateur de branchaison

Pour rappel, le modèle choisi pour l'indicateur de branchaison retient les effets du logarithme de la taille et de l'indice de compétition du voisinage total. Parmi les indices de compétition des cinq essences, ce sont ceux du mélèze, puis du chêne, qui exercent le plus d'impact sur les valeurs moyennes prédites de cet indicateur. L'indicateur de branchaison a été affranchi du statut social des chênes en le ramenant au diamètre à hauteur de poitrine au carré. Ce choix dans la conception de l'indicateur a donc impacté le choix du modèle qui, sans normalisation par le diamètre à 1m30 au carré des chênes cibles, aurait été différent. Les résultats pourraient être comparés avec un indicateur ne prenant pas en compte la section de l'arbre, pour évaluer dans quelle mesure ce choix dans la conception de l'indicateur a influencé la sélection du modèle.

Comme pour le facteur d'élancement, la relation entre la compétition exercée par le voisinage et l'indicateur pénalisant la branchaison traduit un effet de gainage et d'abri des chênes cibles, en particulier dans le mélange chêne-mélèze. L'indicateur montre donc que la concurrence a un effet bénéfique sur les propriétés de la branchaison des chênes cibles. Cependant, l'indicateur ne permet pas de déterminer la part de l'effet sur la proportion de branches mortes, l'inclinaison des branches et leur diamètre. Des indicateurs plus spécifiques pourraient être développés pour identifier plus spécifiquement les propriétés de la branchaison améliorées par l'effet de la compétition.

La hauteur totale des chênes cibles présente une corrélation de -0,65 avec l'indicateur de branchaison. Comme la hauteur totale et le logarithme de la taille ($\text{dbh}^2 \times h$) ont une corrélation de 0,78, cela peut expliquer la relation inversement proportionnelle entre l'indicateur de branchaison et le logarithme de la taille, ainsi que la contribution importante de la taille aux valeurs moyennes prédites de l'indicateur. Cette relation traduit à nouveau l'effet de gainage et d'abri induit par la concurrence exercée par les voisins car les arbres en moyenne plus hauts sont ceux qui présentent moins de branches basses vivantes et dont la branchaison est plus fine et moins abondante (Sevrin, 1997). L'indice de compétition du voisinage total et la hauteur totale présentent d'ailleurs une corrélation de 0,54, ce qui appuie ce propos.

5.3.3 Proportion du houppier vivant

Un peuplement stable face au vent se caractérise non seulement par des arbres dont le facteur d'élancement est inférieur à 100 dans le jeune âge mais aussi dont le houppier occupe entre 50% et 90% de la hauteur totale (Soares et Tomé, 2001 ; Kantola et Mäkelä, 2004 ; Stăncioiu *et al.*, 2021). Les houppiers vivants des chênes cibles occupent en moyenne environ 72% de leur hauteur totale (voir tableau 9). Comme la proportion du houppier vivant devrait tendre à terme vers une part de 50% de la hauteur totale (Sevrin, 1997), comme illustré à la figure 37, les mélanges d'intérêt pour cet aspect sont ceux qui minimisent cette part de branches vivantes. Les valeurs observées de la proportion du houppier vivant entretiennent une corrélation de -0,57 avec le NCI des essences feuillues et les mélanges de chênes-hêtres apparaissent comme appropriés pour minimiser la proportion du houppier vivant (voir explications 4.3.3.3).

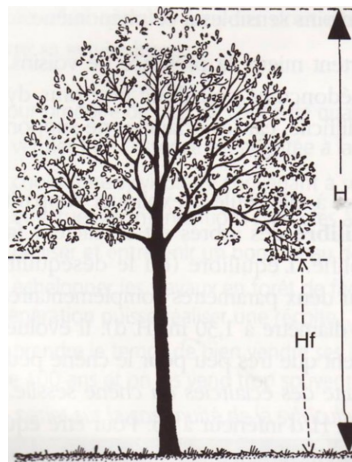


FIGURE 37 – *Proportion du houppier vivant attendue au terme d'exploitabilité : la proportion du houppier vivant de l'arbre occupe la moitié de sa hauteur totale (Sevrin, 1997)*

Cependant, les résultats préliminaires aux figures 20 et 21 montrent que la composition spécifique chêne-hêtre exerce une concurrence moyenne significativement plus faible, en particulier par rapport au mélange chêne-mélèze. Ce paradoxe s'explique probablement parce que la concurrence n'est pas le seul paramètre entrant en compte. La nature de l'espèce, notamment sa tolérance à l'ombrage et donc sa vitesse de croissance en hauteur dans le jeune âge par rapport au chêne, est en effet susceptible d'impacter la proportion du houppier. Le mélèze est effectivement une essence intolérante à l'ombrage et donc, en comparaison du hêtre, qui est une essence très tolérante à l'ombrage, son impact sur la récession du houppier d'une autre essence à croissance moins rapide est *a priori* plus limité. Toutefois, le mélèze joue un rôle d'abri plus fort que le hêtre au vu de sa croissance en hauteur soutenue.

Il s'agit donc surtout d'une question de la manière avec laquelle cette concurrence s'exerce, à savoir soit latéralement soit verticalement. De plus, la valeur moyenne prédite de la proportion du houppier vivant dans la composition spécifique chêne-hêtre n'est pas significativement différente de celle de la composition spécifique chêne-mélèze (voir histogramme empilé figure 27).

La constante occupe la majeure place dans la valeur moyenne prédite de la proportion du houppier (voir histogramme empilé à la figure 27). Cela peut s'expliquer par le fait que cet indicateur soit relativement invariable d'une composition spécifique à l'autre.

La proportion du houppier vivant est expliquée par les effets de la concurrence exercée par les essences décidues et résineuses, séparées en deux groupes. Ces effets des voisins sur la part de tronc exempt de branches vivantes traduisent à nouveau un effet de gainage, et d'abri, grâce à l'ombrage des troncs procuré par la densité de plantation, ce qui limite l'apparition de branches basses (Kantola *et al.*, 2007). L'acquisition d'une longueur de bille élaguée sur une certaine hauteur est toutefois un objectif cultural essentiel dans les jeunes plantations. Il faudra donc élaguer les branches basses pour obtenir les six mètres environ de fût souhaités chez le chêne, même si l'abri latéral apporté par le voisinage ne peut que contribuer à minimiser le nombre de ces branches basses.

5.3.4 Nombre de branches vivantes entre 0 et 4m

Les chênes de gros volume tendent à présenter plus de branches vivantes. Cela peut simplement s'expliquer par le fait que les individus de plus grosse dimension occupent une position sociale plus avantageuse, avec un statut plus dominant, et disposent donc d'un meilleur accès à la lumière (Schütz, 1975). Les arbres plus gros présentent ainsi proportionnellement plus de branches vivantes que les arbres de statut social moins avantageux. Cela peut paraître contradictoire avec la relation entre la taille et l'indicateur pénalisant la branchaison, qui est inversement proportionnelle. Cependant, l'indicateur pénalisant la branchaison ne concerne pas que la vitalité des branches, il inclut aussi l'information de leur diamètre et leur inclinaison.

Étant donné que la taille a été conservée pour prédire l'indicateur de branchaison et le nombre de branches vivantes dans les quatre premiers mètres, le retrait de l'effet de la taille peut être critiqué dans la régression linéaire modélisée pour la proportion du houppier vivant, en particulier au vu des P valeurs de l'effet de la taille pour cet indicateur (voir les différentes variantes du modèle testées au tableau 4 annexe C). En fait, la sélection par la procédure pas à pas pour la proportion du houppier (voir tableau 13 annexe E) montre une P valeur de 0,06 pour hd^2 . Cela met en avant la part d'arbitraire dans le choix de prendre tel ou tel critère de qualité statistique (AIC, BIC, R^2 ,...) ou seuil de P valeur. Les variables sélectionnées peuvent donc différer selon la manière dont la procédure de sélection a été paramétrée. La méthode est en fait loin d'être parfaite et l'approche statistique est basée sur la plus grande probabilité et non sur des relations de causalité avérées.

5.3.5 Nombre de fourches total ramené à la longueur du houppier vivant

Les résultats montrent que les chênes de plus gros volume présentent proportionnellement moins de fourches pour une même part de leur hauteur totale occupée par des branches vivantes, ce qui peut à nouveau être mis en lien avec le statut social individuel. En effet, les arbres de plus gros volume profitent d'un statut plus dominant et donc d'une meilleure accessibilité à la lumière. Par opposition, les arbres de statut plus dominé, ce qui traduit une croissance dans un environnement caractérisé par

des conditions de concurrence plus importantes, tendent donc à développer des branches plus verticales pour maximiser leur accès à la lumière (Longuetaud *et al.*, 2013).

En fait, la longueur du houppier et la taille sont liées par une corrélation de 0,53, ce qui remet en cause l'influence effective de la taille sur le nombre de fourches. Au plus la taille des chênes augmente, au plus la longueur de leur houppier est importante (voir annexe H). Cela signifie que pour un nombre de fourches absolu constant, le nombre de fourches par mètre de houppier décroît pour les arbres de taille supérieure. Une autre explication possible est que les fourches peuvent se former puis disparaître tout au long du développement des chênes (Lemaire, 2010).

Au niveau du choix du modèle final, pour rappel, seuls les indices de compétition du chêne, de l'érable et du mélèze sont conservés. Hormis la compétition exercée par le mélèze, les autres essences présentent une corrélation positive avec le nombre de fourches total ramené à la longueur du houppier et donc leur compétition engendre une augmentation du nombre de fourches par mètre de houppier. En fait, le chêne constitue un abri vertical moindre que le mélèze, dû à sa croissance lente, et est intolérant à l'ombrage, ce qui peut expliquer une propension accrue à la fourchaison du chêne étant donné sa faible capacité à fournir une compression verticale sur lui-même (Office National des Forêts, 2010). Le mélèze est très intolérant à l'ombrage mais présente à la différence une croissance juvénile forte (Fourchy, 1952). Cela confirmerait le rôle de compression verticale exercé par le mélèze en tamisant la lumière. L'érable sycomore a quant à lui rencontré des difficultés de reprise sur le site de Gedinne, liées à l'installation des plants. De plus, son aptitude stationnelle n'y est pas optimale. Ces éléments, à côté du fait que l'érable tolère moyennement l'ombrage au stade juvénile, pénalisent sa croissance, laquelle est initialement déjà moins soutenue au vu de sa faible croissance sous des niveaux d'éclairement réduits (Lestrade *et al.*, 2013). C'est pourquoi il n'influence pas du tout les chênes du point de vue de leur architecture. Cela se confirme au regard de son diamètre moyen inférieur par rapport aux autres essences (tableau 7).

L'indice de compétition du douglas n'a pas été pris en compte, ce qui peut être remis en question. En effet, au regard des coefficients estimés du modèle le plus complet et de leur P valeur (voir lm_11 tableau 6 annexe C), on peut comprendre que l'indice de compétition du hêtre ait été écarté mais par contre l'indice de compétition du douglas apparaît comme plus significatif que celui du mélèze... Visuellement, le retrait du NCI du douglas ne paraît pas non plus justifié au vu de sa contribution aux valeurs moyennes prédites de l'indicateur sur l'histogramme 22, annexe F, qui est assez similaire à celle des NCI de l'érable et du mélèze. Ceci met à nouveau en évidence la part d'arbitraire qui réside dans le choix d'utiliser le BIC comme critère de sélection statistique ou dans celui d'utiliser un seuil de significativité à une P valeur de 0,05.

5.3.6 Nombre de fourches total ramené à la hauteur totale et nombre de fourches entre 0 et 4m ramené à une hauteur de 4m

Pour rappel, les nombres de fourches total ramené à la hauteur totale et en deçà de quatre mètres ramené à une hauteur de quatre mètres sont traités ensemble car ces deux indicateurs sont expliqués tous deux par l'indice de compétition du mélèze uniquement. En fait, l'indice de compétition du mélèze est lié à la hauteur totale des chênes cibles. Au plus la compétition exercée par le mélèze est importante au voisinage des chênes cibles, au plus la hauteur de ceux-ci est importante (la P valeur de la relation est inférieure à 0,0001). Cela justifie que le modèle final ne conserve que l'indice de com-

pétition du mélèze pour expliquer un indicateur dont la référence est la hauteur totale des chênes cibles.

Au vu de la ressemblance entre les ajustements des trois indicateurs de la fourchaison en fonction de la taille aux figures 30, 32 et 34, il semble surprenant que la régression linéaire choisie pour le nombre de fourches total ramené à la longueur du houppier conserve l'effet de la taille mais pas les régressions linéaires des deux indicateurs des fourches suivants. Cela peut en fait venir du fait que les arbres de volume plus important ont un houppier vivant plus long, comme expliqué précédemment. L'analyse des P valeurs du modèle le plus complet lm_11 pour le nombre de fourches_{tot}/ h_{tot} , au tableau 7 de l'annexe C, illustre toutefois à nouveau la part d'arbitraire dans le choix de retirer ou conserver l'une ou l'autre variable explicative. En effet, la taille y présente une P valeur de 0,0529 (pour une P valeur de 0,0312 pour le NCI du mélèze). De même, l'effet du chêne paraît avoir un impact tout aussi important pour chacun des trois indicateurs au regard de la comparaison des histogrammes empilés pour les modèles complets (figures 22 à 24 annexe F). Au tableau 8 de l'annexe C, le modèle complet pour le nombre de fourches_{<4m}/ h_{4m} montre effectivement une P valeur de 0,0771 pour le NCI du chêne (pour une P valeur de 0,0779 pour le NCI du mélèze).

6 Conclusions et perspectives

Ce mémoire a pour objectif d'étudier l'effet du mélange sur les propriétés architecturales de chênes sessiles en phase d'éducation, en testant différents niveaux de richesse et au sein de ces niveaux, différentes compositions spécifiques. Dix modalités de mélange sont de ce fait étudiées et reposent sur les combinaisons de cinq essences : le chêne sessile (*Quercus petraea*), le hêtre (*Fagus sylvatica*), l'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus*), le mélèze (*Larix decidua*) et le douglas (*Pseudotsuga menziesii*). Ainsi, dans le cadre de la recherche sur la conception de plantations mélangées dont les proportions du mélange et la qualité sont conservées au cours de leur développement, l'étude vise à déterminer si certains mélanges peuvent bénéficier aux propriétés architecturales de chênes cibles.

Sept indicateurs ont été utilisés pour qualifier les propriétés architecturales des chênes objectifs. L'impact de variables liées à l'arbre et à son voisinage sur ces indicateurs a été testé à l'aide de régressions linéaires, suite à une collecte de données sur le terrain. Une régression linéaire a été modélisée pour chaque variable réponse. Ainsi, les modèles expliquent les variables réponses suivant trois variables explicatives : le site considéré (présence de deux blocs différents), la taille des chênes objectifs et la compétition exercée par les essences des différents mélanges sur les chênes cibles (exprimée par la surface terrière ou l'indice de compétition du voisinage).

Le bloc et la taille des chênes sont souvent liés car le bloc Gouverneurs a un sol plus fertile, ce qui se traduit par une taille en moyenne plus importante par rapport au site de Gribelle (voir points 3.4.4 et 4.2.2). Considérer les effets du bloc et de la taille mène donc souvent à une redondance de l'information. Cela explique qu'en dehors du premier indicateur, le facteur d'élancement, les six autres indicateurs ne considèrent que l'effet de la taille ou aucun des deux effets. La taille est dépendante du bloc mais elle est cependant indépendante de la composition spécifique. La surface terrière totale et l'indice de compétition du voisinage total dépendent quant à eux à la fois du bloc et de la composition spécifique (voir points 4.2.2 et 4.2.3).

L'utilisation d'un indice de compétition du voisinage (NCI) résulte en de meilleurs ajustements que celle de la surface terrière pour traduire l'effet de la compétition exercée par les essences. En effet, l'indice tient compte, en plus de la section des tiges à hauteur de poitrine, de la distance effective qui sépare les chênes cibles de leurs voisins mesurés.

L'analyse en composantes principales du jeu de données fait apparaître des corrélations significatives entre les différents indices de compétition, lesquelles mettent en évidence la concurrence prononcée exercée par le mélèze. En effet, l'indice de compétition du mélèze est très corrélé à la fois au NCI des conifères mais aussi au NCI total des cinq essences. De plus, le NCI des essences décidues est principalement représenté par la compétition du chêne, puis du hêtre.

Les régressions linéaires modélisées présentent une série de limites, qui peuvent partiellement venir du fait que seules les propriétés de l'architecture de 106 chênes cibles ont été mesurées. Cet échantillon de la population pourrait être agrandi pour rendre les résultats plus robustes statistiquement parlant. Ensuite, les R^2 ajustés des sept régressions linéaires modélisées montrent qu'à part pour le facteur d'élancement, les régressions linéaires ont un faible pouvoir de prédiction des variables réponses. Cependant, les modèles retenus, ainsi que les variables explicatives choisies, sont significatifs. Pour terminer, quelques incohérences ressortent de la comparaison des modèles retenus pour chaque

variable réponse étant donné que la sélection des variables explicatives par la procédure pas à pas ne tient pas compte de la cohérence biologique, écologique des variables sélectionnées et ne se base que sur leur pouvoir explicatif d'un point de vue statistique. En effet, la procédure se base sur un seuil de significativité de 0,05 et le critère de qualité statistique BIC. De plus, elle n'intègre pas l'information des différentes variables réponses ensemble, elle les traite séparément (à la différence d'une personne, la procédure n'est pas capable de juger de la cohérence entre les modèles choisis pour chacune des différentes variables réponses).

La configuration idéale pour les chênes peut être définie selon les sept indicateurs employés. Le facteur d'élancement moyen des chênes cibles doit rester sous une valeur de 100 pour assurer la stabilité des peuplements. Cette affirmation est cependant à nuancer par le fait que la stabilité dépend de l'ensemble du peuplement, or les chênes ne représentent qu'une partie du peuplement. En ce qui concerne l'indicateur de branchaison, sa valeur est souhaitée la plus petite possible, pour obtenir une bille de pied comportant le moins de branches vivantes possible, et dont le diamètre et l'inclinaison par rapport à l'horizontale sont les plus faibles possibles. Ensuite, à propos de la proportion du houppier vivant, sa valeur devrait être comprise entre 50 et 90% dans le jeune âge et devrait à terme tendre vers 50% de la hauteur totale. Pour les quatre autres indicateurs (nombre de branches vivantes en deçà de quatre mètres, nombre de fourches total ramené à la longueur du houppier vivant, nombre de fourches total ramené à la hauteur totale et nombre de fourches entre 0 et 4m ramené à une hauteur de 4m), leur valeur devrait être minimisée pour éduquer des chênes de configuration idéale.

La discussion a ainsi permis de confirmer que le mélange chêne-mélèze est celui qui bénéficie le plus aux propriétés architecturales des chênes cibles. En effet, la complémentarité des vitesses de croissance entre les deux essences mène à une compression à la fois latérale des troncs de chêne par le mélèze, dans les premières années après la plantation, et verticale, car le mélèze forme ensuite un abri vertical réduisant l'apport en lumière. Cette compression latérale puis verticale permet de limiter les branches basses et redressées. L'association chêne-mélèze permet ainsi de profiter de l'allocation prioritaire des ressources dans la croissance en hauteur, et donc du désinvestissement dans la croissance en grosseur, pour acquérir une hauteur de fût souhaitée de qualité, en minimisant les valeurs moyennes des indicateurs architecturaux employés, à l'exception du facteur d'élancement. En effet, en ce qui concerne cet indicateur, l'association chêne-mélèze constitue un facteur d'instabilité des peuplements face au vent. Ce risque ne porte néanmoins que sur des chênes qui d'une part ne sont pas très sensibles, étant donné leur jeune âge, et qui d'autre part sont protégés par les mélèzes, lesquels contribuent plus à la stabilité du peuplement que les chênes de par leur statut dominant dans le peuplement. La compétition exercée par le mélèze sera toutefois régulée par des éclaircies légères et progressives, lesquelles permettront aussi d'assurer la survie et la croissance du chêne en présence de mélèze.

Au vu des relations entre les indicateurs des propriétés architecturales des chênes cibles et la taille, les arbres de plus gros volume apparaissent comme moins élancés et présentent plus de branches vivantes dans les quatre premiers mètres. Cependant, la taille est inversement proportionnelle à l'indicateur pénalisant la branchaison et est associée à un nombre de fourches plus restreint. Les arbres de volume important présentent donc plus de branches vivantes mais moins dont l'angle par rapport à la verticale est inférieur à 30°. Au vu de la corrélation positive entre la taille et la longueur du houppier vivant cependant, qui fait que pour un même nombre de fourches, un chêne de volume supérieur aura un rapport nombre de fourches total/longueur du houppier plus faible, l'influence effective de la taille sur le nombre de fourches reste à nuancer. Pour traduire l'effet de la taille sur le diamètre des

branches, un indicateur pourrait être ajouté, car cet effet ne transparaît pas explicitement au travers des indicateurs utilisés.

En conclusion, le travail montre que le mélange peut améliorer les propriétés architecturales des chênes sessiles en phase d'éducation, et donc leur qualité, par rapport à une plantation de chênes pure. Plus particulièrement, les plantations de chêne-mélèze ont été identifiées comme les plus bénéfiques à la conformation des chênes cibles, en termes de nombre de fourches, de nombre de branches vivantes et de la proportion de branches vivantes par rapport à la hauteur totale. Cela s'explique par la hauteur contrastée des chênes par rapport à celle des mélèzes (hauteurs moyennes de 6,6 et 10,5 m), ce qui fournit un abri vertical aux troncs de chêne, suite à un effet d'abri latéral dans un premier temps, au cours des premières années suivant la plantation. Cette amélioration de la qualité en plantation mélangée implique donc également une réduction potentielle de l'intervention humaine par rapport aux peuplements monospécifiques mais dans une certaine mesure seulement, puisque la croissance et la survie ultérieures du chêne associé au mélèze nécessiteront des éclaircies en faveur du chêne.

Références

- [1] Angelier, A., 2007. Douglasaies françaises. Guide des sylvicultures. Office Nationale des Forêts, Paris, 296 p.
- [2] Ashton, P.M.S., Ducey, M.J., 1997. The development of mixed species plantations as successional analogues to natural forest. In : Landis, T.D., South, D.B., tech coords (Eds.), National Proceedings : Forest and Conservation Nursery Associations. U.S. Department of Agriculture Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, OR, pp. 113e126.
- [3] Asner, G. P., Martin, R. E., & Knapp, D. E., 2011. Imaging the canopy : implications for mapping and measuring carbon, water, and biodiversity. In Remote sensing of terrestrial carbon cycle processes (pp. 27-60). Springer, Dordrecht.
- [4] Assmann, E., 1970. The principles of forest yield study. Pergamon Press, Oxford
- [5] Balvanera, P., Pfisterer, A.B., Buchmann, N., He, J.S., Nakashizuka, T., Raffaelli, D., Schmid, B., 2006. Quantifying the evidence for biodiversity effects on ecosystem functioning and services. Ecol. Lett. 9, 1146–1156.
- [6] Balvanera, P., Siddique, I., Dee, L., Paquette, A., Isbell, F., Gonzalez, A., Byrnes, J., O'Connor, M.I., Hungate, B.A., Griffin, J.N., 2013. Linking biodiversity and ecosystem services : current uncertainties and the necessary next steps. Bioscience 64 (1), 49e57. <https://doi.org/10.1093/biosci/bit003>.
- [7] Barnes, B.V., D.R. Zak, S.R. Denton and S.H. Spurr, 1998. Forest ecology. John Wiley and Sons, New York, 774 p.
- [8] Barthélémy, D., Caraglio, Y., 2007. Plant architecture : a dynamic, multilevel and comprehensive approach to plant form, structure and ontogeny. Annals of Botany, 99(3), 375-407.
- [9] Bauhus, J., Forrester, D.I., Gardiner, B., Jactel, H., Vallejo, R., Pretzsch, H., 2017a. Ecological Stability of Mixed-Species Forests. In : Pretzsch H, Forrester DI, Bauhus J (eds) Mixed-species forests. Springer, Berlin
- [10] Bauhus, J., Forrester, D.I., Pretzsch, H., Felton, A., Pyttel, P., Benneter, A., 2017b. Silvicultural Options for Mixed-Species Stands. In : Pretzsch H, Forrester DI, Bauhus J (eds) Mixed-species forests. Springer, Berlin
- [11] Bayer, D., Seifert, S., Pretzsch, H., 2013. Structural crown properties of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* [L.]) in mixed versus pure stands revealed by terrestrial laser scanning. Trees – Struct. Funct. 27, 1035–1047.

