

Faculté des bioingénieurs

Réponse du chêne sessile (*Quercus petraea*) à l'éclaircie dans de jeunes plantations pures et mélangées

Auteur : Jo Mercatoris

Promoteur : Quentin Ponette

Lecteurs : Olivier Baudry et Arthur Guignabert

Année académique : 2025-2026

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Bioingénieur : Bioingénieur en gestion des forêts et des espaces
naturels, à finalité spécialisée

Répartition des contributions

	Jo Mercatoris	Autre contributeur	Intelligence artificielle
Conceptualisation	X	Quentin Ponette	
Méthodologie	X	Quentin Ponette	
Investigation	X	Équipe technique du <i>Earth and Life Institute</i>	
Analyse formelle	X		Piccolo Chat GPT (version 5.3)
Validation	X	Quentin Ponette	
Rédaction – version originale	X		
Rédaction – révision et édition	X	Quentin Ponette	Piccolo Chat GPT (version 5.3)
Visualisation	X		Chat GPT (version 5.3)
Supervision	X	Quentin Ponette	

Le projet de recherche était bien défini dès le départ et contextualisé avec le professeur Quentin Ponette, ce qui impliquait des mesures de terrain définies préalablement. La mise en œuvre (investigation) de la méthodologie a nécessité environ 20 sorties sur le terrain (mesures d'éclairement relatif et mesures de grosseurs), lors desquelles j'étais accompagné par des membres de l'équipe technique de l'institut.

L'analyse formelle a été conduite en accord avec mon promoteur, avec de nombreux échanges durant l'année.

L'intelligence artificielle a été utilisée pour deux grands aspects. Dans un premier temps, elle a été utilisée pour l'écriture de scripts R destinés aux analyses statistiques des données brutes, ainsi que pour la visualisation des résultats.

Ensuite, l'intelligence artificielle a permis de reformuler certaines phrases de ce rapport scientifique, ce qui a aidé à alléger la lecture et à exclure au maximum les erreurs d'orthographe et de grammaire. Le contenu provient de mes propres recherches, méthodes, résultats et interprétations, en accord avec mon promoteur.

Remerciements

Je souhaite remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de mon travail de fin d'études. Je tiens tout d'abord à remercier l'UCLouvain, ainsi que l'Earth and Life Institute (ELI), pour m'avoir fourni et offert les ressources et le cadre nécessaires à ce travail.

Je remercie particulièrement mon promoteur, Professeur Quentin Ponette, pour son accompagnement, son soutien scientifique constructif, ainsi que pour le temps qu'il a consacré à m'aider dans l'interprétation de différents résultats et dans la rédaction du présent rapport.

Je remercie également mes deux lecteurs, Arthur Guignabert (chercheur post doc de l'ELI) et Olivier Baudry (expert forestier), d'avoir accepté de lire la présente recherche et faire partie de mon jury de défense.

La réalisation des mesures de terrain a été grandement facilitée par l'aide précieuse de l'équipe technique de l'ELI. Je tiens à remercier particulièrement Julien Gobert, François Plume, Olivier Bouchez et Hugo Ledune, sans qui ces mesures n'auraient pas pu être réalisées à temps. Un merci également à Cédric de Tillesse et Maximilien Vermeulen pour leur aide lors d'une journée de prise de mesures. Je tiens également à remercier Tommy Nehl, qui travaille sur le même projet global, pour nos échanges scientifiques enrichissants et constructifs.

Enfin, je remercie ma famille, et tout particulièrement mes parents, pour leur soutien et leurs encouragements durant toute cette année, ainsi que pour leur aide lors d'une journée de mesures sur le terrain.