- [12] Bock L. (coord.), 2007. Légende de la Carte Numérique des Sols de Wallonie – version 2. Gembloux, Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux, Laboratoire de Géopédologie, en relation avec le PCNSW (convention pour le compte de la Région Wallonne – DGA).
- [13] Bolte, A., Rahmann, T., Kuhr, M., Pogoda, P., Murach, D., Gadow, K., 2004. Relationships between tree dimension and coarse root biomass in mixed stands of European beech (*Fagus sylvatica* L.) and Norway spruce (*Picea abies*[L.] Karst.). *Plant Soil* 264 (1e2), 1e11. <https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000047777.23344.a3>.
- [14] Bouwmana, M., Forrester, D.I., den Oudena, J., Nabuursa, G.-J., Mohrena, G.M.J., 2021. Species interactions under climate change in mixed stands of Scots pine and pedunculate oak. *Forest Ecology and Management* 481 118615. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118615>
- [15] Bréda, N., Huc, R., Granier, A., Dreyer, E., 2006. Temperate forest trees and stands under severe drought : a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of forest science*, 63(6), 625-644.
- [16] Broadhurst, L.M., Jones, T.A., Smith, F.S., North, T., Guja, L., 2016. Maximizing seed resources for restoration in an uncertain future. *Bioscience* 66, 73–79. <https://doi.org/10.1093/biosci/biv155>.
- [17] Brockerhoff, E.G., Jactel, H., Parrotta, J.A., Ferraz, S.F., 2013. Role of eucalypt and other planted forests in biodiversity conservation and the provision of biodiversity-related ecosystem services. *For. Ecol. Manag.* 301, 43e50. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.09.018>.
- [18] Canham, C.D., LePage, P.T., Coates, K.D., 2004. A neighborhood analysis of canopy tree competition : effects of shading versus crowding. *Canadian Journal of Forest Research* Vol. 34 : 778–787 doi : 10.1139/X03-232
- [19] Canham, C.D., Thomas, R.Q., 2010. Frequency, not relative basal area, of temperate tree species varies along light gradients. *Ecology*, 91(6), 1816-1823.
- [20] Carnol, M., Baeten, L., Branquart, E., Gregoire, J.-C., Heughebaert, A., Muys, B., Ponette, Q., Verheyen, K., 2014. Ecosystem services of mixed species forest stands and monocultures : comparing practitioners' and scientists' perceptions with formal scientific knowledge. *Forestry* 87, 639–653.
- [21] Carnus, J.M., Parrotta, J., Brockerhoff, E., Arbez, M., Jactel, H., Kremer, A., Ponette, Q., Walters, B., 2006. Planted forests and biodiversity. *J. For.* 104 (2), 65e77.
- [22] Chen, Y., Hao, Z., Liu, Q., Li, J., 2018. Light requirements and leaf characteristics of dominant species across different forest types in the Qinling Mountains, China. *Forest Ecology and*

- Management, 410, 85-94.
- [23] Curry, W.T., Endersby, H.J., 1965. The Effect of Pruning on the Value of Home-Grown Softwoods (Ed HMSO). Forest Products Research Laboratory Special Report, London.
 - [24] Daniel, T.W., Helms, J.A., Baker, F.S., 1979. Principles of silviculture. Utah State Univ., Utah, USA. No.Ed. 2 pp.xii + 500 pp. ref.700
 - [25] De Reffye, P., Edelin, C., Franck, N., Jaeger, M., Puech, C., 1988. Plant growth models based on architecture and development. *Physiologia Plantarum*, 77(2), 181-187.
 - [26] Duchateau, E., Auty, D., Mothe, F., Longuetaud, F., Ung, C.H., Achim, A., 2015. Models of knot and stem development in black spruce trees indicate a shift in allocation priority to branches when growth is limited. *PeerJ* 3, e873.
 - [27] FAO, 2021. Évaluation des ressources forestières mondiales 2020 : Rapport principal. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca9825fr>
 - [28] Forest Europe, UNECE and FAO, 2011. State of Europe's Forests 2011. Status & Trends in Sustainable Forest Management in Europe. Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe. FOREST EUROPE Liaison Unit Oslo, P.O. Box 115, NO-1431 Aas, Norway. 337 p. http://www.unece.org/fileadmin/DAM/publications/timber/Forest_Europe_report_2011_web.pdf.
 - [29] Forest & Nature Lab, 2011. FORBIO (Belgium). Ghent University, Belgium. <https://treediv-net.ugent.be/ExpFORBIO.html>. Consulté le 6 février 2023.
 - [30] Forêt Resiliente, 2022. Office économique wallon du bois. URL <https://foretresiliente.be/> Consulté le 28 février 2023.
 - [31] Forrester, D.I., Bauhus, J., Cowie, A.L., 2005. On the success and failure of mixed-species tree plantations : lessons learned from a model system of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. *For. Ecol. Manag.* 209 (1e2), 147e155. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.01.012>.
 - [32] Forrester, D.I., 2014. The spatial and temporal dynamics of species interactions in mixed-species forests : from patterns to process. *For. Ecol. Manag.* 312, 282e292.
 - [33] Fourchy, P., 1952. Ecologie du Mélèze : particulièrement dans les Alpes françaises. Ecole Nationale des Eaux et Forêts, 137 p
 - [34] Freytet, F. Bonnardot, A., Freytet, A., 2020. Mesurer les arbres. CAUE 77. <http://www.arbres-caue77.org/medias/files/fiche-mesurer-les-arbres-au-24-mars-2020-.pdf>

- [35] Gardiner, B., Blennow, K., Carnus, J.-M., Fleischer, P., Ingemarson, F., Landmann, G., Lindner, M., Marzano, M., Nicoll, B., Orazio, C., Peyron, J.-L., Reviron, M.-P., Schelhaas, M.-J., Schuck, A., Spielmann, M., Usbeck, T., 2010. Destructive storms in European forests : past and forthcoming impacts. European Forest Institute, 138 p.
- [36] Gebru, H., 2015. A review on the comparative advantages of intercropping to mono-cropping system. *J. Biol. Agric. Healthc.* 5 (9), 1e13.
- [37] Génin, A., Stokes, A., 2009. Comment mesurer l'architecture des arbres ? *Revue Forestière Française*, 61(2), 99-112.
- [38] Goldberg, D.E., Barton, A.M., 1992. Patterns and consequences of interspecific competition in natural communities : a review of field experiments with plants. *Am Nat* 139 :771–801
- [39] Griess, V.C., Knoke, T., 2011. Growth performance, windthrow, and insects : meta-analyses of parameters influencing performance of mixed-species stands in boreal and northern temperate biomes. *Can. J. For. Res.* 41 (6), 1141e1159. <https://doi.org/10.1139/x11-042>.
- [40] Hartley, M.J., 2002. Rationale and methods for conserving biodiversity in plantation forests. *For. Ecol. Manag.* 155 (1e3), 81e95. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00549-7](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00549-7).
- [41] Heikinheino, O., 1953. On natural pruning of tree stems. *Inst. For. Fenn.* 41, 1–139.
- [42] Hout Info Bois [WWW Document], 2023. Bien plus que du bois! URL <https://www.houtinfobois.be/la-foret-et-le-bois/services-ecosystemiques/> Consulté le 27 février 2023.
- [43] Huang, P., Pretzsch, H., 2010. Using terrestrial laser scanner for estimating leaf areas of individual trees in a conifer forest. *Trees* 24 :609–619
- [44] IPCC, 2014. Climate Change 2014 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A : Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- [45] IRM - Climat dans votre commune [WWW Document], 2021 . KMI. URL <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/climat-dans-votre-commune> Consulté le 19/02/23.
- [46] IUSS Working Group WRB (2006) World reference base for soil resources 2006. World Soil Resources Reports No. 103. Rome, FAO.
- [47] Jactel, H., Brockerhoff, E., Piou, D., 2008. Le risque sanitaire dans les forêts mélangées. *Revue Forestière Française*, vol. LX, n° 2, pp. 168-180.

- [48] Jactel, H., Brockerhoff, E.G., 2007. Tree diversity reduces herbivory by forest insects. *Ecology Letters*, vol. 10, n° 9, pp. 835-848.
- [49] Jactel, H. et Brockerhoff, E.G., 2013. *Le chêne en Europe : biologie, écologie et usages*, Springer.
- [50] Jactel, H., Nicoll, B.C., Branco, M., Gonzalez-Olabarria, J.R., Grodzki, W., Långström, B., Moreira, F., Netherer, S., Christophe Orazio, C., Piou, D., Santos, H., Schelhaas, M.J., Tojic, K., Vodde, F., 2009. The influences of forest stand management on biotic and abiotic risks of damage. *Annals of Forest Science*, vol. 66, n° 7, pp. 701p1-701p18.
- [51] Kairiūkštis, L., Juodvalkis, A., 2005. The theoretical fundamentals of forming of the most productive stands. *Balt for* 11(2) :38–50
- [52] Kantola, A., Mäkelä, A., 2004. Crown development in Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] *Trees*. Springer-Verlag. 18 :408–421. DOI 10.1007/s00468-004-0319-x
- [53] Kantola, A., Mäkinen, H., Mäkelä, A., 2007. Stem form and branchiness of Norway spruce as a sawn timber-predicted by a process based model. *For. Ecol. Manage.* 241, 209–222.
- [54] Kelty, M.J., 1992. Comparative productivity of monocultures and mixed-species stands. In : Kelty, M.J., Larson, B.C., Oliver, C.D. (Eds.), *The Ecology and Silviculture of Mixed-Species Forests*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, pp. 125–141.
- [55] Kelty, M.J., 2006. The role of species mixtures in plantation forestry. *Forest Ecology and Management*, vol. 233, n° 2-3, pp. 195-204.
- [56] Kint, V., Hein, S., Campioli, M., Muys, B., 2010. Modelling self-pruning and branch attributes for young *Quercus robur* L. and *Fagus sylvatica* L. trees. *For. Ecol. Manage.* 260, 2023–2034.
- [57] Knoke, T., Ammer, C., Stimm, B., Mosandl, R., 2008. Admixing broadleaved to coniferous tree species : a review on yield, ecological stability and economics. *Eur J For Res* 127(2) :89–101
- [58] Kuuluvainen, T., 2009. Forest management and biodiversity conservation based on natural ecosystem dynamics in northern Europe : the complexity challenge. *Ambio* 38(6) :309–315
- [59] Lang, A.C., Härdtle, W., Baruffol, M., Böhnke, M., Bruelheide, H., Schmid, B., von Wehrden, H., von Oheimb, G., 2012. Mechanisms promoting tree species coexistence : experimental evidence with saplings of subtropical forest ecosystems of China. *J. Veg. Sci.* 23, 837–846.
- [60] Lefcheck, J.S., Byrnes, J.E., Isbell, F., Gamfeldt, L., Griffin, J.N., Eisenhauer, N., Hensel, M.J.S., Hector, A., Cardinale, B.J., Duffy, J.E., 2015. Biodiversity enhances ecosystem multifunctionality across trophic levels and habitats. *Nat. Commun.* 6, 6936. <https://doi.org/10.1038/ncomms7936>.

- [61] Lemaire, J., 2010. Le chêne autrement. Produire du chêne de qualité en moins de 100 ans en futaie régulière. IDF, Paris, France, 176p.
- [62] Le Roux, X., Bonhomme, M., 2005. Modelling tree architecture. *Plant Architecture and Its Manipulation*, 7-27.
- [63] Lestrade, M., Gonin, P., Coello, J., 2013. Autécologie de l'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus* L.) de l'érable plane (*Acer platanoïdes* L.), de l'érable champêtre (*Acer campestre* L.) et des autres érables. *Forêt-Entreprise* 212 : 54-62.
- [64] Lin, Y., Filin, S., Billen, R., Mizoue, N., 2023. Co-developing an international TLS network for the 3D ecological understanding of global trees : System architecture, remote sensing models, and functional prospects, *Environmental Science and Ecotechnology*. doi : <https://doi.org/10.1016/j.esec.2023.100257>.
- [65] Lintunen, A., Kaitaniemi, P., 2010. Responses of crown architecture in *Betula pendula* to competition are dependent on the species of neighbouring trees. *Trees* 24, 411–424.
- [66] Liu, C.L.C., Kuchma, O., Krutovsky, K.V., 2018. Mixed-species versus monocultures in plantation forestry : Development, benefits, ecosystem services and perspectives for the future. *Global Ecology and Conservation* 15. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00419>
- [67] Lohbeck, M., Bongers, F., Martinez-Ramos, M., Poorter, L., 2016. The importance of biodiversity and dominance for multiple ecosystem functions in a human modified tropical landscape. *Ecology* 97 (10), 2772e2779. <https://doi.org/10.1002/ecy.1499>.
- [68] Longuetaud, F., Piboule, A., Wernsdörfer, H., Collet, C., 2013. Crown plasticity reduces inter-tree competition in a mixed broadleaved forest. *Eur. J. For. Res.* 132, 621–634.
- [69] Lusk, C. H., 2002. The effect of tree morphology on light absorption and light-use efficiency. *Tree Physiology*, 22(3), 213-217.
- [70] Mace, G.M., Norris, K., Fitter, A.H., 2012. Biodiversity and ecosystem services : a multilayered relationship. *Trends Ecol. Evol.* 27 (1), 19e26. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.08.006>.
- [71] Mergeay, J., Santamaria, L., 2012. Evolution and biodiversity : the evolutionary basis of biodiversity and its potential for adaptation to global change. *Evol. Appl.* 5 (2), 103e106. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2011.00232.x>.
- [72] Moghaddam, E.R., 2014. Growth, development and yield in pure and mixed forest stands. *Int. J. Adv. Biol. Biomed. Res.* 2 (10), 2725e2730.

- [73] Nadrowski, K., Wirth, C., Scherer-Lorenzen, M., 2010. Is forest diversity driving ecosystem function and service ? *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 2, 75–79.
- [74] Nguyen, H., Firn, J., Lamb, D., Herbohn, J., 2014. Wood density : a tool to find complementary species for the design of mixed species plantations. *For. Ecol. Manag.* 334, 106e113. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.08.022>.
- [75] Nguyen, H., Herbohn, J.L., Clendenning, J., Lamb, D., Dressler, W., Vanclay, J.K., Firn, J., 2015. What is the available evidence concerning relative performance of different designs of mixed-species plantings for smallholder and community forestry in the tropics ? A systematic map protocol. *Environ. Evid.* 4 (15), 1e7. <https://doi.org/10.1186/s13750-015-0041-8>.
- [76] Nichols, J.D., Bristow, M., Vanclay, J.K., 2006. Mixed-species plantations : prospects and challenges. *For. Ecol. Manag.* 233 (2e3), 383e390. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.07.018>.
- [77] Niklas, K. J., 1994. *Plant allometry : the scaling of form and process*. University of Chicago Press.
- [78] ONF, 2007. *Gestion des hêtraies dans les forêts publiques françaises. Rendez-vous techniques de l'ONF, hors-série n° 2*, 112 p.
- [79] Office national des forêts, 2010. *Sylviculture des chênaies dans les forêts publiques françaises. Direction technique et commerciale bois. Rendez-vous techniques de l'ONF, hors-série n° 5*. 72 p
- [80] Office national des forêts, 2019a. Réchauffement climatique : quels enjeux pour la forêt ? [WWW Document]. URL <https://www.onf.fr/onf/+62c%3Ales-enjeux-de-la-foret-face-au-rechauffement-climatique-questions-manuel-nicolas.html> Consulté le 01 mars 2023.
- [81] Office national des forêts, 2019b. Verdun, Forêt d'Exception. Dossier de demande de prorogation du label. URL <https://www.onf.fr/foret-exception/verdun-foret-dexception/tous-les-contenus/+2e4%3Averdun-foret-dexception-face-la-crise-des-scolytes.html>
- [82] Otto, H., 1998. Traduit par Kempf, M. "Waldökologie" *Ecologie forestière*. France : Institut pour le développement forestier.
- [83] Pacala, S. W., Kobe, R. K., 2001. Interspecific variation in sapling mortality in relation to growth and soil moisture. *Journal of Ecology*, 89(6), 995-1006.
- [84] Paillet, Y., Gosselin, M., 2011. Relations entre les pratiques de préservation de la biodiversité forestière et la productivité, la résistance et la résilience : Etat des connaissances en forêt tempérée européenne. *Vertigo*, Paris : Avancées cinématographiques, 11 (2), 14 p. 10.4000/vertigo.11133. hal-00652185

- [85] PanoraBois Wallonie, 2021. Office économique wallon du bois.
- [86] Paquette, A., Messier, C., 2011. The effect of biodiversity on tree productivity : from temperate to boreal forests. *Global ecology and biogeography*, 20(1), 170-180.
- [87] Patenaude, P., Mathieu, P., 2020. COEFFICIENT DE DÉTERMINATION. Scolab. Net-math® URL [https ://lexique.netmath.ca/coefficient-de-determination/](https://lexique.netmath.ca/coefficient-de-determination/) Consulté le 22 mai 2023.
- [88] Pawson, S.M., Brin, A., Brockerhoff, E.G., Lamb, D., Payn, T.W., Paquette, A., Parrotta, J.A., 2013. Plantation forests, climate change and biodiversity. *Biodivers. Conserv.* 22 (5), 1203e1227. [https ://doi.org/10.1007/s10531-013-0458-8](https://doi.org/10.1007/s10531-013-0458-8).
- [89] Persson, A., 1976. The influence of spacing on the quality of sawn timber from Scots pine. *Res. Notes* 42, 122.
- [90] Petit, S., Cordier, S., Claessens, H., Ponette, Q., Vincke, C., Marchal, D. & Weissen F., 2017. *Fichier écologique des essences*. Forêt.Nature, UCLouvain-ELIe, ULiège-GxABT, SPWARNE-DNF. fichierecologique.be Consulté le 28 octobre 2022
- [91] Plath, M., Mody, K., Potvin, C., Dorn, S., 2011. Establishment of native tropical timber trees in monoculture and mixed-species plantations : small-scale effects on tree performance and insect herbivory. *For. Ecol. Manag.* 261 (3), 741e750. [https ://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.12.004](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.12.004).
- [92] Poorter, L., Arets, E. J., 2003. Light environment and tree strategies in a Bolivian tropical moist forest : an evaluation of the light partitioning hypothesis. *Plant Ecology*, 166(2), 295-306.
- [93] Pretzsch, H., 2005. Diversity and productivity in forests : evidence from long-term experimental plots. In : *Forest diversity and function : temperate and boreal ecosystems.*, (eds Scherer-Lorenzen M., C. Körner, et al.), vol. 176, Springer-Verlag, Berlin, p. 41-63.
- [94] Pretzsch, H., 2009. *Forest dynamics, growth and yield : From measurement to model*. Springer, Berlin
- [95] Pretzsch, H., 2014. Canopy space filling and tree crown morphology in mixed-species stands compared with monocultures. *For. Ecol. Manag.* 327, 251e264. [https ://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.04.027](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.04.027).
- [96] Pretzsch, H., 2018. Growth and Structure in Mixed-Species Stands Compared with Monocultures : Review and Perspectives. In : *Bravo-Oviedo, A., Pretzsch, H., del Río, M. (eds) Dynamics, Silviculture and Management of Mixed Forests. Managing Forest Ecosystems*, vol 31. Springer, Cham. [https ://doi.org/10.1007/978-3-319-91953-9_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-91953-9_5)

- [97] Pretzsch, H., Biber, P., 2016. Tree species mixing can increase maximum stand density. *Can J For Res* 46(10) :1179–1193
- [98] Pretzsch, H., Rais, A., 2016. Wood quality in complex forests versus even-aged monocultures : review and perspectives. *Wood Sci Technol* 50(4) :845–880
- [99] Pretzsch, H., Schütze, G., 2015. Effect of tree species mixing on the size structure, density, and yield of forest stands. *Eur. J. For. Res.* 135 (1), 1e22. <https://doi.org/10.1007/s10342-015-0913-z>.
- [100] Pretzsch, H., Forrester, D.I., 2017. Stand dynamics of mixed-species stands compared with monocultures. In : Pretzsch H, Forrester DI, Bauhus J (eds) *Mixed-species forests*. Springer, Berlin
- [101] Pretzsch, H., Zenner, EK., 2017. Toward managing mixed-species stands : from parametrization to prescription. *For Ecosyst* 4(1) : 19 <https://doi.org/10.1186/s40663-017-0105-z>
- [102] Pretzsch, H., Seifert, S., Huang, P., 2011. Beitrag des terrestrischen Laserscannings zur Erfassung der Struktur von Baumkronen. *Schweiz Z Forstwes* 162 :186–194
- [103] Pretzsch, H., Biber, P., Schütze, G., Uhl, E., Rötzer, T., 2014. Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. *Nature communications*, 5(1), 1-9
- [104] Pretzsch, H., Biber, P., Schütze, G., Kemmerer, J., Uhl, E., 2018. Wood density reduced while wood volume growth accelerated in Central European forests since 1870. *For. Ecol. Manage.* 429, 589–616.
- [105] Pretzsch, H., Poschenrieder, W., Uhl, E., Brazaitis, G., Makrickiene, E., Calama, R., 2021. Silvicultural prescriptions for mixed-species forest stands. A European review and perspective. *European Journal of Forest Research* 140 :1267–1294 <https://doi.org/10.1007/s10342-021-01388-7>
- [106] Prusinkiewicz, P., Lindenmayer, A., 2012. *The algorithmic beauty of plants*. Springer Science & Business Media.
- [107] Sardin, T., Bock, J., Becquey, J., 2008. Les peuplements mélangés : enjeux et interrogations des gestionnaires. *Revue forestière française*, 60 (2), pp.121-128. 10.4267/2042/18133. hal-03449563
- [108] Schaub, M., Rigling, A., 2018. Growth response of mixed and monospecific stands of *Fagus sylvatica* and *Picea abies* to environmental stress. *Frontiers in Plant Science*, 9, 303.
- [109] Schütz, J.P., 1975. Dynamique et conditions d'équilibre de peuplements jardinés sur les stations de la hêtraie à sapin. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 126 : 637–671.

- [110] Schwartz, M.W., Brigham, C.A., Hoeksema, J.D., Lyons, K.G., Mills, M.H., Van Mantgem, P.J., 2000. Linking biodiversity to ecosystem function : implications for conservation ecology. *Oecologia*, vol. 122, n° 3, pp. 297-305.
- [111] Sevrin, E., 1997. Les chênes sessile et pédonculé. Les guides du sylviculteur. Institut pour le développement forestier, France, 96 p.
- [112] Soares, P., Tomé, M., 2001. A tree crown ratio prediction equation for eucalypt plantations. Department of Forestry, Tapada da Ajuda, 1349 017 Lisboa, Portugal. *Ann. For. Sci.* 58 193–202 193. INRA, EDP Sciences.
- [113] Spiecker, H., Hansen, J., Klimo, E., Skovsgaard, J.P., Sterba, H., von Teuffel, K., 2004. European Forest Institute Research Report. Norway spruce Conversion - options and Consequences, vol. 18. Brill, Leiden, p. 269.
- [114] Stăncioiu PT, Șerbescu AA, Dutcă I. Live Crown Ratio as an Indicator for Tree Vigor and Stability of Turkey Oak (*Quercus cerris* L.) : A Case Study. *Forests*. 2021; 12(12) :1763. <https://doi.org/10.3390/f12121763>
- [115] Thomsen, I.M., 2016. Mixed Forests and Fungal Diseases : Potential Solutions or Problems ? Abstract of the Paper Presented at the NordGen Forest Conference, Växjö, Sweden. Retrieved from : <https://www.nordgen.org/ngdoc/forest/Konferanser/2016/Abstracts.pdf>.
- [116] Tian, D., Jiang, L., Wang, J., 2023. The influence of climate, soil physicochemical properties and tree size inequality on tree slenderness in mixed forests of Northeastern China. *Forest Ecology and Management* 529 120719. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120719>
- [117] Trouvé, R., Bontemps, J. D., Seynave, I., Collet, C., and Lebourgeois, F., 2015. Stand density, tree social status and water stress influence allocation in height and diameter growth of *Quercus petraea* (Liebl.). *Tree Physiol.*, 35, 1035–1046. doi :10.1093/treephys/tpv067
- [118] Turner, D. P., Cohen, W. B., Kennedy, R. E., Fassnacht, K. S., Briggs, J. M., Peterson, D. L., 1999. Relationships between leaf area index and Landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites. *Remote sensing of Environment*, 70(1), 52-68.
- [119] Turner, M. G., 2010. Disturbance and landscape dynamics in a changing world. *Ecology*, 91(10), 2833-2849.
- [120] Valladares, F., Niinemets, Ü., 2008. Shade tolerance, a key plant feature of complex nature and consequences. *Annu Rev Ecol Evol Syst* 39 :237–257
- [121] Vallet, P., Perot, T., 2016. Tree diversity effect on dominant height in temperate forest. *For Ecol Manag* 38 :106–114

- [122] Van de Peer, T., Verheyen, K., Kint, V., Van Cleemput, E., Muys, B., 2017. Plasticity of tree architecture through interspecific and intraspecific competition in a young experimental plantation. *Forest Ecology and Management*. 385, 1–9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2016.11.015> 0378-1127/ 2016 Elsevier B.V.
- [123] Verheyen, K., Ceunen, K., Ampoorter, E., Baeten, L., Bosman, B., Branquart, E., Carnol, M., Wandeler, H.De., Grégoire, J., Lhoir, P., Muys, B., Setiawan, N.N., Vanhellemont, M., Ponette, Q., 2013. Assessment of the functional role of tree diversity : the multi-site FORBIO experiment. *Plant Ecol. Evol.* 146, 26–35.
- [124] Vosselman, G., Maas, HG., 2010. Airborne and terrestrial laser scanning. Whittles Publishing, Dunbeath
- [125] Walter, H., 1931. Die Hydratur der Pflanzen und ihre physiologischökologische Bedeutung. Gustav Fischer Verlag, Jena
- [126] Weiner, J., 2004. Allocation, plasticity and allometry in plants. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 6(4), 207-215.
- [127] West, P.W., 2014. Growing Plantation Forests. Springer International Publishing, Cham, Switzerland.
- [128] WWF Belgique, 2018. Les forêts belges face au changement climatique [WWW Document]. URL <https://wwf.be/fr/actualites/les-forets-belges-face-au-changement-climatique> Consulté le 01 mars 2023.
- [129] Yachi, S., Loreau, M., 1999. Biodiversity and ecosystem productivity in a fluctuating environment : The insurance hypothesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 96, n° 4, pp. 1463-1468.
- [130] Zenner, EK., Heggenstaller, DJ., Brose, PH., Peck, JE., Steiner, KC., 2012. Reconstructing the competitive dynamics of mixed-oak neighborhoods. *Can J For Res* 42 :1714–1723

Annexes

Annexe A : Fiche de terrain, exemple pour l’arbre n°26 678 de la parcelle 35

Fiche arbre cible				Gouverneur	
n° parcelle	35				
n° arbre	26678				
circonférence	20,5				
hauteur (m)	8,2				
nombre de branches vivantes	7				
nombre de branches mortes	9				
hauteur de la base du houppier	270				

	vivante/morte	angle	hauteur (m)	diamètre à l'insertion	orientation	n° compétiteur	espèce	distance à l'arbre cible (m)	azimuth	circonférence (cm)
branche 1	M	1	0,75		13 N					
branche 2	M	3	0,9		12 S	26677	meleze	1,62 N		5,75
branche 3	M	3	1,1		10 S		meleze	3,19 N		36,5
branche 4	M	3	1,2		12,5 O		meleze	4,6 N		59
branche 5	M	3	1,7		11 E		meleze	4,83 NE		52
branche 6	M	1	1,75		10 E		meleze	3,29 NE		38,5
branche 7	M	2	1,85		25 E		meleze	1,99 NE		57
branche 8	M	3	2,3		12 S		meleze	3,33 NE		48
branche 9	V	3	2,45	cat. 10-30	O		meleze	4,37 E		36,5
branche 10	V	1	2,45	cat. 10-30	N		meleze	2,87 E		23
branche 11	M	3	2,45		10 SO		chene	3,32 SE		9
branche 12	V	2	2,7	cat. 10-30	S		chene	3,42 SE		22,5
branche 13 redressée	V	1	3,2	cat. 10-30	S		chene	1,97 SE		15,5
branche 14	V	3	3,9		10 NO		chene	2,98 S		10
branche 15	V	3	3,9		10 O		chene	5,09 S		75
branche 16	V	2	3,9	cat. 10-30	S		chene	3,46 SO		15
branche 17							chene	2,8 O		11,5
branche 18							chene	4,44 NO		30
branche 19							chene	1,83 NO		24,5
branche 20							chene	1,4 S		10,5
branche 21										
branche 22										
branche 23										
branche 24										
branche 25										
branche 26										
branche 27										
branche 28										
branche 29										
branche 30										

Remarques supplémentaires		fouches nécessitant intervention		nbre total de fourches	
		F1		1 fourche	

Annexe B : Ajustement des variables réponses en fonction de la taille et des indicateurs de la compétition exercée par le voisinage (surface terrière et indice de compétition)

TABLEAU 1 – R^2 ajustés sans transformation et pour chacune des cinq transformations appliquées sur les variables explicatives hd^2 , BA_{tot} et NCI_{tot} . Les valeurs encadrées correspondent aux ajustements choisis, pour chacune des variables réponses, en fonction de chacune des trois variables explicatives tandis que les valeurs colorées en vert mettent en évidence la transformation (ou l'absence de transformation) qui mène à la valeur la plus élevée de R^2 ajusté. Les explications pour comprendre le raisonnement suivi ont été données au point 3.4.4 de la partie matériel et méthodes.

variables réponses	transformation	taille	R ² ajusté	
			BA _{tot}	NCI _{tot}
h/d [-]	x	0,3069	0,2067	0,3501
	ln(x)	0,3497	0,1357	0,2632
	x ^{1/2}	0,3427	0,1752	0,3171
	x ²	0,2061	0,2411	0,3567
	1/x	0,2757	0,0541	0,1304
	exp(x)	0,3022	0,0363	0,3535
indicateur branchaison f(diamètre) [-]	x	0,1703	0,2360	0,1628
	ln(x)	0,1978	0,2390	0,1879
	x ^{1/2}	0,1935	0,2451	0,1793
	x ²	0,1110	0,1978	0,1257
	1/x	0,1381	0,1680	0,1603
	exp(x)	0,1674	0,0189	0,1600
proportion du houppier vivant (%)	x	0,0101	0,1206	0,0141
	ln(x)	0,0296	0,1147	0,0227
	x ^{1/2}	0,0192	0,1218	0,0174
	x ²	0,0010	0,1059	0,0128
	1/x	0,0371	0,0714	0,0313
	exp(x)	0,0096	0,0237	0,0142
nbre de branches vivantes entre 0 et 4m	x	-0,0068	0,2726	0,2079
	ln(x)	-0,0064	0,2193	0,1922
	x ^{1/2}	-0,0066	0,2550	0,2056
	x ²	-0,0073	0,2679	0,1922
	1/x	-0,0046	0,1073	0,1278
	exp(x)	-0,0068	0,0299	0,2078
nbre fourches _{tot} /l _{houppier} [m ⁻¹]	x	-0,0067	0,0249	0,0885
	ln(x)	-0,0030	0,0091	0,0630
	x ^{1/2}	-0,0095	0,0178	0,0799
	x ²	0,0119	0,0326	0,0844
	1/x	0,0256	-0,0062	0,0195
	exp(x)	-0,0060	0,0031	0,0888
nbre fourches _{tot} /h _{tot} [m ⁻¹]	x	0,0026	0,0946	0,1422
	ln(x)	-0,0094	0,0656	0,1224
	x ^{1/2}	-0,0069	0,0839	0,1385
	x ²	0,0251	0,0974	0,1255
	1/x	0,0069	0,0185	0,0621
	exp(x)	0,0037	0,0083	0,1415
nbre fourches _{<4m} /h _{4m} [m ⁻¹]	x	0,0002	0,0603	0,1042
	ln(x)	-0,0095	0,0480	0,0971
	x ^{1/2}	-0,0065	0,0568	0,1050
	x ²	0,0160	0,0573	0,0882
	1/x	-0,0045	0,0175	0,0559
	exp(x)	0,0010	0,0061	0,1033

Annexe C : Coefficients pour les différentes variantes du modèle des variables réponses

TABLEAU 2 – R^2 ajusté, AIC corrigé, BIC et estimations des coefficients pour les douze variantes du modèle de la variable réponse h/d

Variables réponses h/d [-]	modèles	formule	R^2 ajusté	AIC _c	BIC	coefficient	estimations	Prob. > t
	lm_0	bloc	-0,009	965,54	973,3	constante	97,30 < ,0001	0,8378
	lm_1	bloc + ln(hd ²)	0,456	901,24	911,50	bloc[Gouverneur]	-0,45	0,9378
						constante	11,97	0,1936
						bloc[Gouverneur]	8,63 < ,0001	
						ln(hd ²)	-24,38 < ,0001	
	lm_2	bloc + ln(hd ²) + BA _{tot}	0,727	829,12	841,84	constante	-18,11	0,0124
						bloc[Gouverneur]	2,38	0,1062
						ln(hd ²)	-23,97 < ,0001	
						BA _{tot}	1,90 < ,0001	
	lm_3	bloc + ln(hd ²) + BA _{dec} + BA _{con}	0,744	823,74	838,88	constante	-5,24	0,5314
						bloc[Gouverneur]	3,83	0,0128
						ln(hd ²)	-22,60 < ,0001	
						BA _{dec}	0,98	0,0115
						BA _{con}	1,72 < ,0001	
	lm_4	bloc + ln(hd ²) + BA ₁ + BA ₂ + BA ₃ + BA _{con}	0,741	827,54	847,36	constante	-5,97	0,4914
						bloc[Gouverneur]	3,64	0,0212
						ln(hd ²)	-22,69 < ,0001	
						BA ₁	1,16	0,0091
						BA ₂	0,64	0,2461
						BA ₃	0,80	0,5003
						BA _{con}	1,73 < ,0001	
	lm_5	bloc + ln(hd ²) + BA _{dec} + BA ₄ + BA ₅	0,767	814,93	832,43	constante	-1,02	0,9
						bloc[Gouverneur]	5,11	0,0009
						ln(hd ²)	-22,58 < ,0001	
						BA _{dec}	0,79	0,0334
						BA ₄	0,68	0,0621
						BA ₅	1,67 < ,0001	
	lm_6	bloc + ln(hd ²) + BA ₁ + BA ₂ + BA ₃ + BA ₄ + BA ₅	0,764	818,68	840,78	constante	-1,76	0,8334
						bloc[Gouverneur]	4,92	0,0018
						ln(hd ²)	-22,67 < ,0001	
						BA ₁	0,97	0,0221
						BA ₂	0,44	0,4026
						BA ₃	0,61	0,5918
						BA ₄	0,69	0,0616
						BA ₅	1,68 < ,0001	

Variables réponses	modèles	formule	R ² ajusté	AIC _c	BIC	coefficient	estimations	Prob. > t
h/d [-]	lm_7	bloc + ln(hd ³) + NCl _{tot}	0,776	808,13	820,84	constante bloc[Gouverneur]	-2,50 4,10	0,6768 0,0015
						ln(hd ³)	-22,33 <,0001	
						NCl _{tot}	276,77 <,0001	
	lm_8	bloc + ln(hd ³) + NCl _{dec} + NCl _{con}	0,775	810,05	825,18	constante bloc[Gouverneur]	-5,13 3,76	0,5036 0,0082
						ln(hd ³)	-22,57 <,0001	
						NCl _{dec}	335,54	0,0025
						NCl _{con}	285,33 <,0001	
	lm_9	bloc + ln(hd ³) + NCl ₁ + NCl ₂ + NCl ₃ + NCl _{con}	0,773	813,42	833,24	constante bloc[Gouverneur]	-6,19 3,51	0,4339 0,0161
						ln(hd ³)	-22,70 <,0001	
						NCl ₁	398,06	0,0016
						NCl ₂	203,44	0,2184
						NCl ₃	345,16	0,3348
						NCl _{con}	287,34 <,0001	
	lm_10	bloc + ln(hd ³) + NCl _{dec} + NCl ₄ + NCl ₅	0,778	809,56	827,06	constante bloc[Gouverneur]	-2,20 4,52	0,7777 0,0025
						ln(hd ³)	-22,52 <,0001	
						NCl _{dec}	290,52	0,0101
						NCl ₄	166,47	0,0347
						NCl ₅	274,77 <,0001	
	lm_11	bloc + ln(hd ³) + NCl ₁ + NCl ₂ + NCl ₃ + NCl ₄ + NCl ₅	0,777	812,96	835,05	constante bloc[Gouverneur]	-3,23 4,27	0,6884 0,0053
						ln(hd ³)	-22,64 <,0001	
						NCl ₁	353,39	0,0056
						NCl ₂	156,26	0,3471
						NCl ₃	291,94	0,4124
						NCl ₄	167,81	0,0344
						NCl ₅	276,65 <,0001	

TABLEAU 3 – R^2 ajusté, AIC corrigé, BIC et estimations des coefficients pour les douze variantes du modèle de la variable réponse pénalisant la branchaison $f(dbh^2)$

Variables réponses	modèles	formule	R^2 ajusté	AIC _c	BIC	coefficient	estimations	Prob. > t
indicateur branchaison f(diamètre) [-] (formule 2)	lm_0	bloc	0,215	66,70	74,45	constante	0,79 < 0,001	
	lm_1	bloc + ln(hd ²)	0,269	60,22	70,48	bloc[Gouverneur]	-0,17 < 0,001	0,0971
						constante	0,29	0,0011
						bloc[Gouverneur]	-0,12	0,0039
						ln(hd ²)	-0,14	0,0013
	lm_2	bloc + ln(hd ²) + BA _{tot}	0,364	46,66	59,38	constante	0,59	0,1233
						bloc[Gouverneur]	-0,06	0,0015
						ln(hd ²)	-0,15	0,0001
						BA _{tot}	-0,02	0,0069
	lm_3	bloc + ln(hd ²) + BA _{dec} + BA _{con}	0,358	48,91	64,04	constante	0,59	0,156
						bloc[Gouverneur]	-0,06	0,0025
						ln(hd ²)	-0,15	0,0025
						BA _{dec}	-0,02	0,0525
						BA _{con}	-0,02	0,0002
	lm_4	bloc + ln(hd ²) + BA ₁ + BA ₂ + BA ₃ + BA _{con}	0,348	53,05	72,87	constante	0,63	0,0059
						bloc[Gouverneur]	-0,05	0,2168
						ln(hd ²)	-0,14	0,0039
						BA ₁	-0,02	0,0508
						BA ₂	-0,01	0,2932
						BA ₃	-0,03	0,2963
						BA _{con}	-0,02	0,0002
	lm_5	bloc + ln(hd ²) + BA _{dec} + BA ₄ + BA ₅	0,368	48,38	65,88	constante	0,54	0,0145
						bloc[Gouverneur]	-0,07	0,0723
						ln(hd ²)	-0,15	0,0023
						BA _{dec}	-0,02	0,0918
						BA ₄	-0,01	0,5994
						BA ₅	-0,02	0,0004
	lm_6	bloc + ln(hd ²) + BA ₁ + BA ₂ + BA ₃ + BA ₄ + BA ₅	0,359	52,60	74,69	constante	0,57	0,0122
						bloc[Gouverneur]	-0,07	0,1075
						ln(hd ²)	-0,14	0,0036
						BA ₁	-0,02	0,0817
						BA ₂	-0,01	0,3845
						BA ₃	-0,03	0,3329
						BA ₄	-0,01	0,5708
						BA ₅	-0,02	0,0003

Variables réponses	modèles	formule	R ² ajusté	AIC _c	BIC	coefficient	estimations	Prob. > t
indicateur branchaison f(diamètre) [-] (formule 2)	lm_7	bloc + ln(hd ²) + NCl _{tot}	0,366	46,40	59,12	constante bloc[Gouverneur] ln(hd ²) NCl _{tot}	0,42 -0,08 -0,16 -2,55 <,0001	0,0116 0,0285 0,0005
	lm_8	bloc + ln(hd ²) + NCl _{dec} + NCl _{con}	0,370	46,96	62,09	constante bloc[Gouverneur] ln(hd ²) NCl _{dec} NCl _{con}	0,59 -0,06 -0,15 -6,23 -3,08 <,0001	0,0059 0,1448 0,0022 0,0376
	lm_9	bloc + ln(hd ²) + NCl ₁ + NCl ₂ + NCl ₃ + NCl _{con}	0,361	50,84	70,66	constante bloc[Gouverneur] ln(hd ²) NCl ₁ NCl ₂ NCl ₃ NCl _{con}	0,62 -0,05 -0,14 -7,40 -4,11 -10,43 -3,17 <,0001	0,0047 0,2163 0,0033 0,0302 0,3628 0,288
	lm_10	bloc + ln(hd ²) + NCl _{dec} + NCl ₄ + NCl ₅	0,370	48,09	65,59	constante bloc[Gouverneur] ln(hd ²) NCl _{dec} NCl ₄ NCl ₅	0,54 -0,07 -0,15 -5,43 -0,97 -2,90	0,0141 0,0871 0,0002 0,0782 0,6504 0,0003
	lm_11	bloc + ln(hd ²) + NCl ₁ + NCl ₂ + NCl ₃ + NCl ₄ + NCl ₅	0,362	52,06	74,15	constante bloc[Gouverneur] ln(hd ²) NCl ₁ NCl ₂ NCl ₃ NCl ₄ NCl ₅	0,57 -0,06 -0,14 -6,61 -3,28 -9,49 -1,06 -2,98	0,0112 0,1348 0,0031 0,058 0,4743 0,3352 0,6257 0,0003

TABLEAU 4 – R^2 ajusté, AIC corrigé, BIC et estimations des coefficients pour les douze variantes du modèle de la variable réponse proportion du houpier

Variables réponses proportion du houpier vivant (%) (formule 1)	modèles	formule	R^2 ajusté	AIC _c	BIC	coefficient	estimations	Prob. > t
	lm_0	bloc	0,219	788,93	796,69	constante	71,80 <0,001	
						bloc[Gouverneur]	-5,25 <0,001	
	lm_1	bloc + hd ²	0,217	790,26	800,52	constante	70,46 <0,001	
						bloc[Gouverneur]	-5,67 <0,001	
						hd ²	34,64	0,3695
	lm_2	bloc + hd ² + BA _{tot}	0,233	789,27	801,99	constante	75,17 <0,001	
						bloc[Gouverneur]	-4,74	0,0001
						hd ²	30,19	0,4302
						BA _{tot}	-0,27	0,0804
	lm_3	bloc + hd ² + BA _{dec} + BA _{con}	0,491	746,96	762,09	constante	87,90 <0,001	
						bloc[Gouverneur]	-1,77	0,0919
						hd ²	75,72	0,0187
						BA _{dec}	-1,93 <0,001	
						BA _{con}	-0,59 <0,001	
	lm_4	bloc + hd ² + BA ₁ + BA ₂ + BA ₃ + BA _{con}	0,487	750,43	770,26	constante	88,35 <0,001	
						bloc[Gouverneur]	-1,56	0,148
						hd ²	80,11	0,0147
						BA ₁	-2,08 <0,001	
						BA ₂	-1,67 <0,001	
						BA ₃	-2,14	0,0107
						BA _{con}	-0,60 <0,001	
	lm_5	bloc + hd ² + BA _{dec} + BA ₁ + BA ₅	0,491	748,18	765,68	constante	88,83 <0,001	
						bloc[Gouverneur]	-1,48	0,1733
						hd ²	75,14	0,0196
						BA _{dec}	-1,97 <0,001	
						BA ₁	-0,82	0,0025
						BA ₅	-0,60 <0,001	
	lm_6	bloc + hd ² + BA ₁ + BA ₂ + BA ₃ + BA ₄ + BA ₅	0,487	751,76	773,86	constante	89,27 <0,001	
						bloc[Gouverneur]	-1,27	0,2532
						hd ²	79,50	0,0155
						BA ₁	-2,12 <0,001	
						BA ₂	-1,71 <0,001	
						BA ₃	-2,18	0,0095
						BA ₄	-0,83	0,0023
						BA ₅	-0,62 <0,001	

Variables réponses	modèles	formule	R ² ajusté	AIC _c	BIC	coefficient	estimations	Prob. > t
proportion du houpplier vivant (%) (formule 1)	Im_7	bloc + hd ² + NCl _{tot}	0,21	792,46	805,17	constante	70,63 < 0,001	
						bloc[Gouverneur]	-5,64 < 0,001	
						hd ²	34,18	0,382
						NCl _{tot}	-2,00	0,9248
	Im_8	bloc + hd ² + NCl _{dec} + NCl _{con}	0,496	745,91	761,04	constante	87,16 < 0,001	
						bloc[Gouverneur]	-1,87	0,07
						hd ²	71,84	0,0245
						NCl _{dec}	-591,16 < 0,001	
						NCl _{con}	-88,51 < 0,001	
	Im_9	bloc + hd ² + NCl ₁ + NCl ₂ + NCl ₃ + NCl _{con}	0,492	749,34	769,17	constante	87,57 < 0,001	
						bloc[Gouverneur]	-1,67	0,1149
						hd ²	75,33	0,0201
						NCl ₁	-635,69 < 0,001	
						NCl ₂	-499,28 < 0,001	
						NCl ₃	-637,62	0,0167
						NCl _{con}	-90,27 < 0,001	
	Im_10	bloc + hd ² + NCl _{dec} + NCl ₄ + NCl ₅	0,505	745,25	762,75	constante	89,25 < 0,001	
						bloc[Gouverneur]	-1,28	0,2346
						hd ²	71,29	0,0244
						NCl _{dec}	-624,64 < 0,001	
						NCl ₄	-178,84	0,0024
						NCl ₅	-96,52 < 0,001	
	Im_11	bloc + hd ² + NCl ₁ + NCl ₂ + NCl ₃ + NCl ₄ + NCl ₅	0,501	748,77	770,87	constante	89,65 < 0,001	
						bloc[Gouverneur]	-1,08	0,3267
						hd ²	74,80	0,0199
						NCl ₁	-668,42 < 0,001	
						NCl ₂	-534,29 < 0,001	
						NCl ₃	-675,66	0,011
						NCl ₄	-180,23	0,0024
						NCl ₅	-98,27 < 0,001	