Table des matières

1	<i>Introduction et objectifs</i>	12
1.1	Contexte scientifique	12
1.2	État de l'art	13
1.2.1	Vulnérabilité des peuplements wallons actuels et pistes d'adaptation	13
1.2.1.1	Impacts généraux des changements globaux sur les forêts	13
1.2.1.2	Vulnérabilité de la forêt wallonne aux changements climatiques	14
1.2.1.3	Stratégies d'adaptation des forêts aux changements climatiques	15
1.2.1.4	Intérêts des peuplements mélangés face aux changements climatiques	15
1.2.1.5	Freins à la mise en place des peuplements mélangés	16
1.2.1.6	Principaux mélanges rencontrés en région wallonne	17
1.2.1.7	Promouvoir le chêne sessile dans un contexte de changement climatique	17
1.2.2	Spécificités techniques des peuplements mélangés	17
1.2.2.1	Installation et maintien de l'équilibre entre essences dans un mélange	17
1.2.2.2	Spécificités des éclaircies en peuplements mélangés	18
1.2.3	Facteurs écologiques affectant la croissance individuelle d'un arbre	20
1.2.3.1	Compétition du voisinage local	21
1.2.3.2	Dimension de l'arbre	23
1.2.3.3	Effet de l'éclaircie	24
1.2.3.4	D'autres facteurs écologiques, à échelle plus large	24
1.2.4	Modélisation de l'accroissement et de la réponse à l'éclaircie	24
1.2.4.1	Manières d'évaluer la réponse à l'éclaircie	24
1.2.4.2	Manières de modéliser l'accroissement	24
1.2.4.3	Modèles de croissance	25
1.2.4.4	Intégration de l'éclaircie et de l'effet de la composition	25
1.3	Objectifs	26
2	<i>Matériel et méthodes</i>	27
2.1	Site expérimental de FORBIO	27
2.1.1	Informations générales	27
2.1.2	Dispositif expérimental	27
2.1.3	Réalisation de l'éclaircie	29
2.1.4	Parcelles contenant des chênes	29
2.2	Mesures de terrain à FORBIO	30
2.2.1	Mesures dendrométriques	30
2.2.1.1	Inventaire des grosseurs	30
2.2.1.2	Inventaire des hauteurs	30
2.2.2	Caractérisation du voisinage local des chênes cibles	30
2.2.3	Mesures de l'éclairement relatif	32
2.3	Déterminants de la réponse des chênes à l'éclaircie	33
2.3.1	Cadre conceptuel	33
2.3.2	Dimension initiale	33
2.3.3	Compétition locale et accès aux ressources	33
2.3.3.1	Indice de compétition (NCI)	33
2.3.3.2	Éclairement relatif au niveau du houppier du chêne cible	34
2.3.3.3	Hauteur relative du chêne cible par rapport au voisinage local	34
2.3.4	Composition et concurrence globale à l'échelle de la parcelle	34
2.3.5	Caractérisation de l'éclaircie	36
2.4	Traitement statistique	38
2.4.1	Analyses exploratoires	39
2.4.1.1	Comparaison de variables caractérisant un même facteur écologique	39