TABLEAU 5 – R^2 ajusté, AIC corrigé, BIC et estimations des coefficients pour les douze variantes du modèle de la variable réponse nombre de branches vivantes entre 0 et 4m [-]

Variables réponses	modèles	formule	R^2 ajusté	AIC _c	BIC	coefficient	estimations	Prob. > t
nbre de branches vivantes entre 0 et 4m [-]	lm_0	bloc	0,14	655,85	663,61	constante	12,42 < ,0001	
	lm_1	bloc + hd ²	0,194	650,08	660,34	bloc[Gouverneur] constante	-2,16 < ,0001 10,25 < ,0001	
	lm_2	bloc + hd ² + BA _{tot}	0,334	630,96	643,68	hd ² constante	-2,84 < ,0001 56,14	0,0056
	lm_3	bloc + hd ² + BA _{dec} + BA _{con}	0,349	629,72	644,86	bloc[Gouverneur] hd ² BA _{tot}	16,27 < ,0001 -1,65 50,45	0,0038 0,0063
	lm_4	bloc + hd ² + BA ₁ + BA ₂ + BA ₃ + BA _{con}	0,342	633,42	653,24	BA _{dec} BA _{con}	-0,35 < ,0001 18,12 < ,0001	0,0047 0,0023 0,0001
	lm_5	bloc + hd ² + BA _{dec} + BA ₁ + BA ₃	0,351	630,78	648,28	constante bloc[Gouverneur] hd ²	-0,40 < ,0001 17,54 < ,0001 -1,40	0,0669 0,0022 0,0002
	lm_6	bloc + hd ² + BA ₁ + BA ₂ + BA ₃ + BA ₄ + BA ₅	0,343	634,54	656,64	BA ₁ BA ₂ BA ₃ BA ₄ BA ₅	0,0002 -0,67 -0,45 -0,51 -0,40	0,0003 0,0427 0,2797 0,0979 0,0001
						constante	17,67 < ,0001	0,0266
						bloc[Gouverneur]	-1,32	0,0021
						hd ²	57,44	0,0003
						BA _{dec}	-0,57	0,0979
						BA ₁	-0,25	
						BA ₂	-0,39 < ,0001	
						BA ₃		
						BA ₄		
						BA ₅		
						constante	17,67 < ,0001	0,0408
						bloc[Gouverneur]	-1,32	0,0021
						hd ²	58,76	0,0003
						BA ₁	-0,64	0,0579
						BA ₂	-0,42	0,3034
						BA ₃	-0,49	0,0972
						BA ₄	-0,26	
						BA ₅	-0,39 < ,0001	

Variables réponses	modèles	formule	R ² ajusté	AIC _c	BIC	coefficient	estimations	Prob. > t
nbre de branches vivantes entre 0 et 4m [-]	lm_7	bloc + hd ² + NCl _{tot}	0,306	635,41	648,13	constante bloc[Gouverneur]	13,93 <,0001	0,0001
						hd ²	46,34	0,0141
						NCl _{tot}	-42,28 <,0001	
	lm_8	bloc + hd ² + NCl _{dec} + NCl _{con}	0,37	626,30	641,43	constante bloc[Gouverneur]	18,06 <,0001	0,0407
						hd ²	-1,20	0,0024
						NCl _{dec}	55,77	
						NCl _{con}	-189,71 <,0001	
							-63,93 <,0001	
	lm_9	bloc + hd ² + NCl ₁ + NCl ₂ + NCl ₃ + NCl _{con}	0,365	629,70	649,52	constante bloc[Gouverneur]	18,20 <,0001	0,0632
						hd ²	-1,12	0,0022
						NCl ₁	57,12	
						NCl ₂	-214,87 <,0001	0,0538
						NCl ₃	-133,87	0,2673
						NCl _{con}	-166,13	
							-64,38 <,0001	
	lm_10	bloc + hd ² + NCl _{dec} + NCl ₄ + NCl ₅	0,364	628,51	646,02	constante bloc[Gouverneur]	17,87 <,0001	0,0443
						hd ²	-1,26	0,0025
						NCl _{dec}	55,82	0,0001
						NCl ₄	-186,63	0,0956
						NCl ₅	-55,64	
							-63,20 <,0001	
	lm_11	bloc + hd ² + NCl ₁ + NCl ₂ + NCl ₃ + NCl ₄ + NCl ₅	0,359	632,01	654,10	constante bloc[Gouverneur]	18,00 <,0001	0,0658
						hd ²	-1,18	0,0022
						NCl ₁	57,17	0,0001
						NCl ₂	-211,72	0,0652
						NCl ₃	-130,50	0,2821
						NCl ₄	-162,47	0,0972
						NCl ₅	-55,72	
							-63,61 <,0001	

TABLEAU 6 – R^2 ajusté, AIC corrigé, BIC et estimations des coefficients pour les douze variantes du modèle de la variable réponse nombre de fourches total ramené à la longueur du houppier vivant

Variables réponses	modèles	formule	R^2 ajusté	AIC _c	BIC	coefficient	estimations	Prob. > t
nbre fourches _{tot} /houppier [m ⁻¹]	lm_0	bloc	-0,003	149,76	157,51	constante	0,78 < .0001	0,4253
	lm_1	bloc + hd ²	-0,003	150,88	161,14	bloc[Gouverneur] constante	0,04 0,85 < .0001	0,4253
	lm_2	bloc + hd ² + BA _{tot}	0,055	145,71	158,43	hd ² constante	0,06 1,20 < .0001	0,2479 0,3164
						bloc[Gouverneur]	0,13	0,0243
						hd ²	-2,22	0,2275
						BA _{tot}	-0,02	0,0079
	lm_3	bloc + hd ² + BA _{dec} + BA _{con}	0,171	133,05	148,18	constante	0,82 < .0001	0,477
						bloc[Gouverneur]	0,04	0,0436
						hd ²	-3,58	0,0436
						BA _{dec}	0,03	0,0464
						BA _{con}	-0,01	0,1464
	lm_4	bloc + hd ² + BA ₁ + BA ₂ + BA ₃ + BA _{con}	0,203	131,42	151,25	constante	0,75 < .0001	0,8479
						bloc[Gouverneur]	0,01	0,0161
						hd ²	-4,26	0,0067
						BA ₁	0,04	0,8209
						BA ₂	0,00	0,037
						BA ₃	0,09	0,2507
						BA _{con}	-0,01	0,0001
	lm_5	bloc + hd ² + BA _{dec} + BA ₁ + BA ₃	0,204	129,99	147,49	constante	0,70	0,9246
						bloc[Gouverneur]	0,01	0,0437
						hd ²	-3,50	0,0191
						BA _{dec}	0,03	0,2292
						BA ₁	0,02	0,1973
						BA ₃	-0,01	0,0005
	lm_6	bloc + hd ² + BA ₁ + BA ₂ + BA ₃ + BA ₄ + BA ₅	0,236	128,22	150,32	constante	0,63	0,6837
						bloc[Gouverneur]	-0,02	0,0158
						hd ²	-4,19	0,0025
						BA ₁	0,05	0,6246
						BA ₂	0,01	0,0255
						BA ₃	0,10	0,17
						BA ₄	0,02	0,326
						BA ₅	-0,01	

Variables réponses	modèles	formule	R ² ajusté	AIC _c	BIC	coefficient	estimations	Prob. > t
nbre fourches _{tot} /haupier [m ⁻¹]	lm_7	bloc + hd ² + NCl _{tot}	0,123	137,76	150,48	bloc[Gouverneur] constante	1,18 <,0001	0,0175
						hd ²	-2,78	0,1197
						NCl _{tot}	-3,84	0,0001
	lm_8	bloc + hd ² + NCl _{dec} + NCl _{con}	0,189	130,68	145,82	constante	0,82 <,0001	0,461
						bloc[Gouverneur]	0,04	0,0394
						hd ²	-3,61	0,0394
						NCl _{dec}	9,00	0,0394
						NCl _{con}	-1,95	0,0826
	lm_9	bloc + hd ² + NCl ₁ + NCl ₂ + NCl ₃ + NCl _{con}	0,221	128,96	148,78	constante	0,75 <,0001	0,8459
						bloc[Gouverneur]	0,01	0,0166
						hd ²	-4,16	0,006
						NCl ₁	13,45	0,8621
						NCl ₂	1,13	0,0319
						NCl ₃	30,54	0,1518
						NCl _{con}	-1,59	0,0001
	lm_10	bloc + hd ² + NCl _{dec} + NCl ₄ + NCl ₅	0,209	129,34	146,84	constante	0,70	0,9238
						bloc[Gouverneur]	0,01	0,0389
						hd ²	-3,57	0,0137
						NCl _{dec}	11,03	0,2621
						NCl ₄	3,54	0,1978
						NCl ₅	-1,47	0,0005
	lm_11	bloc + hd ² + NCl ₁ + NCl ₂ + NCl ₃ + NCl ₄ + NCl ₅	0,241	127,48	149,57	constante	0,62	0,6718
						bloc[Gouverneur]	-0,02	0,0161
						hd ²	-4,13	0,0019
						NCl ₁	15,45	0,6152
						NCl ₂	3,27	0,0201
						NCl ₃	32,87	0,2078
						NCl ₄	3,90	0,3258
						NCl ₅	-1,11	

TABLEAU 7 – R^2 ajusté, AIC corrigé, BIC et estimations des coefficients pour les douze variantes du modèle de la variable réponse nombre de fourches total ramené à la hauteur totale

Variables réponses	modèles	formule	R^2 ajusté	AIC _c	BIC	coefficient	estimations	Prob. > t
nbre fourches _{tot} /h _{tot} [m ⁻¹]	lm_0	bloc	-0,002	58,77	66,53	constante	0,54	<,0001
						bloc[Gouverneur]	-0,03	0,3691
	lm_1	bloc + hd ²	-0,005	60,26	70,52	constante	0,58	<,0001
						bloc[Gouverneur]	-0,02	0,6518
						hd ²	-0,99	0,421
	lm_2	bloc + hd ² + BA _{tot}	0,092	50,64	63,36	constante	0,86	<,0001
						bloc[Gouverneur]	0,04	0,2603
						hd ²	-1,26	0,2838
						BA _{tot}	-0,02	0,0008
	lm_3	bloc + hd ² + BA _{loc} + BA _{con}	0,139	46,28	61,41	constante	0,70	<,0001
						bloc[Gouverneur]	0,00	0,9449
						hd ²	-1,85	0,1153
						BA _{loc}	0,00	0,6143
						BA _{con}	-0,01	0,0127
	lm_4	bloc + hd ² + BA ₁ + BA ₂ + BA ₃ + BA _{con}	0,170	44,91	64,73	constante	0,66	<,0001
						bloc[Gouverneur]	-0,02	0,6664
						hd ²	-2,27	0,0522
						BA ₁	0,02	0,1447
						BA ₂	-0,01	0,3328
						BA ₃	0,04	0,18
						BA _{con}	-0,01	0,0259
	lm_5	bloc + hd ² + BA _{loc} + BA ₄ + BA ₅	0,154	45,64	63,14	constante	0,64	<,0001
						bloc[Gouverneur]	-0,01	0,7048
						hd ²	-1,81	0,1191
						BA _{loc}	0,01	0,4485
						BA ₄	0,00	0,8782
						BA ₅	-0,01	0,0177
	lm_6	bloc + hd ² + BA ₁ + BA ₂ + BA ₃ + BA ₄ + BA ₅	0,185	44,26	66,35	constante	0,60	<,0001
						bloc[Gouverneur]	-0,03	0,3919
						hd ²	-2,24	0,0539
						BA ₁	0,02	0,0937
						BA ₂	-0,01	0,4343
						BA ₃	0,04	0,1524
						BA ₄	0,00	0,7713
						BA ₅	-0,01	0,0351

Variables réponses	modèles	formule	R ² ajusté	AIC _c	BIC	coefficient	estimations	Prob. > t
nbre fourches _{5-60°} /h _{tot} [m ⁻¹]	lm_7	bloc + hd ² + NCl _{tot}	0,143	44,56	57,28	constante	0,81	<,0001
						bloc[Gouverneur]	0,03	0,3828
						hd ²	-1,62	0,1607
						NCl _{tot}	-2,69	<,0001
	lm_8	bloc + hd ² + NCl _{dec} + NCl _{con}	0,154	44,40	59,53	constante	0,69	<,0001
						bloc[Gouverneur]	0,00	0,9664
						hd ²	-1,89	0,1037
						NCl _{dec}	1,58	0,5832
						NCl _{con}	-2,06	0,0064
	lm_9	bloc + hd ² + NCl ₁ + NCl ₂ + NCl ₃ + NCl _{con}	0,186	42,98	62,81	constante	0,65	<,0001
						bloc[Gouverneur]	-0,02	0,6345
						hd ²	-2,24	0,0518
						NCl ₁	4,70	0,1446
						NCl ₂	-4,16	0,3372
						NCl ₃	13,71	0,146
						NCl _{con}	-1,84	0,0138
	lm_10	bloc + hd ² + NCl _{dec} + NCl ₄ + NCl ₅	0,156	45,41	62,91	constante	0,64	<,0001
						bloc[Gouverneur]	-0,01	0,7488
						hd ²	-1,88	0,1058
						NCl _{dec}	2,39	0,4214
						NCl ₄	0,12	0,955
						NCl ₅	-1,87	0,0158
	lm_11	bloc + hd ² + NCl ₁ + NCl ₂ + NCl ₃ + NCl ₄ + NCl ₅	0,187	44,02	66,12	constante	0,60	<,0001
						bloc[Gouverneur]	-0,03	0,4191
						hd ²	-2,23	0,0529
						NCl ₁	5,49	0,0961
						NCl ₂	-3,31	0,4508
						NCl ₃	14,63	0,122
						NCl ₄	0,33	0,8729
						NCl ₅	-1,65	0,0312

TABLEAU 8 – R^2 ajusté, AIC corrigé, BIC et estimations des coefficients pour les douze variantes du modèle de la variable réponse nombre de fourches en deçà de 4m ramené à une hauteur de 4m

Variables réponses	modèles	formule	R^2 ajusté	AIC _c	BIC	coefficient	estimations	Prob. > t
nbre fourches _{4m} /h _{4m} [m ⁻¹]	lm_0	bloc	-0,006	93,06	100,81	constante	0,47	<.0001
	lm_1	bloc + hd ²	-0,009	94,56	104,81	bloc[Gouverneur]	-0,02	0,5219
						constante	0,51	<.0001
						bloc[Gouverneur]	-0,01	0,8247
						hd ²	-1,16	0,4235
	lm_2	bloc + hd ² + BA _{tot}	0,056	88,64	101,36	constante	0,79	<.0001
						bloc[Gouverneur]	0,05	0,2854
						hd ²	-1,42	0,3114
						BA _{tot}	-0,02	0,0053
	lm_3	bloc + hd ² + BA _{dec} + BA _{con}	0,09	86,00	101,14	constante	0,62	<.0001
						bloc[Gouverneur]	0,01	0,8812
						hd ²	-2,03	0,1509
						BA _{dec}	0,01	0,6146
						BA _{con}	-0,01	0,0447
	lm_4	bloc + hd ² + BA ₁ + BA ₂ + BA ₃ + BA _{con}	0,111	86,00	105,82	constante	0,59	<.0001
						bloc[Gouverneur]	-0,01	0,8239
						hd ²	-2,37	0,0941
						BA ₁	0,02	0,1504
						BA ₂	-0,02	0,2737
						BA ₃	0,02	0,6725
						BA _{con}	-0,01	0,0666
	lm_5	bloc + hd ² + BA _{dec} + BA ₁ + BA ₅	0,13	82,45	99,95	constante	0,53	0,0003
						bloc[Gouverneur]	-0,02	0,6269
						hd ²	-1,97	0,1539
						BA _{dec}	0,01	0,3833
						BA ₁	0,01	0,3172
						BA ₅	-0,01	0,0641
	lm_6	bloc + hd ² + BA ₁ + BA ₂ + BA ₃ + BA ₄ + BA ₅	0,152	82,37	104,46	constante	0,49	0,0008
						bloc[Gouverneur]	-0,04	0,4017
						hd ²	-2,31	0,0953
						BA ₁	0,02	0,0774
						BA ₂	-0,01	0,398
						BA ₃	0,02	0,5848
						BA ₄	0,01	0,2768
						BA ₅	-0,01	0,0931

Variables réponses	modèles	formule	R ² ajusté	AIC _c	BIC	coefficient	estimations	Prob. > t
nbre fourches _{4nm} /h _{4m} [m ⁻¹]	lm_7	bloc + hd ² + NCl _{tot}	0,103	83,24	95,95	constante	0,75 <,0001	
						bloc[Gouverneur]	0,04	0,3544
						hd ²	-1,80	0,1917
						NCl _{tot}	-2,78	0,0003
	lm_8	bloc + hd ² + NCl _{dec} + NCl _{con}	0,109	83,78	98,91	constante	0,63 <,0001	
						bloc[Gouverneur]	0,01	0,8391
						hd ²	-2,08	0,1363
						NCl _{dec}	1,55	0,6554
						NCl _{con}	-2,14	0,0183
	lm_9	bloc + hd ² + NCl ₁ + NCl ₂ + NCl ₃ + NCl _{con}	0,130	83,69	103,52	constante	0,60 <,0001	
						bloc[Gouverneur]	-0,01	0,8702
						hd ²	-2,37	0,089
						NCl ₁	5,41	0,1654
						NCl ₂	-6,49	0,2166
						NCl ₃	4,64	0,6829
						NCl _{con}	-2,00	0,0272
	lm_10	bloc + hd ² + NCl _{dec} + NCl ₄ + NCl ₅	0,13	82,45	99,95	constante	0,53	0,0003
						bloc[Gouverneur]	-0,02	0,6784
						hd ²	-2,05	0,1367
						NCl _{dec}	3,18	0,3696
						NCl ₄	2,25	0,3726
						NCl ₅	-1,75	0,0561
	lm_11	bloc + hd ² + NCl ₁ + NCl ₂ + NCl ₃ + NCl ₄ + NCl ₅	0,152	82,36	104,46	constante	0,50	0,0006
						bloc[Gouverneur]	-0,04	0,4507
						hd ²	-2,34	0,0886
						NCl ₁	6,99	0,0771
						NCl ₂	-4,80	0,3618
						NCl ₃	6,49	0,5651
						NCl ₄	2,36	0,3456
						NCl ₅	-1,61	0,0779