2.4.1.2	Relations entre la composition et les variables explicatives de la croissance (taille initiale, éclaircie, compétition locale, concurrence globale)	39
2.4.1.3	Impact de l'éclaircie sur la compétition locale du chêne cible	40
2.4.2	Modélisation de la croissance individuelle en grosseur.....	40
2.4.2.1	Modèle de croissance de référence	40
2.4.2.2	Stratégie de modélisation	41
2.4.2.3	Critères de sélection des modèles	42
3	Résultats	43
3.1	Taille initiale des chênes cibles	43
3.1.1	Sélection des chênes cibles dans la population des chênes	43
3.1.2	Dimensions initiales des chênes cibles	43
3.2	Caractérisation de l'éclaircie	44
3.2.1	Caractérisation de l'éclaircie locale à l'échelle du chêne cible	44
3.2.1.1	Nature de l'éclaircie à l'échelle du chêne cible	44
3.2.1.2	Surface terrière retirée localement autour du chêne cible	45
3.2.1.3	Intensité locale de l'éclaircie	46
3.2.1.4	Effets de la composition sur la conduite de l'éclaircie à l'échelle locale	47
3.2.2	Caractérisation de l'éclaircie à l'échelle de la parcelle	48
3.2.2.1	Nature de l'éclaircie à l'échelle de la parcelle	48
3.2.2.2	Surface terrière retirée à l'échelle de la parcelle	49
3.2.2.3	Intensité de l'éclaircie à l'échelle de la parcelle	49
3.2.2.4	Effets de la composition sur la conduite de l'éclaircie à l'échelle de la parcelle	50
3.3	Compétition du voisinage local	51
3.3.1	Indice de compétition (NCI)	51
3.3.2	Éclaircissement relatif	52
3.3.3	Hauteur relative du chêne cible	53
3.3.4	Effets de la composition sur la compétition locale	53
3.3.5	Relations entre les indicateurs de compétition locale	54
3.4	Composition et concurrence globale	55
3.4.1	Indicateurs de concurrence globale	55
3.4.1.1	Surface terrière totale et ventilation entre essences	55
3.4.1.2	Hauteur moyenne relative des chênes à l'échelle de la parcelle	56
3.4.1.3	Effets de la composition sur la concurrence globale	57
3.4.2	Relations entre les indicateurs de concurrence globale	58
3.4.3	Relations entre le diamètre initial moyen et la concurrence globale	58
3.5	Impacts de l'éclaircie sur la compétition locale	59
3.6	Modèles de croissance	60
3.6.1	Modèles avec statut d'éclaircie binaire	60
3.6.1.1	Représentation de la composition par les indicateurs de concurrence globale	60
3.6.1.2	Représentation de la composition par une variable catégorielle	61
3.6.2	Modèles avec intensité locale de l'éclaircie	64
3.6.2.1	Représentation de la composition par les indicateurs de concurrence globale	64
3.6.2.2	Représentation de la composition par une variable catégorielle	67
4	Discussion	69
4.1	Effets de la composition sur les déterminants de la croissance des chênes cibles	69
4.1.1	Effets de la sélection et de la composition sur la taille initiale des chênes cibles	69
4.1.2	Effets de la composition sur l'éclaircie locale (à l'échelle des chênes cibles) et globale (à l'échelle du peuplement)	69
4.1.2.1	Nature d'éclaircie selon les compositions	69

4.1.2.2	Surface terrière retirée selon les compositions	70
4.1.2.3	Intensité d'éclaircie selon les compositions	70
4.1.3	Effets de la composition sur la compétition locale et l'accès aux ressources	71
4.1.4	Effets de la composition sur la concurrence globale	71
4.2	Impacts de l'éclaircie sur la compétition locale	73
4.3	Modèles de croissance	73
4.3.1	Facteurs déterminants de la croissance individuelle	73
4.3.1.1	Croissance des chênes cibles dans les conditions moyennes	73
4.3.1.2	Effet de la taille initiale sur l'accroissement des chênes cibles	74
4.3.1.3	Effet de la compétition locale sur l'accroissement des chênes cibles	74
4.3.1.4	Effet de la concurrence globale sur l'accroissement des chênes cibles	74
4.3.2	Réponse des chênes cibles à l'éclaircie selon leur statut (M1, M2 et M3)	75
4.3.2.1	L'effet de l'éclaircie sur l'accroissement des chênes cibles	76
4.3.2.2	L'effet de la composition sur la réponse des chênes cibles à l'éclaircie	76
4.3.2.3	Cohérence des modèles et l'effet de la composition sur l'accroissement	78
4.3.3	Réponse des chênes cibles éclaircis à l'intensité locale de l'éclaircie (M4, M5, M6)	78
4.3.3.1	Effet de l'intensité locale de l'éclaircie sur l'accroissement des chênes cibles éclaircis.....	78
4.3.3.2	Effet de la composition sur la réponse des chênes cibles à l'intensité locale de l'éclaircie	79
4.3.3.3	Facteurs limitant l'interprétation de l'interaction entre l'intensité d'éclaircie et la composition ..	80
4.3.3.4	Cohérence des modèles et l'effet de la composition sur l'accroissement	81
4.4	Implications et recommandations sylvicoles	81
5	Conclusions et perspectives	83
6	Références bibliographiques	86
7	Annexes.....	92
7.1	Relations entre les indicateurs de l'éclaircie et les indicateurs de la concurrence globale de la composition	92
7.2	Relations entre la compétition locale et la concurrence globale de la composition	95
7.3	Modèles de croissances	96
7.4	Localisation de FORBIO à Gedinne	99
7.5	Prise de mesure de l'éclairement en champs libre.....	100
7.6	Impacts du statut d'éclaircie sur les indicateurs de compétition locale	100
7.7	Relation allométrique entre la hauteur totale et le diamètre à 1,30 m de hauteur	101
7.8	Détails de l'inventaire des grosseurs	102