Annexe D : ANOVA des variables explicatives et réponses en fonction du bloc

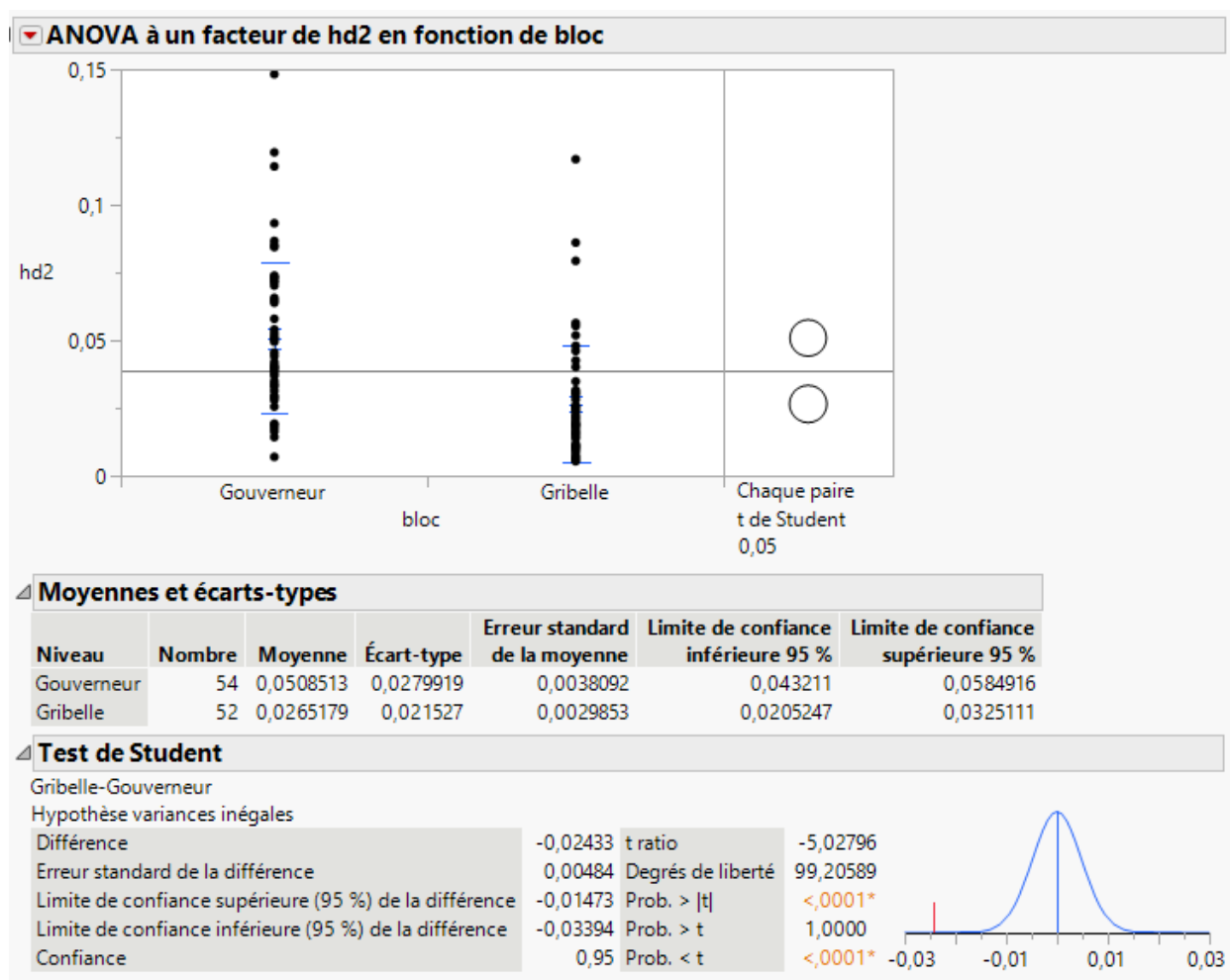


FIGURE 1 – ANOVA de la taille en fonction du bloc

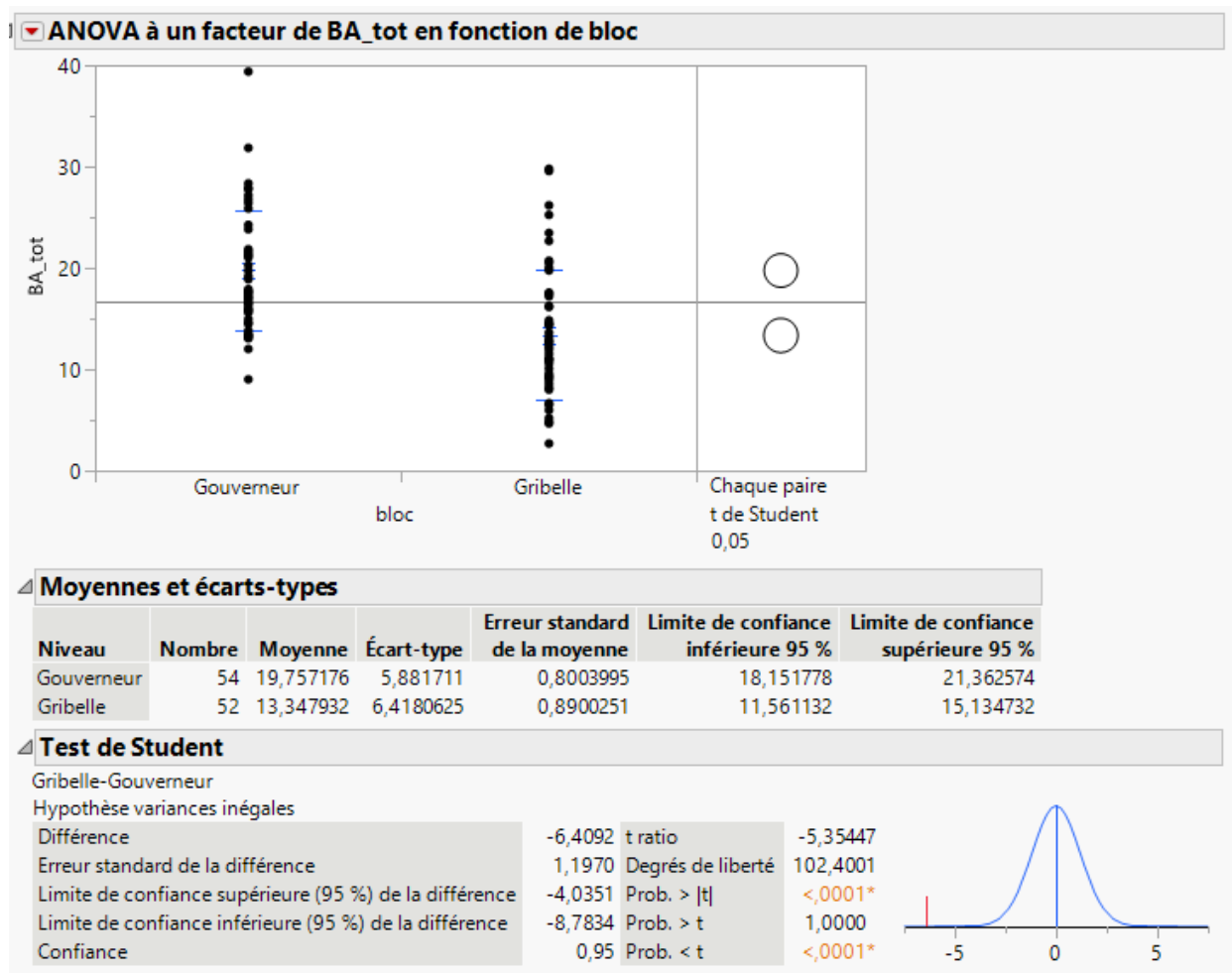


FIGURE 2 – ANOVA de la surface terrière totale en fonction du bloc

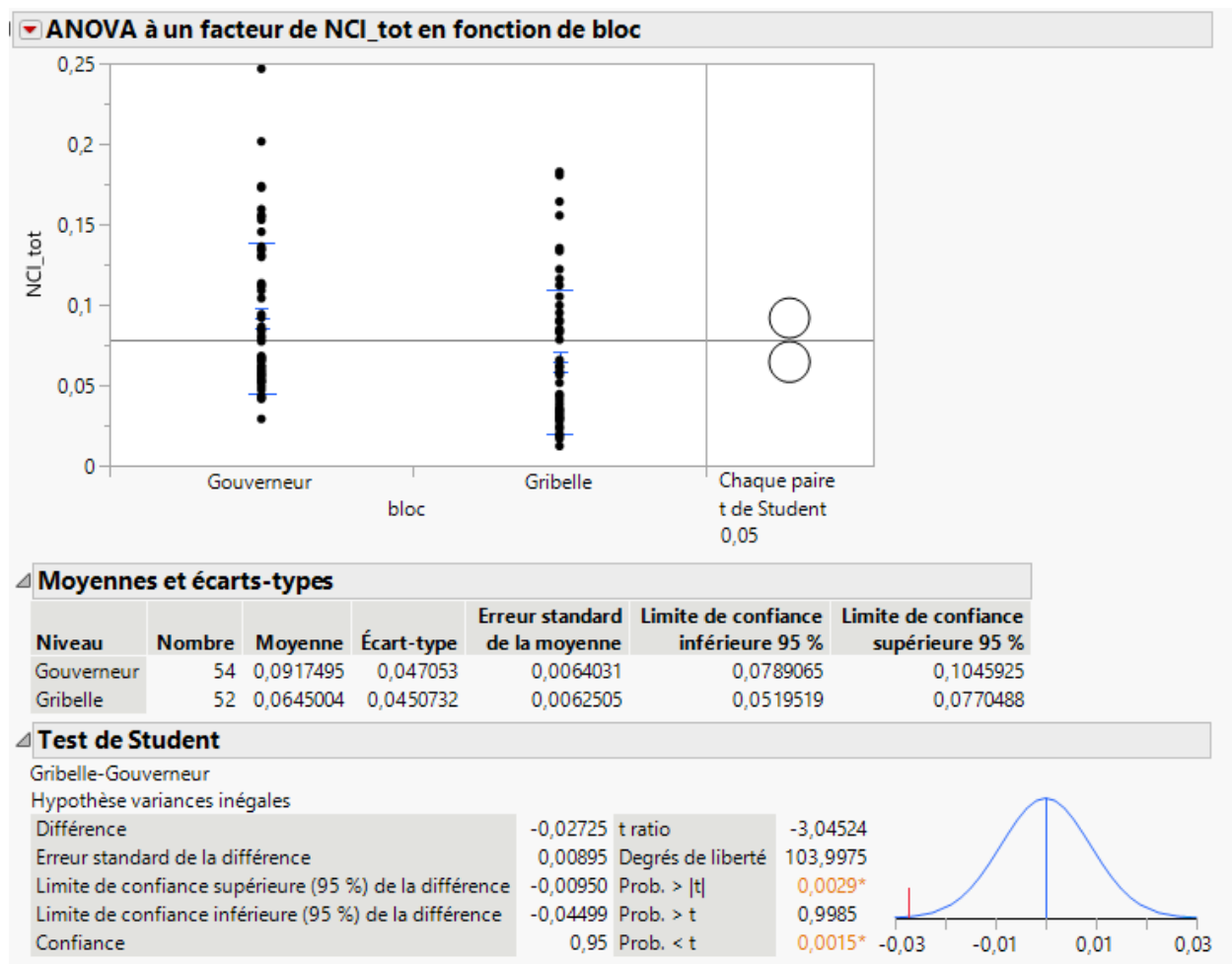


FIGURE 3 – ANOVA de l'indice de compétition du voisinage total en fonction du bloc

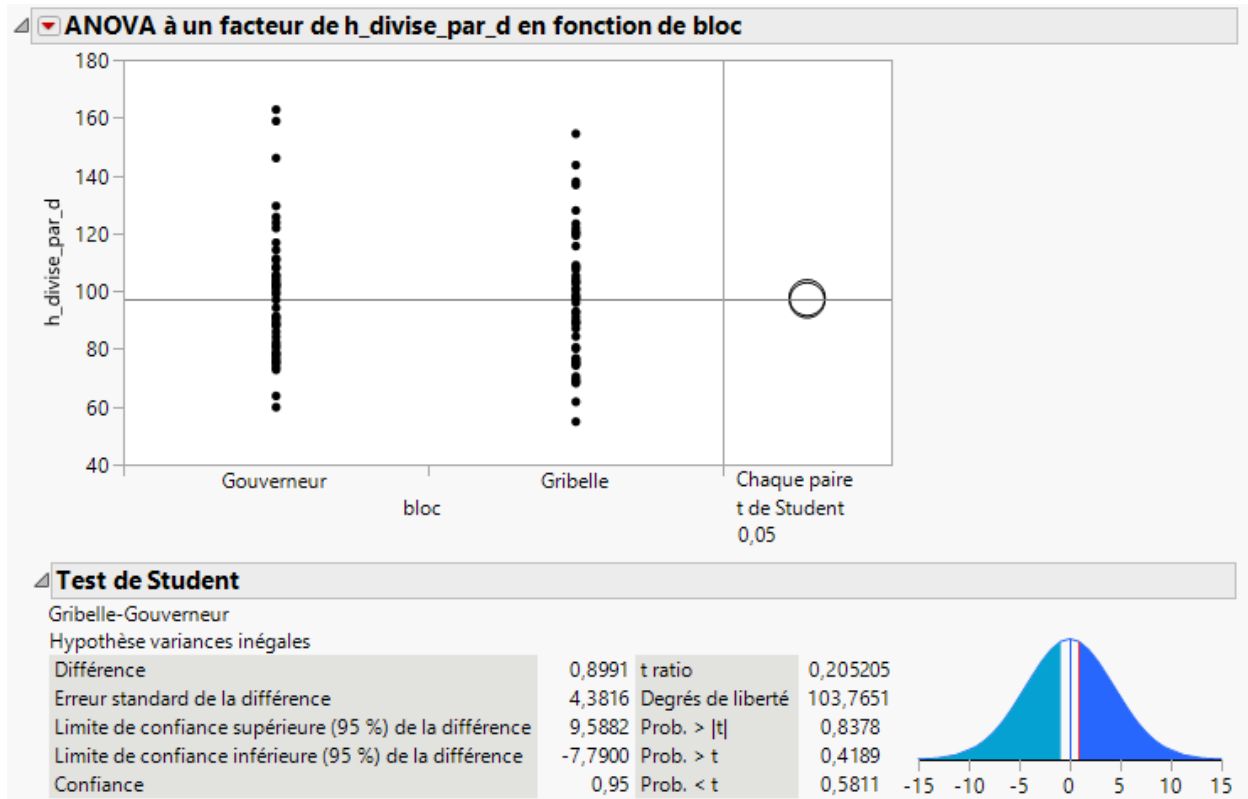


FIGURE 4 – ANOVA du facteur d'élancement en fonction du bloc

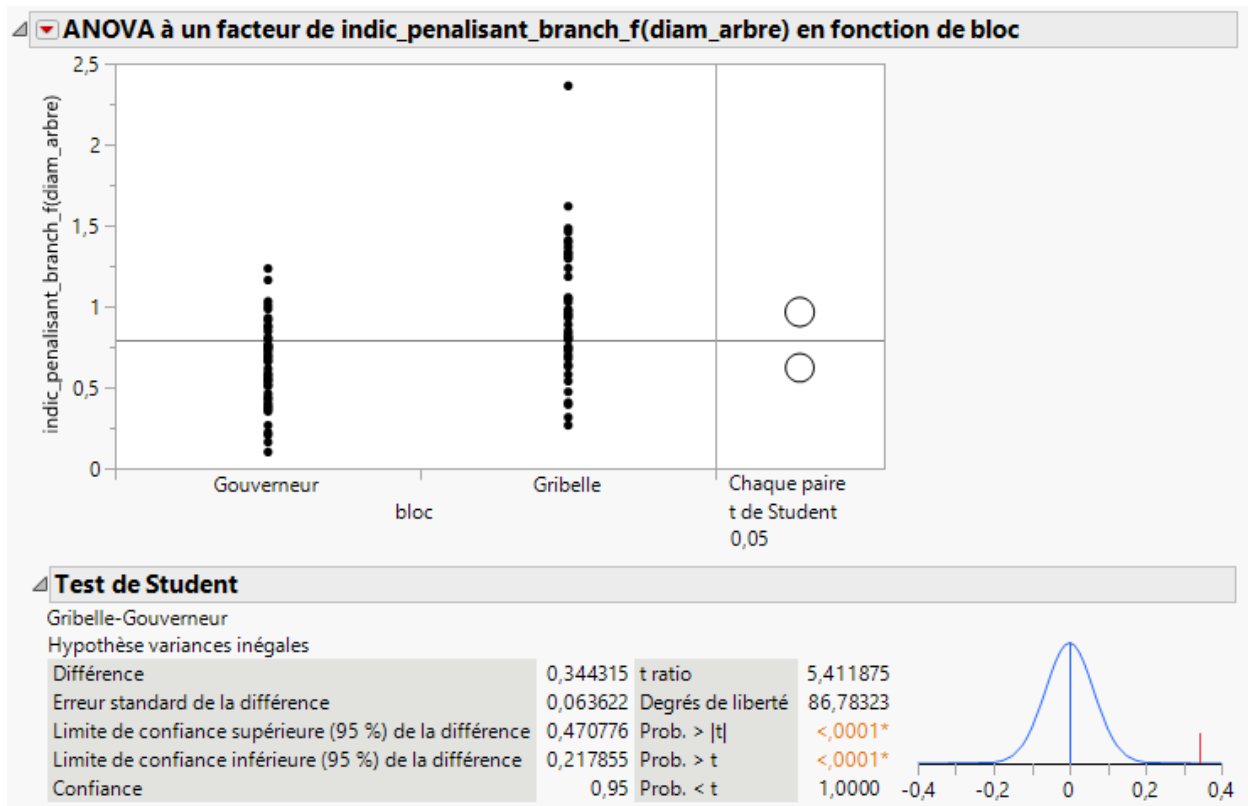


FIGURE 5 – ANOVA de l'indicateur pénalisant la branchaison (formule 2) en fonction du bloc

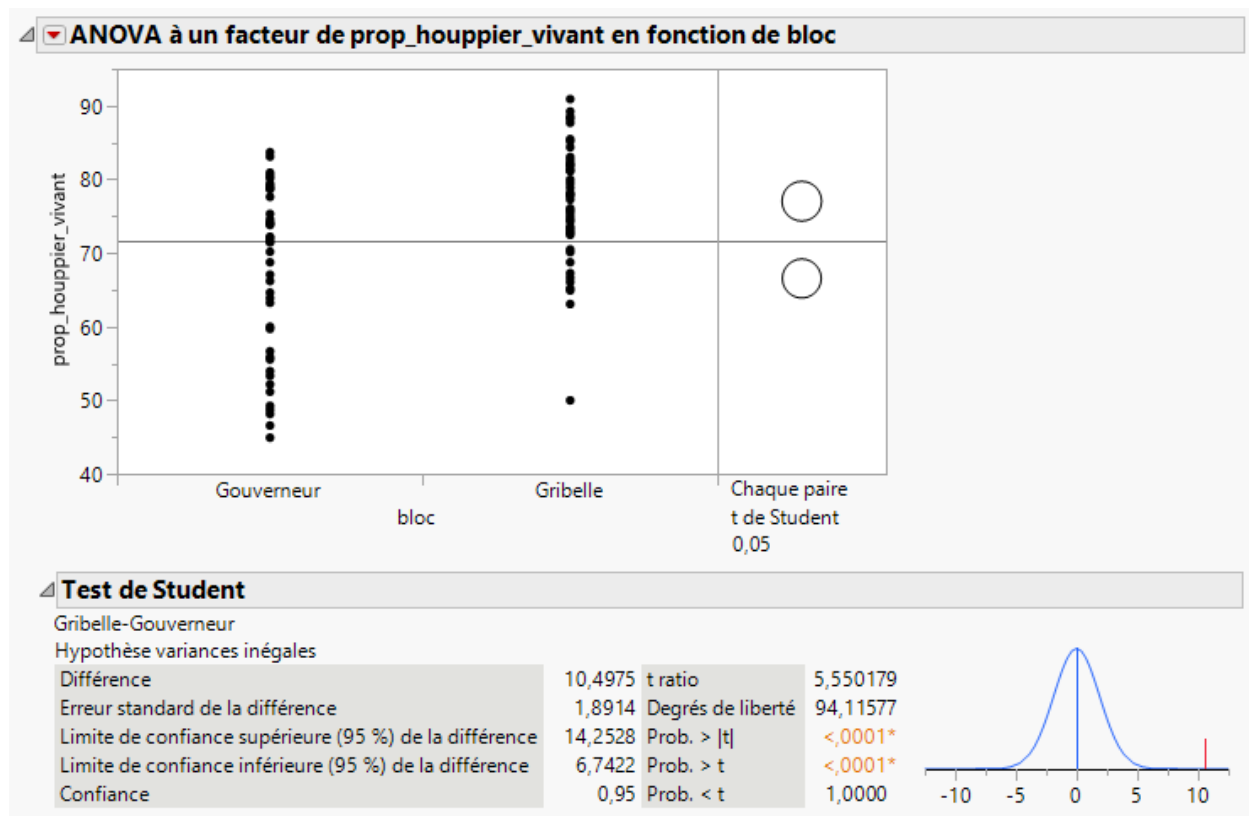


FIGURE 6 – ANOVA de la proportion du houppier vivant en fonction du bloc

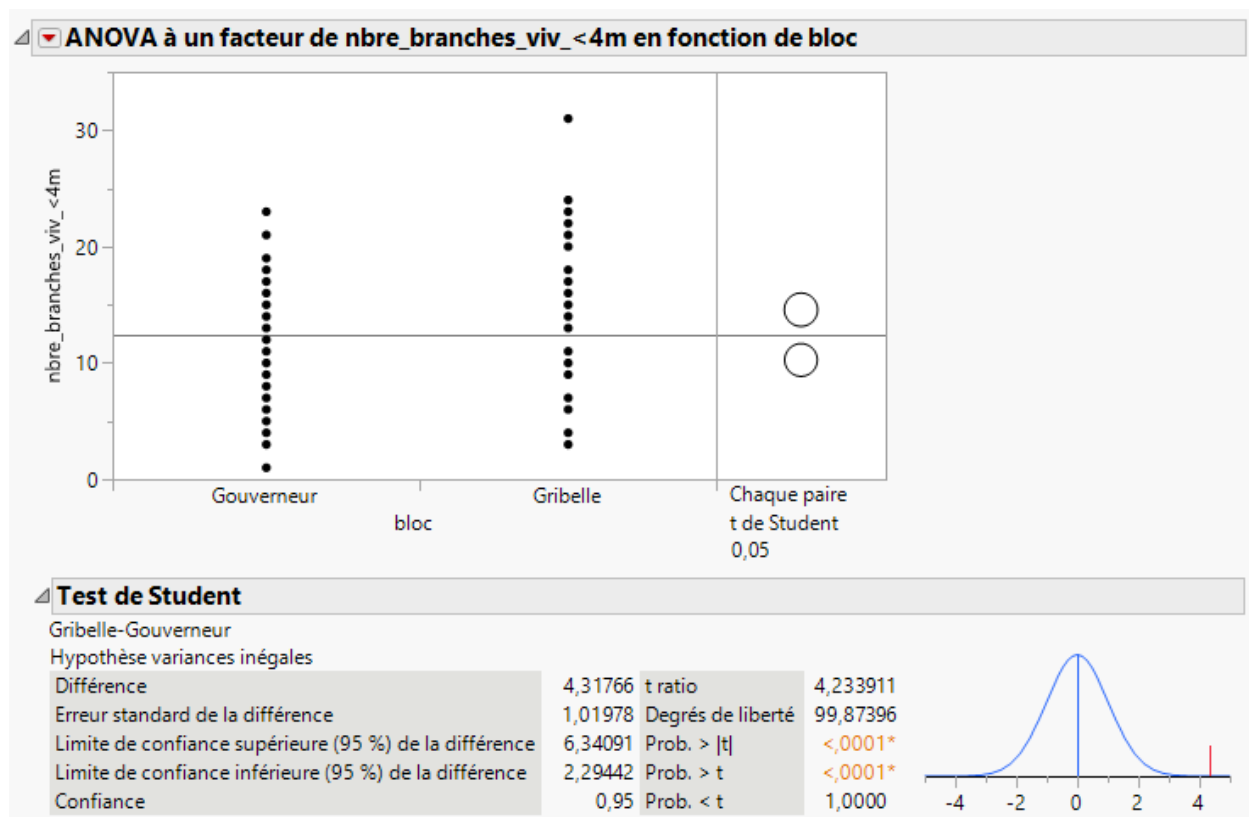


FIGURE 7 – ANOVA du nombre de branches vivantes entre 0 et 4m en fonction du bloc

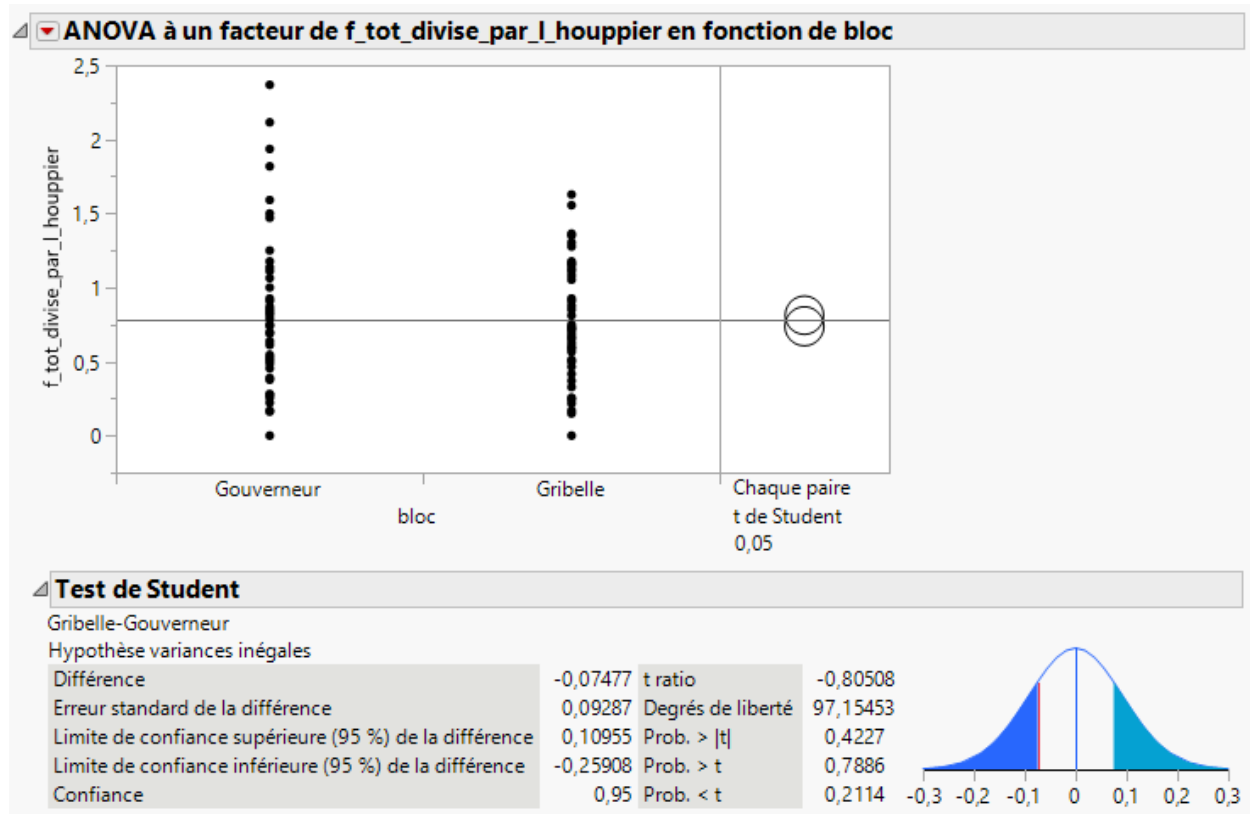


FIGURE 8 – ANOVA du nombre de fourches total ramené à la longueur du houppier en fonction du bloc

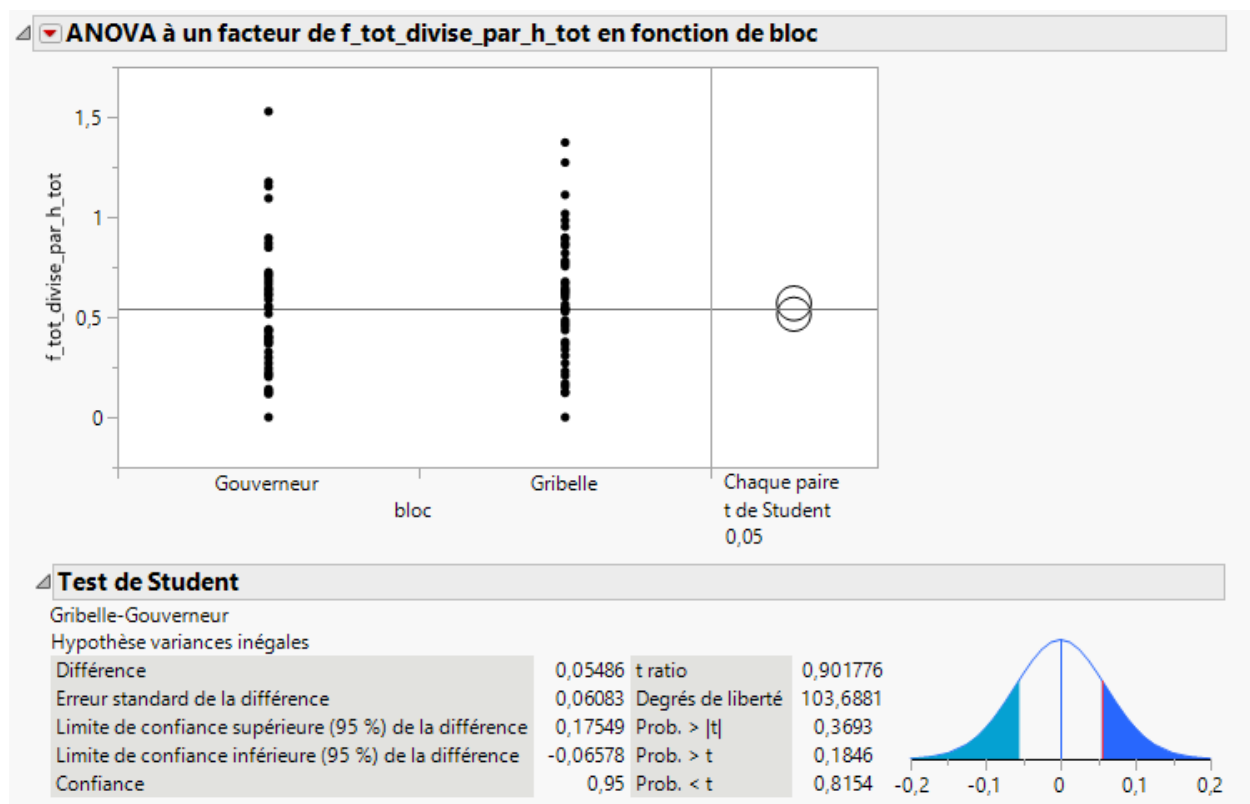


FIGURE 9 – ANOVA du nombre de fourches total ramené à la hauteur totale en fonction du bloc

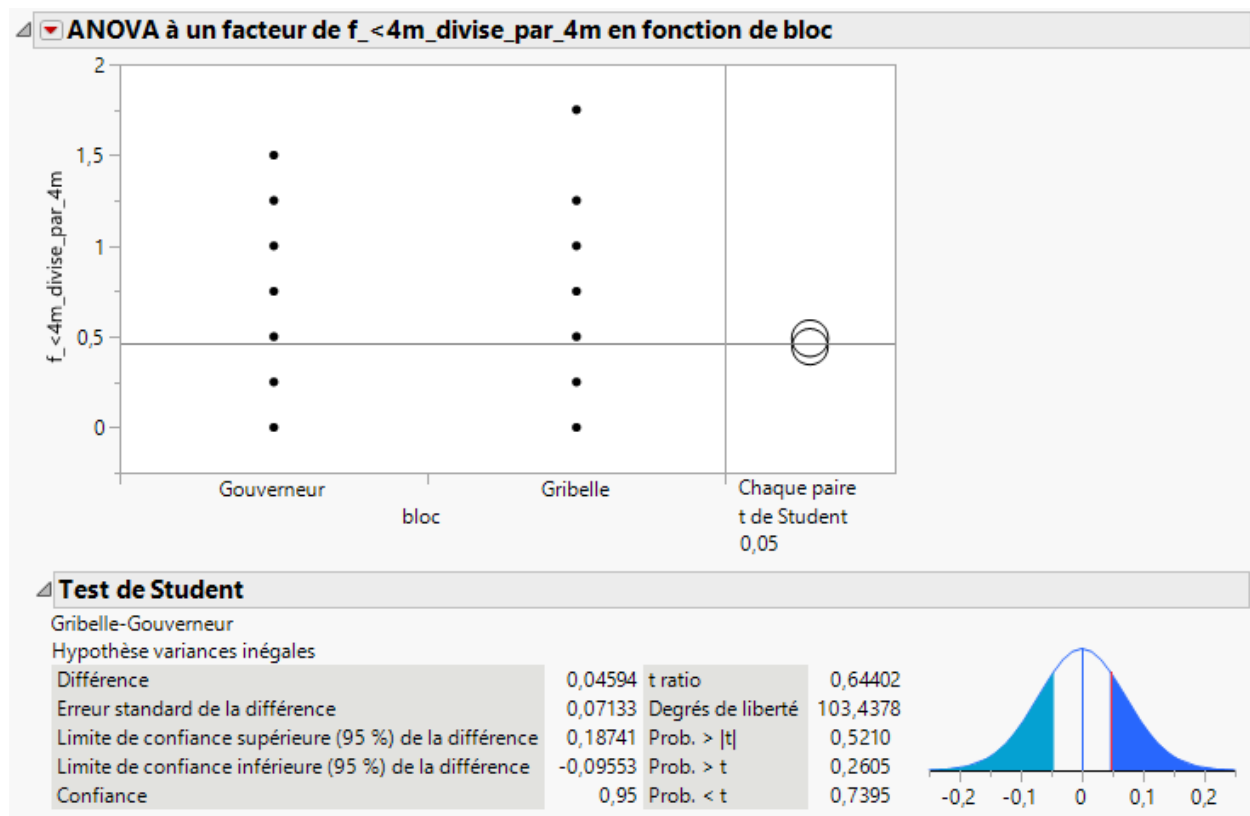


FIGURE 10 – ANOVA du nombre de fourches en deçà de 4m ramené à une hauteur de 4m en fonction du bloc

Annexe E : Procédure de sélection par la méthode d'analyse statistique pas à pas de JMP Pro 16

Ajustement pas-à-pas pour h_divise_par_d

Contrôle de la régression pas à pas

Règle d'arrêt : BIC minimum ➡ Tout entrer Construire un modèle

Sens : Montante ⬅ Tout supprimer Exécuter le modèle

Règles : Combiner

Lancer Arrêter Pas à pas

Somme des carrés des écarts (SSE)	Degrés de liberté de l'erreur (DFE)	RMSE	R carré	R carré ajusté	Cp	p	AICc	BIC
11329,845	101	10,591349	0,7858	0,7773	11,649889	5	808,8697	824,0018

Estimations actuelles

Verrouiller	Saisi	Coefficient	Estimation	Degrés de liberté du numérateur	Somme des carrés	"Rapport F"	"Prob. > F"
☒	☒	Constante	1,97443773	1	0	0,000	1
☐	☒	bloc{Gouverneur-Gribelle}	4,91441405	1	1331,575	11,870	0,00083
☐	☐	hd2	0	1	57,14052	0,507	0,47814
☐	☒	ln(hd2)	-22,067667	1	19622,88	174,928	9e-24
☐	☐	BA_1	0	1	224,3407	2,020	0,15834
☐	☐	BA_2	0	1	16,32813	0,144	0,70483
☐	☐	BA_3	0	1	0,205291	0,002	0,96613
☐	☐	BA_4	0	1	168,9991	1,514	0,22138
☐	☐	BA_5	0	1	414,1183	3,794	0,05425
☐	☐	BA_dec	0	1	113,2404	1,010	0,31743
☐	☐	BA_con	0	1	288,8454	2,616	0,10893
☐	☐	BA_tot	0	1	23,38662	0,207	0,65024
☐	☐	NCI_1	0	1	291,7942	2,644	0,10712
☐	☐	NCI_2	0	1	16,29325	0,144	0,70513
☐	☐	NCI_3	0	1	0,220038	0,002	0,96494
☐	☐	NCI_4	0	1	170,4756	1,528	0,21936
☐	☒	NCI_5	71,3564266	1	162,0974	1,445	0,23214
☐	☐	NCI_dec	0	1	170,4757	1,528	0,21936
☐	☐	NCI_con	0	1	170,4756	1,528	0,21936
☐	☒	NCI_tot	190,144352	1	710,8322	6,337	0,0134

FIGURE 11 – Procédure de sélection automatique du meilleur modèle pour le rapport h/d

Ajustement pas-à-pas pour indic_penalissant_branch_f(diam_arbre)

Contrôle de la régression pas à pas

Règle d'arrêt : BIC minimum ➡ Tout entrer Construire un modèle

Sens : Montante ⬅ Tout supprimer Exécuter le modèle

Règles : Combiner

Lancer Arrêter Pas à pas

Somme des carrés des écarts (SSE)	Degrés de liberté de l'erreur (DFE)	RMSE	R carré	R carré ajusté	Cp	p	AICc	BIC
8,9277103	103	0,2944092	0,3677	0,3554	2,190334	3	46,93742	57,19514

Estimations actuelles

Verrouiller	Saisi	Coefficient	Estimation	Degrés de liberté du numérateur	Somme des carrés	"Rapport F"	"Prob. > F"
☒	☒	Constante	0,520769	1	0	0,000	1
☐	☐	bloc{Gouverneur-Gribelle}	0	1	0,206508	2,415	0,12326
☐	☒	ln(hd2)	-0,1813988	1	1,756541	20,265	1,78e-5
☐	☐	BA_1	0	1	0,050298	0,578	0,44888
☐	☐	BA_2	0	1	0,01308	0,150	0,69966
☐	☐	BA_3	0	1	0,043075	0,495	0,48352
☐	☐	BA_4	0	1	0,133128	1,544	0,21687
☐	☐	BA_5	0	1	0,011146	0,127	0,72178
☐	☐	BA_dec	0	1	0,030371	0,348	0,55645
☐	☐	BA_con	0	1	0,030371	0,348	0,55645
☐	☒	BA_tot	-0,0219028	1	2,291181	26,434	1,3e-6
☐	☐	NCL_1	0	1	0,06568	0,756	0,38664
☐	☐	NCL_2	0	1	0,020382	0,233	0,63005
☐	☐	NCL_3	0	1	0,040181	0,461	0,49863
☐	☐	NCL_4	0	1	0,146412	1,701	0,19514
☐	☐	NCL_5	0	1	0,014384	0,165	0,6858
☐	☐	NCL_dec	0	1	0,035144	0,403	0,52691
☐	☐	NCL_con	0	1	0,005776	0,066	0,79771
☐	☐	NCL_tot	0	1	0,001104	0,013	0,91081

FIGURE 12 – Procédure de sélection automatique du meilleur modèle pour l'indicateur pénalisant la branchaison (formule 2)

Ajustement pas-à-pas pour prop_houppier_vivant

Contrôle de la régression pas à pas

Règle d'arrêt : BIC minimum → Tout entrer Construire un modèle

Sens : Montante ← Tout supprimer Exécuter le modèle

Règles : Combiner

Lancer Arrêter Pas à pas

Somme des carrés des écarts (SSE)	Degrés de liberté de l'erreur (DFE)	RMSE	R carré	R carré ajusté	Cp	p	AICc	BIC
6594,7596	103	8,0016744	0,4892	0,4793	12,427081	3	747,0537	757,3114

Estimations actuelles

Verrouiller	Saisi	Coefficient	Estimation	Degrés de liberté du numérateur	Somme des carrés	"Rapport F"	"Prob. > F"
☒	☒	Constante	92,1655546	1	0	0,000	1
☐	☐	bloc{Gouverneur-Gribelle}	0	1	55,14318	0,860	0,35591
☐	☐	hd2	0	1	224,6116	3,597	0,06073
☐	☐	BA_1	0	1	23,35078	0,362	0,54849
☐	☐	BA_2	0	1	46,87558	0,730	0,39482
☐	☐	BA_3	0	1	5,526271	0,086	0,77051
☐	☐	BA_4	0	1	58,28533	0,910	0,34249
☐	☐	BA_5	0	1	58,28533	0,910	0,34249
☐	☐	BA_dec	0	1	25,82924	0,401	0,52796
☐	☒	BA_con	-0,6540405	1	2173,006	33,939	6,54e-8
☐	☐	BA_tot	0	1	25,82924	0,401	0,52796
☐	☐	NCI_1	0	1	44,2885	0,690	0,40823
☐	☐	NCI_2	0	1	54,57176	0,851	0,35842
☐	☐	NCI_3	0	1	2,524492	0,039	0,84372
☐	☐	NCI_4	0	1	72,20891	1,129	0,29045
☐	☐	NCI_5	0	1	35,90059	0,558	0,45666
☐	☒	NCI_dec	-629,44569	1	6307,286	98,510	1,1e-16
☐	☐	NCI_con	0	1	0,016054	0,000	0,98746
☐	☐	NCI_tot	0	1	0,016054	0,000	0,98746

FIGURE 13 – Procédure de sélection automatique du meilleur modèle pour la proportion du houppier vivant

Ajustement pas-à-pas pour nbre_branches_viv_ <4m

Contrôle de la régression pas à pas

Règle d'arrêt : BIC minimum → Tout entrer Construire un modèle

Sens : Montante ← Tout supprimer Exécuter le modèle

Règles : Combiner

Lancer Arrêter Pas à pas

Somme des carrés des écarts (SSE)	Degrés de liberté de l'erreur (DFE)	RMSE	R carré	R carré ajusté	Cp	p	AICc	BIC
2132,176	102	4,572055	0,3618	0,3430	5,3038797	4	629,5696	642,2868

Estimations actuelles

Verrouiller	Saisi	Coefficient	Estimation	Degrés de liberté du numérateur	Somme des carrés	"Rapport F"	"Prob. > F"
☒	☒	Constante	20,3480277	1	0	0,000	1
☐	☐	bloc(Gouverneur-Gribelle)	0	1	75,64525	3,715	0,05673
☐	☒	hd2	46,9441886	1	153,3856	7,338	0,00792
☐	☐	BA_1	0	1	48,42324	2,347	0,12864
☐	☐	BA_2	0	1	0,917928	0,044	0,83521
☐	☐	BA_3	0	1	8,701085	0,414	0,52148
☐	☐	BA_4	0	1	8,980716	0,427	0,51485
☐	☐	BA_5	0	1	4,1405	0,197	0,6585
☐	☐	BA_dec	0	1	1,172919	0,056	0,81408
☐	☐	BA_con	0	1	1,172919	0,056	0,81408
☐	☒	BA_tot	-0,4696369	1	1070,707	51,221	1,3e-10
☐	☒	NCl_1	-118,14749	1	213,7147	10,224	0,00185
☐	☐	NCl_2	0	1	0,924783	0,044	0,8346
☐	☐	NCl_3	0	1	7,313245	0,348	0,55678
☐	☐	NCl_4	0	1	8,965787	0,426	0,5152
☐	☐	NCl_5	0	1	7,022939	0,334	0,56473
☐	☐	NCl_dec	0	1	4,58209	0,218	0,64194
☐	☐	NCl_con	0	1	1,687704	0,080	0,77786
☐	☐	NCl_tot	0	1	13,49585	0,643	0,42438

FIGURE 14 – Procédure de sélection automatique du meilleur modèle pour le nombre de branches vivantes entre 0 et 4m

Ajustement pas-à-pas pour f_tot_divise_par_l_houppier

Contrôle de la régression pas à pas

Règle d'arrêt : BIC minimum → Tout entrer Construire un modèle

Sens : Montante ← Tout supprimer Exécuter le modèle

Règles : Combiner

Lancer Arrêter Pas à pas

Somme des carrés des écarts (SSE)	Degrés de liberté de l'erreur (DFE)	RMSE	R carré	R carré ajusté	Cp	p	AICc	BIC
17,414316	101	0,4152336	0,2799	0,2514	0,1177148	5	122,2119	137,3441

Estimations actuelles

Verrouiller	Saisi	Coefficient	Estimation	Degrés de liberté du numérateur	Somme des carrés	"Rapport F"	"Prob. > F"
☒	☒	Constante	0,75513542	1	0	0,000	1
☐	☐	bloc{Gribelle-Gouverneur}	0	1	0,005079	0,029	0,86472
☐	☒	hd2	-4,000039	1	1,08457	6,290	0,01373
☐	☐	BA_1	0	1	0,085072	0,491	0,48515
☐	☐	BA_2	0	1	0,000374	0,002	0,96311
☐	☐	BA_3	0	1	0,068518	0,395	0,53111
☐	☐	BA_4	0	1	0,233984	1,362	0,24598
☐	☒	BA_5	-0,0119153	1	0,933593	5,415	0,02196
☐	☐	BA_dec	0	1	0,00217	0,012	0,91135
☐	☐	BA_con	0	1	0,233984	1,362	0,24598
☐	☐	BA_tot	0	1	0,198868	1,155	0,28506
☐	☒	NCL_1	13,0550548	1	1,945507	11,284	0,0011
☐	☐	NCL_2	0	1	0,00279	0,016	0,89952
☐	☒	NCL_3	29,441532	1	0,929542	5,391	0,02225
☐	☐	NCL_4	0	1	0,227638	1,325	0,25253
☐	☐	NCL_5	0	1	3,632e-7	0,000	0,99885
☐	☐	NCL_dec	0	1	0,00279	0,016	0,89952
☐	☐	NCL_con	0	1	0,212977	1,238	0,2685
☐	☐	NCL_tot	0	1	0,230935	1,344	0,2491

FIGURE 15 – Procédure de sélection automatique du meilleur modèle pour le nombre de fourches total ramené à la longueur du houppier

Ajustement pas-à-pas pour f_tot_divise_par_h_tot

Contrôle de la régression pas à pas

Règle d'arrêt : BIC minimum → Tout entrer Construire un modèle

Sens : Montante ← Tout supprimer Exécuter le modèle

Règles : Combiner

Lancer Arrêter Pas à pas

Somme des carrés des écarts (SSE)	Degrés de liberté de l'erreur (DFE)	RMSE	R carré	R carré ajusté	Cp	p	AICc	BIC
8,5531566	104	0,2867785	0,1670	0,1590	2,5894276	2	40,23356	47,98858

Estimations actuelles

Verrouiller	Saisi	Coefficient	Estimation	Degrés de liberté du numérateur	Somme des carrés	"Rapport F"	"Prob. > F"
☒	☒	Constante	0,64161947	1	0	0,000	1
☐	☐	bloc{Gouverneur-Gribelle}	0	1	0,047274	0,572	0,45101
☐	☐	hd2	0	1	0,224273	2,773	0,09888
☐	☐	BA_1	0	1	0,050488	0,612	0,43598
☐	☐	BA_2	0	1	0,186502	2,296	0,13277
☐	☐	BA_3	0	1	0,073536	0,893	0,34682
☐	☐	BA_4	0	1	0,008447	0,102	0,7503
☐	☒	BA_5	-0,0137726	1	1,714533	20,847	1,37e-5
☐	☐	BA_dec	0	1	0,000504	0,006	0,93807
☐	☐	BA_con	0	1	0,008447	0,102	0,7503
☐	☐	BA_tot	0	1	0,002718	0,033	0,85677
☐	☐	NCL_1	0	1	0,04883	0,591	0,44364
☐	☐	NCL_2	0	1	0,175895	2,163	0,14445
☐	☐	NCL_3	0	1	0,10196	1,243	0,26755
☐	☐	NCL_4	0	1	0,015383	0,186	0,66752
☐	☐	NCL_5	0	1	0,001005	0,012	0,91262
☐	☐	NCL_dec	0	1	0,002309	0,028	0,86788
☐	☐	NCL_con	0	1	0,016268	0,196	0,65867
☐	☐	NCL_tot	0	1	0,006419	0,077	0,78147

FIGURE 16 – Procédure de sélection automatique du meilleur modèle pour le nombre de fourches total ramené à la hauteur totale

Ajustement pas-à-pas pour f_<4m_divise_par_4m

Contrôle de la régression pas à pas

Règle d'arrêt : BIC minimum → Tout entrer Construire un modèle

Sens : Montante ← Tout supprimer Exécuter le modèle

Règles : Combiner

Lancer Arrêter Pas à pas

Somme des carrés des écarts (SSE)	Degrés de liberté de l'erreur (DFE)	RMSE	R carré	R carré ajusté	Cp	p	AICc	BIC
12,107474	104	0,3412008	0,1434	0,1352	-0,129252	2	77,07095	84,82597

Estimations actuelles

Verrouiller	Saisi	Coefficient	Estimation	Degrés de liberté du numérateur	Somme des carrés	"Rapport F"	"Prob. > F"
☒	☒	Constante	0,57409285	1	0	0,000	1
☐	☐	bloc{Gouverneur-Gribelle}	0	1	0,021624	0,184	0,66861
☐	☐	hd2	0	1	0,260116	2,261	0,13569
☐	☐	BA_1	0	1	0,099886	0,857	0,3568
☐	☐	BA_2	0	1	0,274814	2,392	0,12501
☐	☐	BA_3	0	1	0,000227	0,002	0,96504
☐	☐	BA_4	0	1	0,047288	0,404	0,52651
☐	☐	BA_5	0	1	0,001666	0,014	0,90547
☐	☐	BA_dec	0	1	0,000315	0,003	0,9588
☐	☐	BA_con	0	1	0,044116	0,377	0,54074
☐	☐	BA_tot	0	1	0,02268	0,193	0,6611
☐	☐	NCL_1	0	1	0,110539	0,949	0,33225
☐	☐	NCL_2	0	1	0,279005	2,430	0,12214
☐	☐	NCL_3	0	1	0,002737	0,023	0,879
☐	☐	NCL_4	0	1	0,030368	0,259	0,6119
☐	☒	NCL_5	-2,3655166	1	2,02696	17,411	6,26e-5
☐	☐	NCL_dec	0	1	0,000325	0,003	0,95814
☐	☐	NCL_con	0	1	0,030368	0,259	0,6119
☐	☐	NCL_tot	0	1	0,028685	0,245	0,62195

FIGURE 17 – Procédure de sélection automatique du meilleur modèle pour le nombre de fourches en deçà de 4m ramené à une hauteur de 4m

Annexe F : Histogrammes empilés des modèles complets et du modèle choisi pour le nombre de fourches en deçà de quatre mètres ramené à une hauteur de quatre mètres

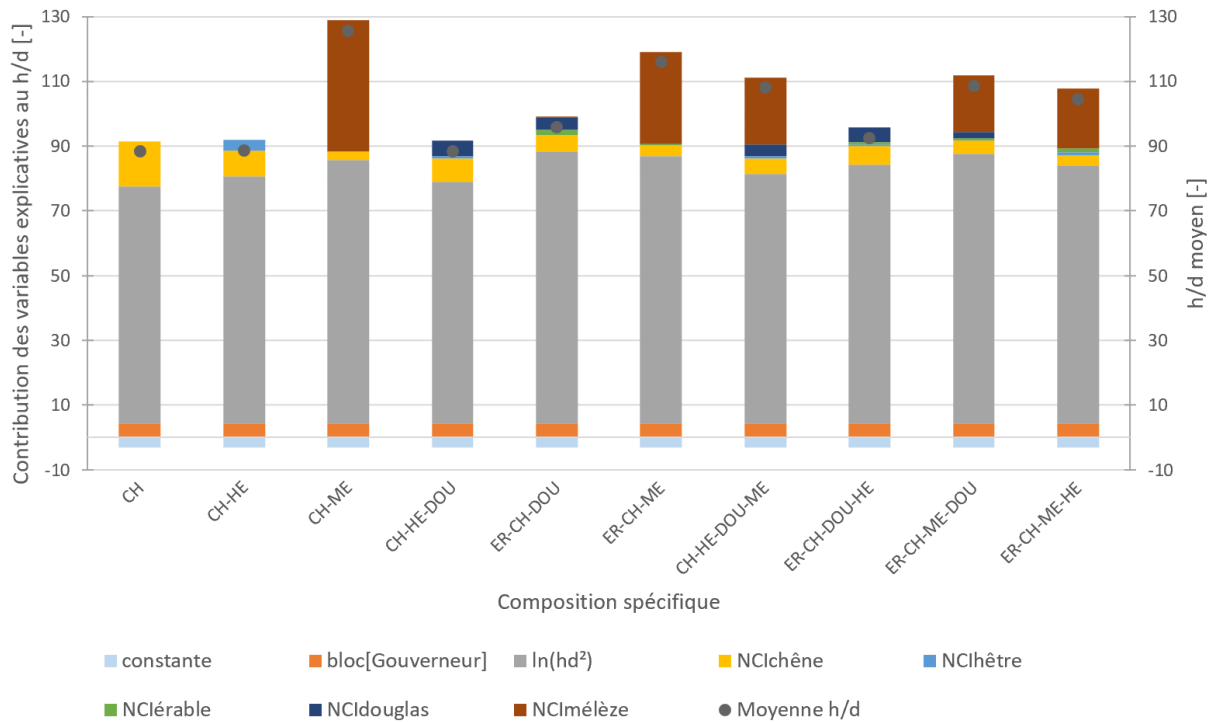


FIGURE 18 – Contribution des variables explicatives au rapport h/d [-] selon la composition spécifique pour le modèle le plus complet. La moyenne prédite du h/d selon ce modèle est affichée sur l'axe de droite.