Table des figures

<i>Figure 1.2-1 : Représentation conceptuelle d'un peuplement monospécifique (au-dessus) et d'un peuplement mélangé (en dessous) (Messier et al. ,2022).</i>	15
<i>Figure 1.2-2 : Représentation des trois mécanismes : partition de niche (resource partitioning), facilitation (facilitation), effet de sélection (selection effect) (Grossiord, 2020).</i>	16
<i>Figure 1.2-3 : Besoin de séparation spatiale des essences lors de la plantation d'un peuplement mélangé (Bauhus et al., 2017).</i>	18
<i>Figure 1.2-4 : Schéma conceptuel de l'éclaircie d'une essence A, selon différentes essences voisines.</i>	20
<i>Figure 1.2-5 : Représentation conceptuelle de l'éclaircie selon l'approche par arbre cible (crop tree) (Bauhus et al., 2017).</i>	20
<i>Figure 1.2-6 : Représentation schématique de la compétition entre un arbre sujet et son voisinage local (Prevosto, 2005).</i>	21
<i>Figure 1.2-7 : Modèle conceptuel des manières comment la dimension initiale influence la croissance en conséquence d'un changement de la compétition (Coomes & Allen, 2007).</i>	23
<i>Figure 2.1-1 : Représentation schématique des deux blocs : (A) Gribelle et (B) Gouverneurs. Les parcelles colorées en vert contiennent du chêne.</i>	28
<i>Figure 2.1-2 : Environnement compétitif typique des arbres cibles non éclaircis (C) et éclaircis (T) en monoculture (en haut) et en mélange (en bas ; 1 exemple parmi les 9 mélanges étudiés). Au maximum 2 arbres ont été enlevés par arbre cible.</i>	29
<i>Figure 2.2-1 : Représentation schématique du voisinage compétitif local, dans lequel les arbres voisins sont supposés comme entrant en compétition avec le chêne cible, situé au centre.</i>	31
<i>Figure 2.2-2 : Représentation schématique de l'azimut et de la distance par rapport au chêne cible.</i>	31
<i>Figure 2.2-3 : Capteur quantique MQ 200X, fixé à l'embout d'un bâton de bois (A) et d'une perche télescopique (C).</i>	32
<i>Figure 3.1-1 : Distribution des diamètres de tous les chênes d'une parcelle et les moyennes des chênes cibles témoins (C) et éclaircis (T), selon les compositions et les blocs (Gribelle et Gouverneurs).</i>	43
<i>Figure 3.1-2 : Distribution des diamètres initiaux (hiver 2024-2025) des chênes cibles (C et T confondus), selon les compositions et les blocs (Gribelle et Gouverneurs).</i>	44
<i>Figure 3.1-3 : Moyennes ajustées (en ordre décroissant) des diamètres initiaux des chênes cibles avec l'intervalle de confiance de 95%, selon les compositions (l'effet du bloc étant contrôlé).</i>	44
<i>Figure 3.2-1 : Distributions de la nature de l'éclaircie, à l'échelle du voisinage local ($Nature_{locale}$, [-]), selon les compositions et les blocs (Gribelle et Gouverneurs).</i>	45
<i>Figure 3.2-2 : Distributions de la surface terrière enlevée, à l'échelle de voisinage local ($g_{enlevée_voisinage_local}$, [$m^2$]), selon les compositions et les blocs (Gribelle et Gouverneurs).</i>	46
<i>Figure 3.2-3 : Distributions de l'intensité locale de l'éclaircie (I_{g_local} [-], surface terrière enlevée par rapport à la surface terrière initiale du voisinage local), selon les compositions et les blocs (Gribelle et Gouverneurs).</i>	47

Figure 3.2-4 : Moyennes ajustées (en ordre décroissant) avec intervalle de confiance de 95% des indicateurs locaux de l'éclaircie ($Nature_{locale}$, $g_{enlevée_voisinage_local}$, I_{g_local}), selon les compositions (l'effet du bloc étant contrôlé).....	47
Figure 3.2-5 : La nature de l'éclaircie, à l'échelle de la parcelle ($Nature_{parcelle}$, [-]), selon les compositions et les blocs (Gribelle et Gouverneurs).	48
Figure 3.2-6 : Surface terrière absolue enlevée dans la parcelle ($g_{enlevée_parcelle}$, [m^2/ha]), selon les compositions et les blocs (Gribelle et Gouverneurs).....	49
Figure 3.2-7 : L'intensité globale de l'éclaircie à l'échelle de la parcelle (I_{g_local} [-], surface terrière enlevée par rapport à la surface terrière initiale de la parcelle), selon les compositions et les blocs (Gribelle et Gouverneurs).	50
Figure 3.2-8 : Moyennes ajustées (en ordre décroissant) avec intervalle de confiance de 95% des indicateurs globaux de l'éclaircie ($Nature_{parcelle}$, $g_{enlevée_parcelle}$, $I_{g_parcelle}$), selon les compositions (l'effet du bloc étant contrôlé).....	51
Figure 3.3-1 : Moyennes et écarts types de l'indice de compétition (NCI), selon les compositions et les blocs (Gribelle et Gouverneurs).	51
Figure 3.3-2 : Moyennes et écarts types de l'éclaircissement relatif (ER), selon les compositions et les blocs (Gribelle et Gouverneurs).	52
Figure 3.3-3 : Moyennes et écarts types de la hauteur relative des chênes cibles par rapport à leur voisinage local ($H_{relative_voisinage}$), selon les compositions et les blocs (Gribelle et Gouverneurs).	53
Figure 3.3-4 : Moyennes ajustées (en ordre décroissant) avec intervalle de confiance de 95% des trois indicateurs (NCI, ER, $H_{relative_voisinage}$), selon les compositions (l'effet du bloc étant contrôlé).	54
Figure 3.3-5 : Relations entre les trois indicateurs de compétition locale (NCI, ER, $H_{relative_voisinage}$), selon les compositions.	54
Figure 3.4-1 : Surface terrière totale ($G_{parcelle}$) de la parcelle, rapportée à l'hectare, ventilée par les essences concernées, selon les compositions et blocs (Gribelle et Gouverneurs).	56
Figure 3.4-2 : Moyennes et écarts types des hauteur moyennes de Lorey, à l'échelle de la parcelle ($H_{moyenne_parcelle}$), selon les compositions et les blocs (Gribelle et Gouverneurs).	57
Figure 3.4-3 : Moyennes ajustées (en ordre décroissant) avec intervalle de confiance de 95% des cinq indicateurs de concurrence globale ($G_{parcelle}$, $\%G_{relative_quercus}$, $\%G_{relative_intol}$, $\%G_{relative_resineux}$, $H_{relative_parcelle}$), à l'échelle de la parcelle, selon les compositions (l'effet du bloc étant contrôlé).....	57
Figure 3.4-4 : Relation entre deux indicateurs de concurrence globale, la surface terrière totale ($G_{parcelle}$) et la hauteur moyenne relative des chênes à l'échelle de la parcelle ($H_{relative_parcelle}$).	58
Figure 3.4-5 : Relation entre le diamètre moyen initial (hiver 2025-2026) des chênes cibles et les différents indicateurs de concurrence globale, selon les compositions et les blocs (Gouverneurs en rouge et Gribelle en bleu).	58
Figure 3.5-1 : Relation entre l'indice de compétition (NCI) et le statut de l'éclaircie (orange : chêne cible témoin (0) ; vert : chêne cible éclairci = 1).....	59
Figure 3.5-2 : Relations entre les indicateurs de compétition locale (NCI, ER, $H_{relative_voisinage}$) et de l'intensité locale de l'éclaircie (I_{g_local}) des chênes cibles éclaircis (T).....	59
Figure 3.6-1 : Évolution de l'accroissement annuel en diamètre des chênes cibles témoin (C=0) et éclaircis (T=1), en fonction de la surface terrière totale de la parcelle ($G_{parcelle}$, modèle M1) et de la hauteur	

moyenne relative des chênes ($H_{relative_parcelle}$, modèle M2). Toutes les autres variables sont fixées à leur valeur moyenne.61