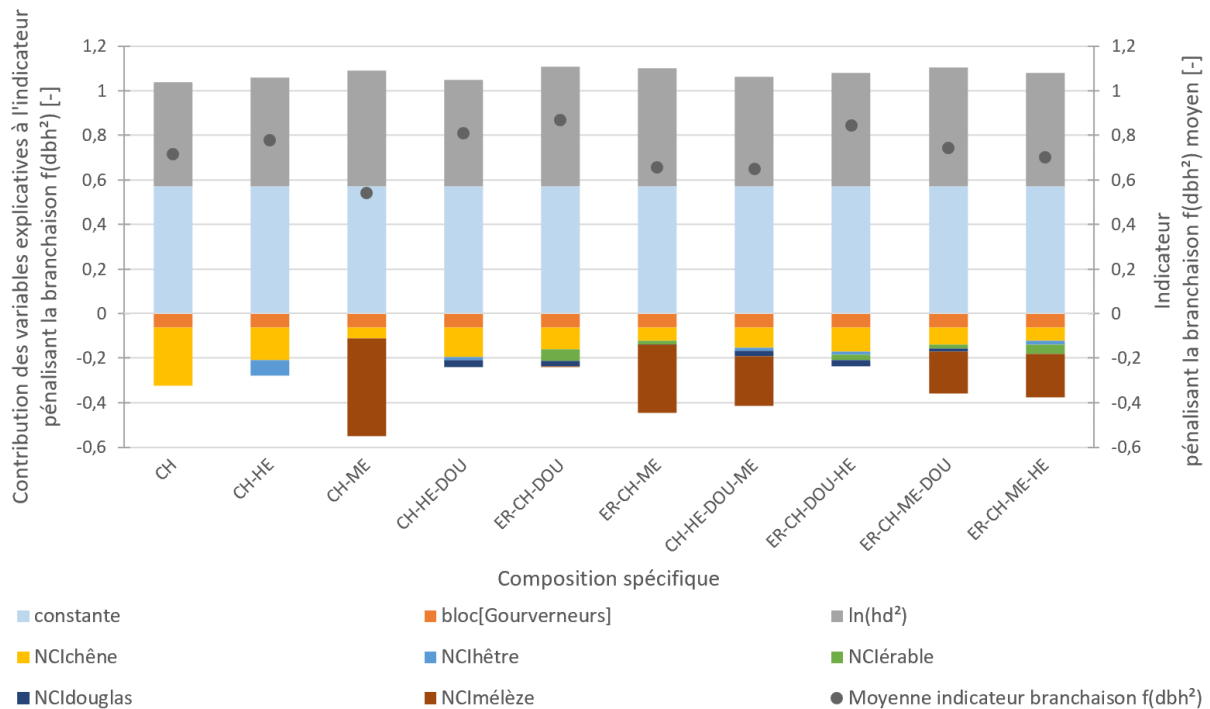


FIGURE 19 – Contribution des variables explicatives à l'indicateur pénalisant la branchaison, ramené au diamètre à hauteur de poitrine au carré, [-] selon la composition spécifique pour le modèle le plus complet. La moyenne prédite de l'indicateur selon ce modèle est affichée sur l'axe droite.

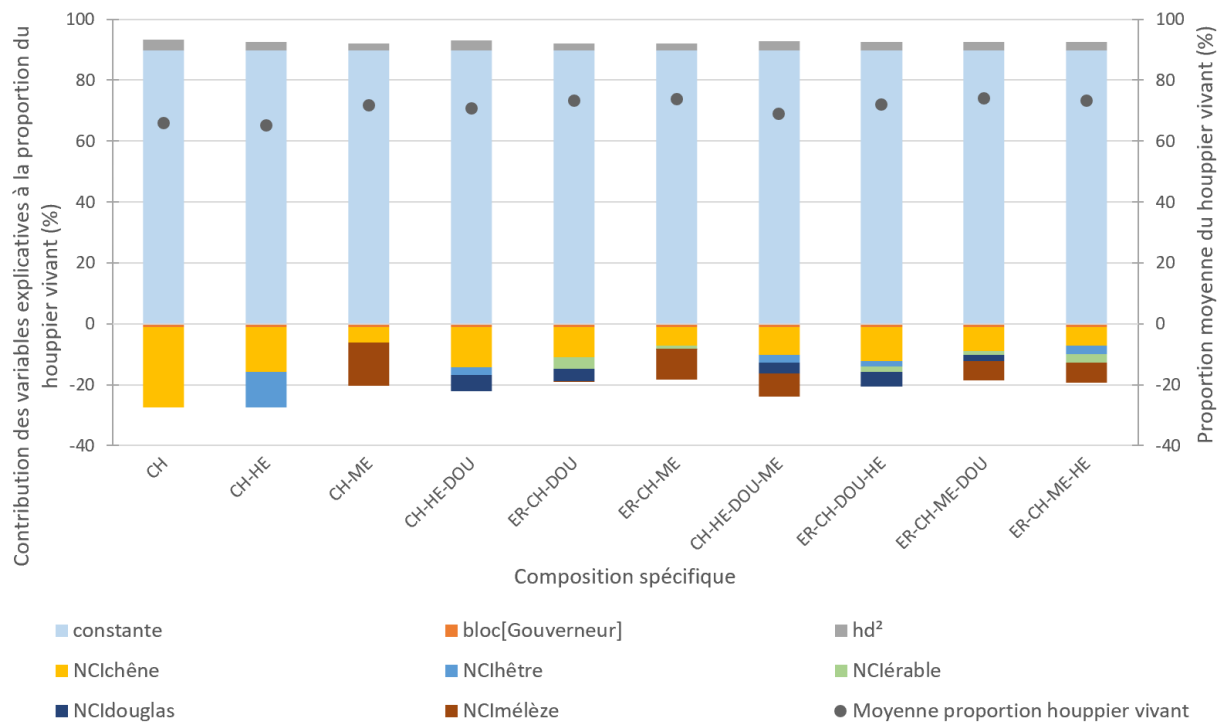


FIGURE 20 – Contribution des variables explicatives à la proportion du houppier vivant (%) selon la composition spécifique pour le modèle le plus complet. La moyenne prédite de cette proportion selon ce modèle est affichée sur l'axe de droite.

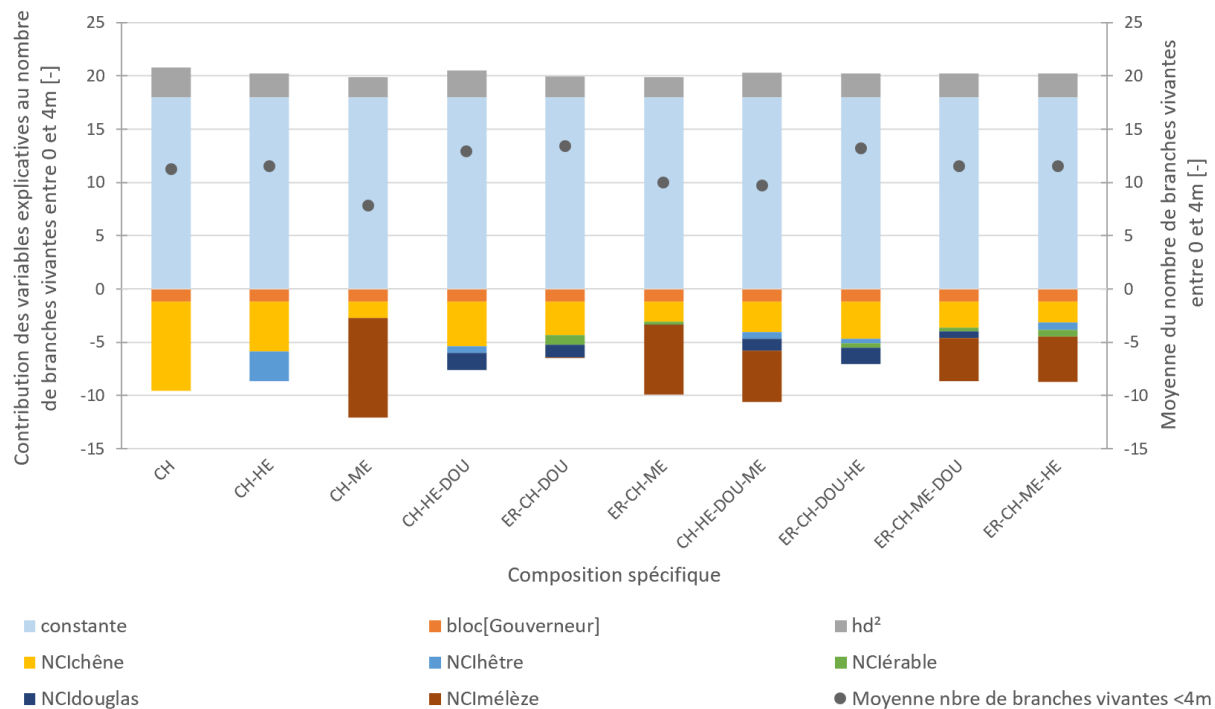


FIGURE 21 – Contribution des variables explicatives au nombre de branches vivantes en deçà de 4m [-] selon la composition spécifique pour le modèle le plus complet. La moyenne prédite de ce nombre de branches selon ce modèle est affichée sur l'axe de droite.

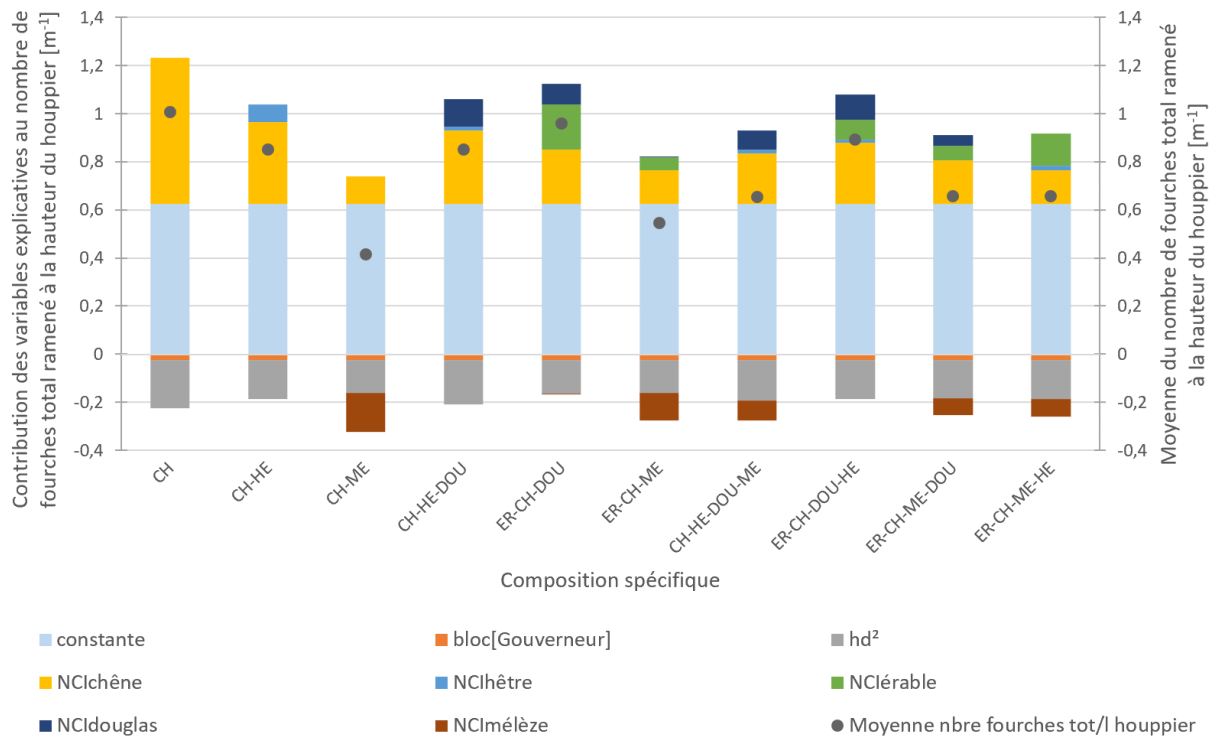


FIGURE 22 – Contribution des variables explicatives au nombre de fourches total ramené à la longueur du houppier [m^{-1}] selon la composition spécifique pour le modèle le plus complet. La moyenne prédite de ce nombre de fourches selon ce modèle est affichée sur l'axe de droite.

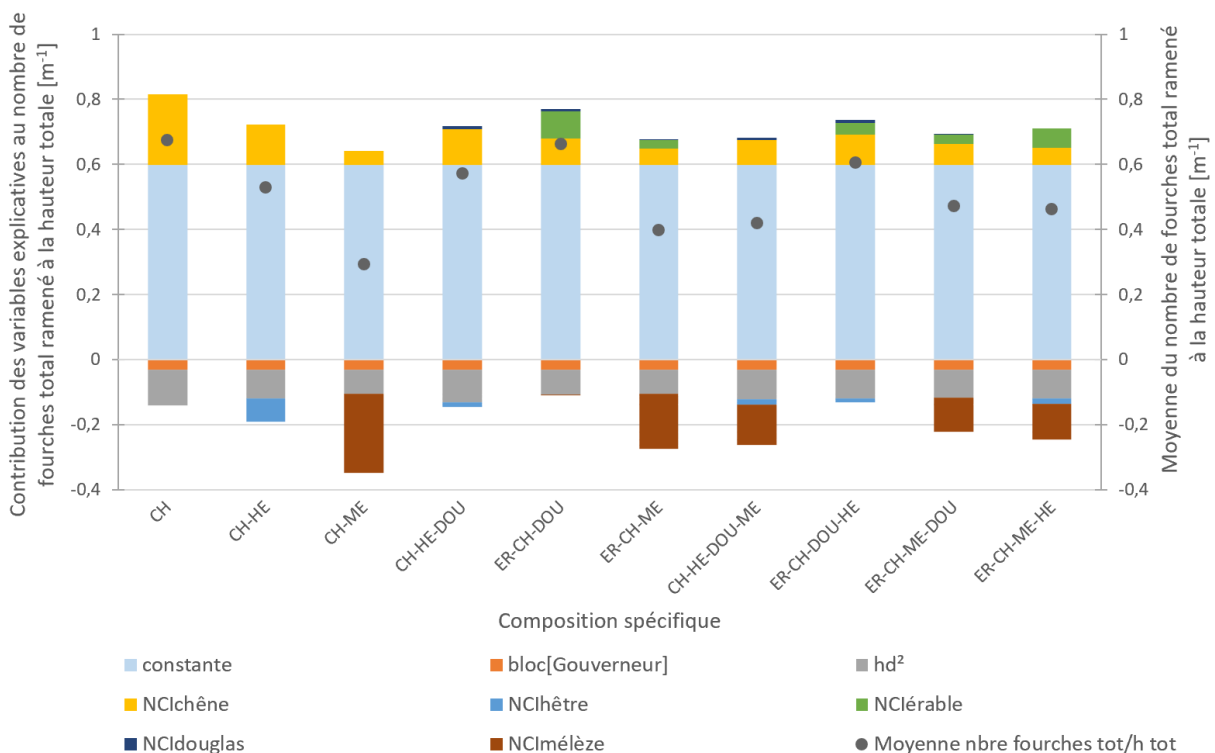


FIGURE 23 – Contribution des variables explicatives au nombre de fourches total ramené à la hauteur totale [m^{-1}] selon la composition spécifique pour le modèle le plus complet. La moyenne prédite de ce nombre de fourches selon ce modèle est affichée sur l'axe de droite.

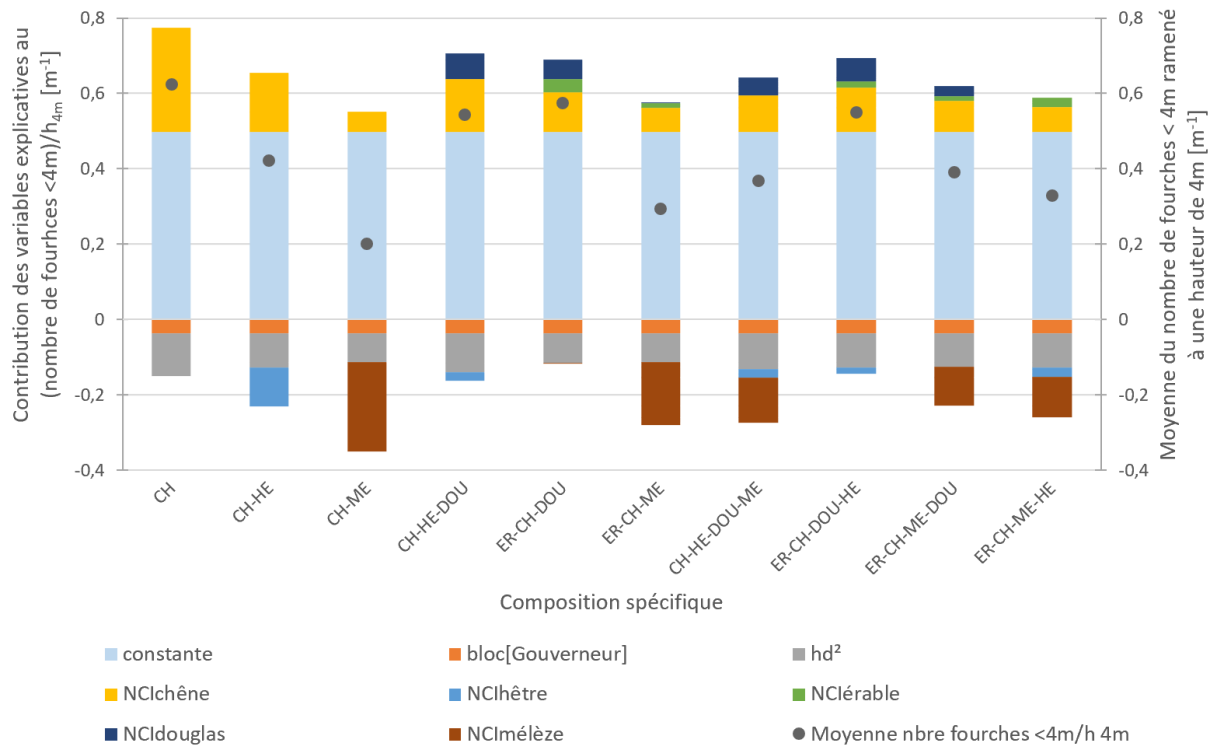


FIGURE 24 – Contribution des variables explicatives au nombre de fourches en deçà de 4m ramené à une hauteur de 4m [m⁻¹] selon la composition spécifique pour le modèle le plus complet. La moyenne prédite de ce nombre de fourches selon ce modèle est affichée sur l'axe de droite.

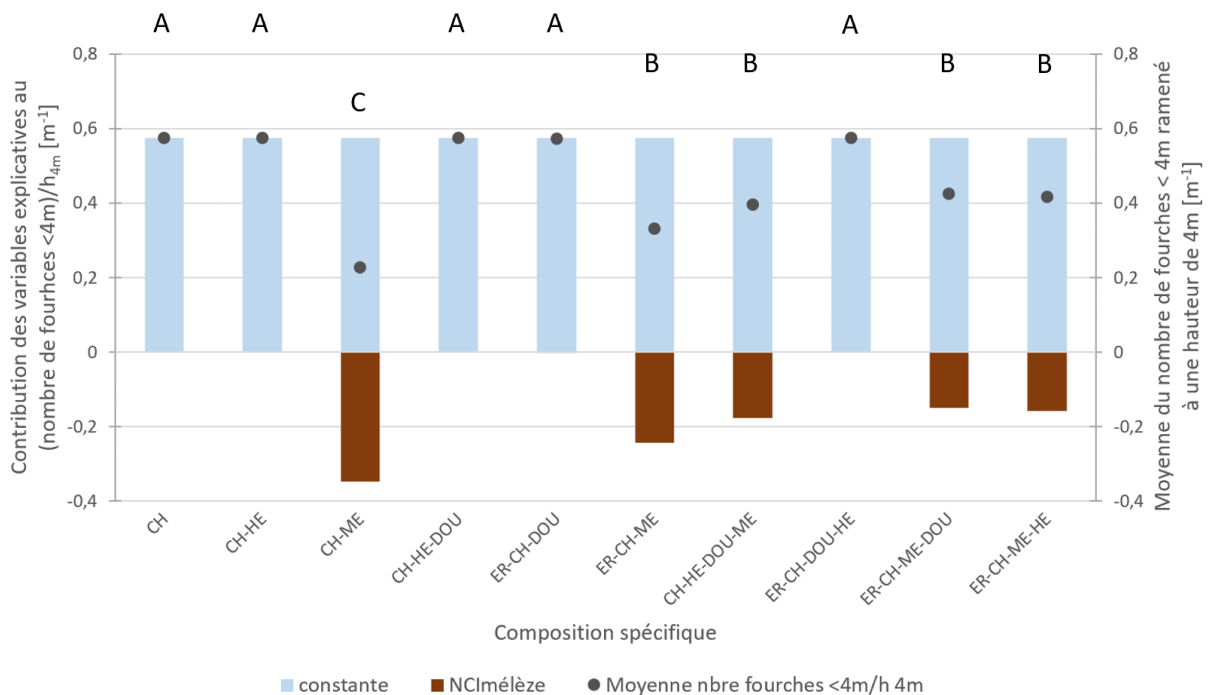


FIGURE 25 – Contribution des variables explicatives au nombre de fourches en deçà de 4m ramené à une hauteur de 4m [m⁻¹] (axe de gauche) selon la composition spécifique pour le modèle choisi. La moyenne prédite de ce nombre de fourches selon ce modèle est affichée sur l'axe de droite. Les compositions spécifiques qui portent la même lettre présentent des valeurs moyennes prédites non significativement différentes.