Figure 3.6-2 : Moyennes ajustées (dans M3) avec intervalle de confiance de 95 %, des accroissements annuels en diamètre de chênes cibles témoins ($C = 0$) et chênes cibles éclaircis ($T = 1$), selon les compositions. Toutes les autres variables sont fixées à leur valeur moyenne.63

Figure 3.6-3 : Comparaison des accroissements modélisés par le modèle M3 et des accroissements mesurés sur le terrain, pour les chênes cibles témoins (C) et éclaircis (T), selon les compositions.63

Figure 3.6-4 : Évolution de l'accroissement annuel en diamètre des chênes éclaircis en fonction de l'intensité locale de l'éclaircie centrée sur la moyenne, selon le modèle M4. Chaque droite représente l'évolution prédite d'une des 10 compositions, en fixant la surface terrière ($G_{parcelle_centrée}$) au niveau correspondant.65

Figure 3.6-5 : Comparaison des accroissement modélisés par le modèle M4 et des accroissements mesurés sur le terrain pour les chênes cibles éclaircis (T), selon les compositions.66

Figure 3.6-6 : Évolution de l'accroissement annuel en diamètre des chênes éclaircis en fonction de l'intensité locale de l'éclaircie centrée sur la moyenne, selon le modèle M5. Chaque droite représente l'évolution prédite d'une des 10 compositions, en fixant la hauteur moyenne relative des chênes ($H_{relative_parcelle_centrée}$) au niveau correspondant.66

Figure 3.6-7 : Évolution de l'accroissement annuel en diamètre des chênes éclaircis en fonction de l'intensité locale de l'éclaircie centrée sur la moyenne, selon le modèle M6. Chaque droite représente l'évolution prédite, en fixant un niveau parmi 10 modalités de la variable catégorielle de la composition. 68

Table des figures en annexe

<i>Figure annexe 1 : Relation entre la nature de l'éclaircie à l'échelle locale ($Nature_{locale}$) et les indicateurs de concurrence globale, pour le bloc de Gouverneurs (rouge) et de Gribelle (bleu).</i>	92
<i>Figure annexe 2 : Relation entre la surface terrière enlevée par l'éclaircie à l'échelle locale ($g_{enlevée_voisinage_local}$), et les indicateurs de concurrence globale, pour le bloc de Gouverneurs (rouge) et de Gribelle (bleu).</i>	92
<i>Figure annexe 3 : Relation entre l'intensité locale de l'éclaircie (I_{g_local}), et les indicateurs de concurrence globale, pour le bloc de Gouverneurs (rouge) et de Gribelle (bleu).</i>	93
<i>Figure annexe 4 : Relation entre la nature de l'éclaircie à l'échelle de la parcelle ($Nature_{parcelle}$) et les indicateurs de concurrence globale, pour le bloc de Gouverneurs (rouge) et de Gribelle (bleu).</i>	93
<i>Figure annexe 5 : Relation entre la surface terrière enlevée par l'éclaircie à l'échelle de la parcelle ($g_{enlevée_parcelle}$), et les indicateurs de concurrence globale, pour le bloc de Gouverneurs (rouge) et de Gribelle (bleu).</i>	94
<i>Figure annexe 6 : Relation entre l'intensité globale de l'éclaircie à l'échelle de la parcelle ($I_{g_parcelle}$), et les indicateurs de concurrence globale, pour le bloc de Gouverneurs (rouge) et de Gribelle (bleu).</i>	94
<i>Figure annexe 7 : Relation entre l'indice de compétition du voisinage local (NCI) et les indicateurs de concurrence globale, pour le bloc de Gouverneurs (rouge) et de Gribelle (bleu).</i>	95
<i>Figure annexe 8 : Relation entre l'éclairement relatif des houppiers des chênes cibles (ER) et les indicateurs de concurrence globale, pour le bloc de Gouverneurs (rouge) et de Gribelle (bleu).</i>	95
<i>Figure annexe 9 : Relation entre la hauteur relative des chênes cibles par rapport au voisinage local ($H_{relative_voisinage}$), et les indicateurs de concurrence globale, pour le bloc de Gouverneurs (rouge) et de Gribelle (bleu).</i>	96
<i>Figure annexe 10 : Comparaison des accroissements modélisés par le modèle M1 et des accroissements mesurés sur le terrain, pour les chênes cibles témoins (C) et éclaircis (T), selon les compositions.</i>	96
<i>Figure annexe 11 : Comparaison des accroissements modélisés par le modèle M2 et des accroissements mesurés sur le terrain, pour les chênes cibles témoins (C) et éclaircis (T), selon les compositions.</i>	97
<i>Figure annexe 12 : Comparaison des accroissement modélisés par le modèle M5 et des accroissements mesurés sur le terrain pour les chênes cibles éclaircis (T), selon les compositions.</i>	97
<i>Figure annexe 13 : Comparaison des accroissement modélisés par le modèle M6 et des accroissements mesurés sur le terrain pour les chênes cibles éclaircis (T), selon les compositions.</i>	98
<i>Figure annexe 14 : Localisation géographique des deux blocs de FORBIO-Gedinne</i>	99
<i>Figure annexe 15 : Endroit (point bleu) de l'emplacement du capteur pour la mesure de l'éclairement en dehors du couvert forestier, au site de Gribelle (A) et Gouverneurs (B).</i>	100
<i>Figure annexe 16 : Relation entre l'éclairement relatif (ER) et le statut d'éclaircie (orange : chêne cible témoin (C) = 0 et vert : chêne cible éclairci (T) = 1).</i>	100
<i>Figure annexe 17 : Relation entre la hauteur relative des chênes cibles ($H_{relative_voisinage}$) et le statut d'éclaircie (orange : chêne cible témoin (C) = 0 et vert : chêne cible éclairci (T) = 1).</i>	101