Annexe G : Analyse en composantes principales de la base de données

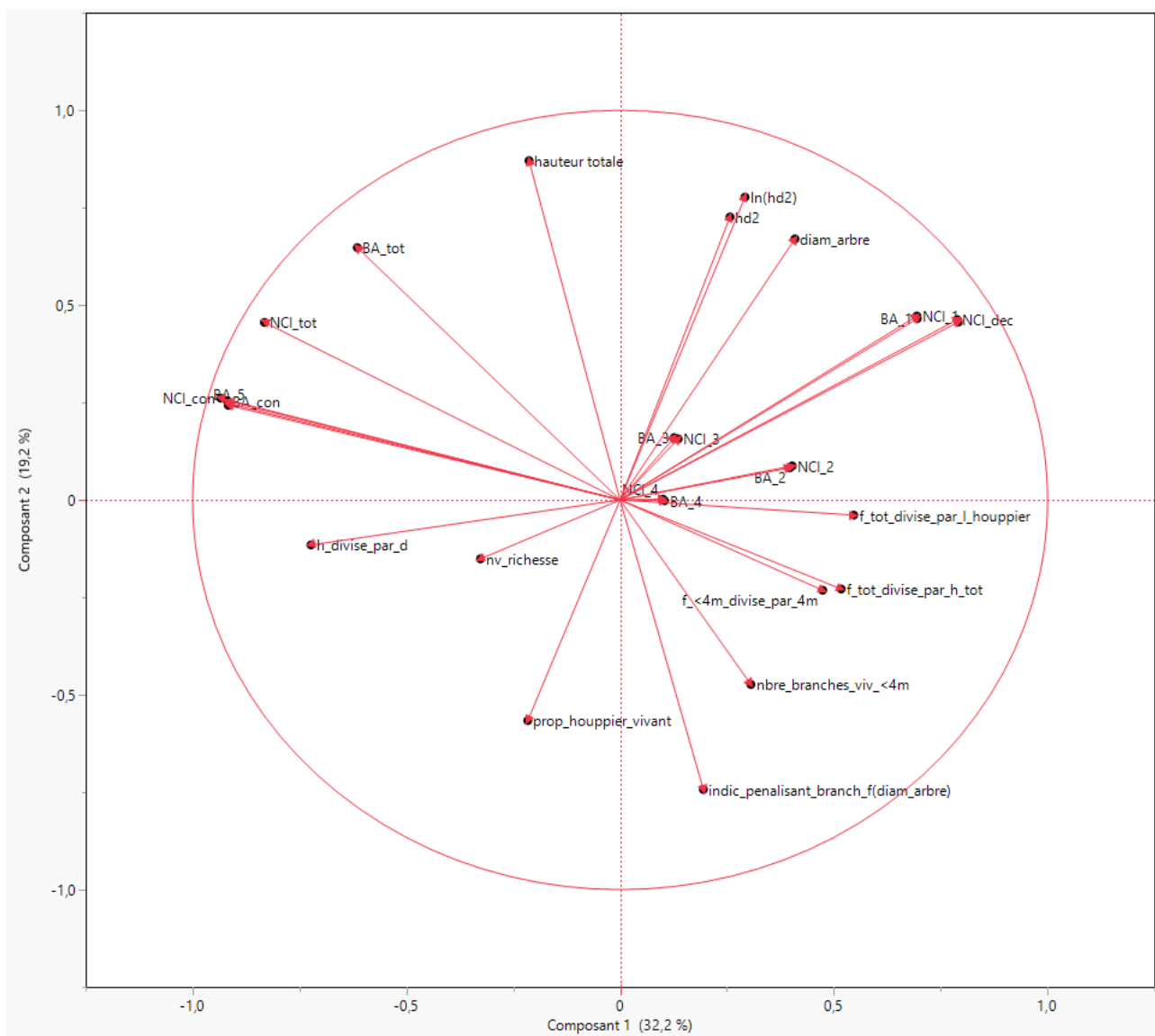


FIGURE 26 – Analyse en composantes principales du jeu de données

TABLEAU 9 – *Corrélations issues de l'analyse en composantes principales*

Composantes principales calculées avec les corrélations													
Corrélations													
	nv_richesse	h_divise	par_d	prop_houppier_vivant	indic_penalisant_branch	f(diam_arbre)	f_tot_divise	par_h_tot	f_tot_divise	par_L_houppier	f_<4m_divise	par_4m	nbre_branches_viv_<4m
nv_richesse	1,0000												
h_divise	0,1478	1,0000											
prop_houppier_vivant	0,2388	-0,0201	1,0000										
indic_penalisant_branch	0,1478	-0,0201	0,4044	1,0000									
f_tot_divise	0,185	-0,199	0,4044	1,0000	0,0173								
f_tot_divise	-0,1842	-0,2888	0,0173	0,0173	0,0173	1,0000							
f_tot_divise	-0,2194	-0,2615	-0,2913	0,2913	0,0186	0,9336	1,0000						
f_<4m_divise	-0,1749	-0,2489	-0,0186	0,5482	0,3262	0,8479	0,8115	1,0000					
nbre_branches_viv_<4m	-0,0317	-0,5192	0,5482	0,6043	0,2313	0,2313	0,2741	1,0000					
diam_arbre	-0,1018	-0,7293	-0,1404	-0,3488	0,0272	0,0272	0,0746	0,0746	1,0000				
hauteur_totale	0,0117	0,0272	-0,2473	-0,1396	-0,4532	-0,2254	-0,1211	-0,0984	-0,2184	0,0532	0,9538	0,7141	1,0000
ln(hd2)	-0,0508	-0,5600	-0,1396	-0,1970	-0,4532	0,0130	0,0812	-0,0092	-0,0984	0,0569	0,9619	0,7752	0,7141
BA_1	-0,0978	-0,5966	-0,1970	-0,5222	-0,4532	0,2631	0,3795	-0,0092	-0,0984	0,0569	0,9619	0,7752	0,7141
BA_2	-0,4812	-0,3672	-0,5222	-0,2260	-0,1722	0,2631	0,3795	-0,0092	-0,0984	0,0569	0,9619	0,7752	0,7141
BA_3	-0,1071	-0,2212	-0,2260	-0,0756	0,0339	-0,0004	0,0731	-0,0160	0,0441	0,0079	0,1087	-0,0811	0,1289
BA_4	0,2465	-0,1600	-0,0756	-0,1021	-0,1171	0,1272	0,1672	0,0441	0,0441	0,0193	0,2182	0,0895	0,1289
BA_5	0,3830	-0,1233	-0,1021	0,0656	0,0299	0,1025	0,1688	0,1744	0,1744	0,0133	0,0895	0,0285	0,1289
BA_dec	0,1193	0,6283	0,0656	-0,5549	-0,3005	-0,4086	-0,4073	-0,3787	-0,3787	-0,3405	-0,2251	0,3867	0,1340
BA_con	-0,3931	-0,4438	-0,5549	0,0260	-0,1501	0,2431	0,3831	0,2138	0,2138	-0,1117	0,4278	0,3640	0,1340
BA_tot	0,2862	0,6082	0,0260	-0,4932	-0,3032	-0,3862	-0,3569	-0,3245	-0,3245	-0,3521	-0,1988	0,4182	0,1841
NCL_1	0,0875	0,4628	-0,4932	-0,5403	-0,1843	0,2634	0,3884	0,2639	0,2639	-0,1672	0,3932	0,1841	0,1841
NCL_2	-0,4678	-0,3584	-0,5403	-0,2242	0,0380	0,0047	0,0790	-0,0157	-0,0157	0,0105	0,1210	-0,0743	0,1210
NCL_3	-0,1109	-0,2305	-0,2242	-0,0799	0,1140	0,1465	0,1854	0,0580	0,0580	0,0129	0,2053	0,1253	0,1253
NCL_4	0,2550	-0,1501	-0,0799	0,3833	-0,1048	0,0917	0,1388	0,1625	0,1625	0,0355	0,0355	0,3918	0,3918
NCL_5	0,1082	0,6387	0,0555	-0,3665	-0,3037	-0,4085	-0,4042	-0,3787	-0,3787	-0,3404	-0,2289	0,1434	0,1434
NCL_dec	-0,3830	-0,4345	-0,5665	-0,1581	-0,4027	0,2501	0,3959	0,2222	0,2222	-0,1301	0,4237	0,4229	0,4229
NCL_con	0,6336	0,5969	-0,1531	-0,4132	-0,3678	-0,3117	-0,3358	-0,3503	-0,3503	-0,3616	-0,2108	0,5399	0,5399
NCL_tot	0,1403	0,5969	-0,1531	-0,4132	-0,3678	-0,3117	-0,3358	-0,3503	-0,3503	-0,3616	-0,2108	0,5399	0,5399

	hd2	ln(hd2)	BA_1	BA_2	BA_3	BA_4	BA_5	BA_dec	BA_con	BA_tot	NCL_1	NCL_2	NCL_3	NCL_4	NCL_5	NCL_dec	NCL_con	NCL_tot
	-0.508	-0.0978	-0.4812	-0.1071	0.2465	0.3830	0.1193	-0.3931	0.2862	0.0875	-0.4678	-0.1109	0.2550	0.3833	0.1082	-0.3830	0.2276	0.1403
	-0.5600	-0.5966	-0.3672	-0.2212	-0.1600	-0.1233	0.6283	-0.4438	0.6082	0.4628	-0.3584	-0.2305	-0.1501	-0.1296	0.6387	-0.4345	0.6336	0.5969
	-0.1396	-0.1970	-0.5222	-0.2260	-0.0756	-0.1021	0.0656	-0.5549	0.0260	-0.3592	-0.5403	-0.2242	-0.0799	-0.1048	0.0555	-0.5665	0.0273	-0.1531
	-0.4221	-0.4532	-0.1722	0.0339	-0.1171	0.0299	-0.3005	-0.1501	-0.3032	-0.4932	-0.1843	0.0380	-0.1140	0.0318	-0.3037	-0.1581	-0.3101	-0.4132
	-0.1098	0.0130	0.2631	-0.0004	0.1272	0.1025	-0.4086	0.2431	-0.3862	-0.3213	0.2634	0.0047	0.1465	0.0917	-0.4085	0.2501	-0.4027	-0.3878
	-0.0539	0.0812	0.3795	0.0731	0.1672	0.1688	-0.4073	0.3831	-0.3569	-0.1849	0.3884	0.0790	0.1854	0.1588	-0.4042	0.3959	-0.3783	-0.3117
	-0.0984	-0.0092	0.2587	-0.0160	0.0441	0.1744	-0.3787	0.2138	-0.3245	-0.2632	0.2639	-0.0157	0.0580	0.1625	-0.3787	0.2222	-0.3503	-0.3358
	0.0532	0.0569	-0.1461	0.0079	0.0193	0.0133	-0.3405	-0.1117	-0.3521	-0.5287	-0.1672	0.0105	0.0129	0.0203	-0.3494	-0.1301	-0.3616	-0.4641
	0.9538	0.9619	0.3993	0.1087	0.2182	0.0895	-0.2251	0.4278	-0.1988	0.0486	0.3932	0.1210	0.2053	0.1012	-0.2289	0.4237	-0.2108	-0.1074
	0.7141	0.7752	0.1776	-0.0811	0.1289	0.0285	0.3867	0.1340	0.4182	0.6288	0.1841	-0.0743	0.1253	0.0355	0.3918	0.1434	0.4229	0.5399
	1.0000	0.9166	0.3406	0.0335	0.2115	0.0630	-0.0915	0.3415	-0.0697	0.1525	0.3333	0.0429	0.1953	0.0770	-0.0967	0.3357	-0.0789	0.0177
	0.9166	1.0000	0.3889	0.0855	0.2077	0.0880	-0.0839	0.4057	-0.0511	0.2216	0.3881	0.0979	0.1991	0.0972	-0.0845	0.4074	-0.0601	0.0630
	0.3406	0.3889	1.0000	0.1036	-0.0076	-0.0107	-0.4946	0.8687	-0.5241	-0.0550	0.9950	0.1103	0.0084	-0.0209	-0.4895	0.8726	-0.5214	-0.3229
	0.0335	0.0855	0.1036	1.0000	-0.1797	-0.0803	-0.3122	0.5344	-0.3617	-0.0840	0.1180	0.9963	-0.1777	-0.0749	-0.3080	0.5247	-0.3463	-0.2324
	0.2115	0.2077	-0.0076	-0.1797	1.0000	0.0473	-0.1054	0.1235	-0.0908	-0.0287	0.0127	-0.1809	0.9945	0.0448	-0.1058	0.1154	-0.0981	-0.0767
	0.0630	0.0880	-0.0107	-0.0803	0.0473	1.0000	-0.3174	-0.0377	0.0868	0.0843	0.0158	-0.0816	0.0656	0.9977	-0.3156	-0.0112	-0.0361	-0.0457
	-0.0915	-0.0839	-0.4946	-0.3122	-0.1054	-0.3174	1.0000	-0.5809	0.9172	0.7604	-0.4982	-0.3155	-0.1164	-0.3143	0.9983	-0.5821	0.9573	0.9260
	0.3415	0.4057	0.8687	0.5344	0.1235	-0.0377	-0.5809	1.0000	-0.6261	-0.0924	0.8705	0.5379	0.1364	-0.0440	-0.5748	0.9967	-0.6179	-0.3949
	-0.0697	-0.0511	-0.5241	-0.3617	-0.0908	0.0868	0.9172	-0.6261	1.0000	0.8343	-0.5167	-0.3657	-0.0947	0.0891	0.9161	-0.6163	0.9905	0.9336
	0.1525	0.2216	-0.0550	-0.0840	-0.0287	0.0843	0.7604	-0.0924	0.8343	1.0000	-0.0443	-0.0867	-0.0245	0.0827	0.7634	-0.0821	0.8279	0.9385
	0.3333	0.3881	0.9950	0.1180	-0.0127	0.0158	-0.4982	0.8705	-0.5167	-0.0443	1.0000	0.1219	0.0025	0.0051	-0.4937	0.8809	-0.5180	-0.3163
	0.0429	0.0979	0.1103	0.9963	-0.1809	-0.0816	-0.3155	0.5379	-0.3657	-0.0867	0.1219	1.0000	-0.1789	-0.0757	-0.3111	0.5294	-0.3498	-0.2350
	0.1933	0.1991	0.0084	-0.1777	0.9945	0.0656	-0.1164	0.1364	-0.0947	-0.0245	0.0025	1.0000	0.0617	0.0617	-0.1168	0.1300	-0.1046	-0.0795
	0.0770	0.0972	-0.0209	-0.0749	0.0448	0.9977	-0.3143	-0.0377	0.0868	0.0843	0.0158	-0.0816	0.0656	0.9977	-0.3156	-0.0112	-0.0361	-0.0457
	-0.0967	-0.0845	-0.4895	-0.3080	-0.1058	-0.3156	0.9983	-0.5748	0.9161	0.7634	-0.4937	-0.3111	-0.1168	-0.3129	1.0000	-0.5765	0.9595	0.9304
	0.3357	0.4074	0.8726	0.5247	0.1154	0.9977	-0.5821	0.9967	-0.6163	-0.0821	0.8809	0.5294	0.1300	-0.0181	-0.5765	1.0000	-0.6120	-0.3870
	-0.0789	-0.0601	-0.5214	-0.3463	-0.0981	-0.0361	0.9573	-0.6179	0.9905	0.8279	0.8809	0.5294	-0.1046	-0.0326	0.9595	-0.6120	1.0000	0.9661
	0.0177	0.0630	-0.3229	-0.2324	-0.0767	-0.0457	0.9260	-0.3949	0.9336	0.9385	-0.3163	-0.2350	-0.0795	-0.0439	0.9304	-0.3870	0.9661	1.0000

Annexe H : Relation entre la taille ($\text{dbh}^2 \times h$) des chênes cibles et la longueur de leur houppier

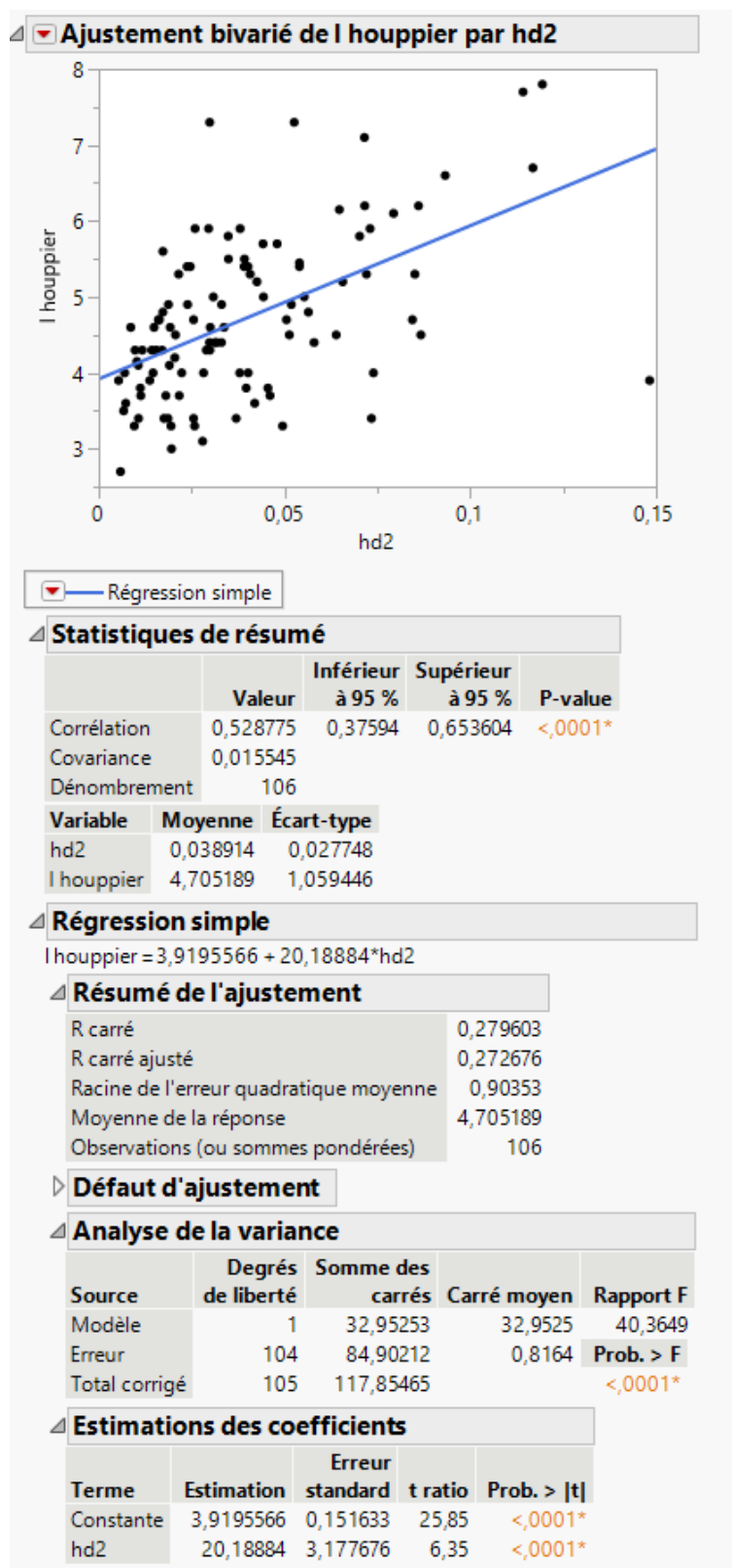


FIGURE 27 – Longueur du houppier des chênes cibles en fonction de leur taille : statistiques de résumé et régression linéaire simple

Effet du mélange d'essences sur les propriétés architecturales du chêne sessile en jeune plantation

Marie Philippart

Les plantations mélangées concentrent largement l'intérêt des scientifiques car elles apparaissent comme une alternative durable aux peuplements équiennes monospécifiques. Ces derniers ont longtemps constitué le modèle sylvicole dominant mais présentent une forte vulnérabilité face aux effets des changements climatiques. Les connaissances en termes de conception de plantations mixtes, en particulier quant au niveau de richesse et à la combinaison des essences, sont toutefois incomplètes. Étant donné la plasticité architecturale des essences, en particulier dans le jeune âge, la définition des paramètres du mélange est pourtant nécessaire pour assurer la qualité des fûts des différentes essences installées.

L'effet du mélange est étudié sur les propriétés architecturales de chênes sessiles en phase d'éducation, en testant différents niveaux de richesse et au sein de ces niveaux, différentes compositions spécifiques. Le chêne sessile constitue l'essence centrale de ce mémoire car il s'agit d'une essence intéressante pour ses atouts face aux changements climatiques, les bonnes propriétés mécaniques de son bois et sa durabilité, ainsi que son potentiel biologique très élevé.

Suite à une collecte de données sur le terrain, l'impact de variables liées à l'arbre et à son voisinage a été testé sur sept indicateurs qualifiant les propriétés architecturales, et ce à l'aide de modèles linéaires.

Ce mémoire a démontré que le mélange peut améliorer les propriétés architecturales des chênes sessiles en phase d'éducation, et donc leur qualité, par rapport à une plantation de chênes pure. Plus particulièrement, les plantations de chêne-mélèze ont été identifiées comme les plus bénéfiques à la conformation des chênes cibles, en termes de nombre de fourches, de nombre de branches vivantes et de la proportion de branches vivantes par rapport à la hauteur totale. Cela s'explique par la hauteur contrastée des chênes par rapport à celle des mélèzes, ces derniers procurant un abri latéral d'abord et vertical ensuite pour les troncs de chêne. Cette amélioration de la qualité en plantation mélangée implique donc également une réduction potentielle de l'intervention humaine par rapport aux peuplements monospécifiques. Toutefois, la croissance et la survie ultérieures du chêne en présence de mélèze nécessiteront des éclaircies en faveur du chêne, car la compétition exercée par le mélèze pénalise la croissance en grosseur des chênes.

Université catholique de Louvain

Faculté des bioingénieurs

Croix du Sud, 2bte L7.05.01, 1348 Louvain-La-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/agro