Table des tableaux

<i>Tableau 2-1 : Informations générales du site expérimental (Verheyen et al., 2013)</i>	<i>27</i>
<i>Tableau 2-2 : Traits écologiques des cinq essences présentes dans le dispositif de Forbio (statut de succession (Burschel & Huss, 1997), opacité (Verheyen et al., 2012), tolérance à l'ombrage et la croissance selon le fichier écologique des essences (Wallonnie environnement SPW, n.d.)</i>	<i>28</i>
<i>Tableau 2-3 : Parcelles contenant des chênes avec leur composition et richesse spécifique.</i>	<i>30</i>
<i>Tableau 2-4 : Calcul des indicateurs de concurrence globale basés sur la surface terrière et la hauteur..</i>	<i>35</i>
<i>Tableau 2-5 : Calcul et détails des indicateurs de l'éclaircie, à échelle locale.</i>	<i>37</i>
<i>Tableau 2-6 : Calcul et détails des indicateurs de l'éclaircie, à échelle de la parcelle</i>	<i>38</i>
<i>Tableau 3-1 : Estimations des coefficients (β) dans les modèles M1 et M2 et valeurs d'AIC et R^2. Les p-valeurs (p) sont indiquées entre parenthèses.</i>	<i>60</i>
<i>Tableau 3-2 : Estimations des coefficients (β) dans le modèle M3 et valeurs d'AIC et R^2. Les p-valeurs (p) sont indiquées entre parenthèses.</i>	<i>62</i>
<i>Tableau 3-3 : Estimations des coefficients (β) dans les modèles M4 et M5 et valeurs d'AIC et R^2. Les p-valeurs (p) sont indiquées entre parenthèses.</i>	<i>64</i>
<i>Tableau 3-4 : Estimations des coefficients (β) dans le modèle M6 et valeurs d'AIC et R^2. Les p-valeurs (p) sont indiquées entre parenthèses.</i>	<i>67</i>

1 Introduction et objectifs

1.1 Contexte scientifique

La planète Terre subit actuellement un changement climatique. Les projections montrent une hausse probable de la température moyenne mondiale de plus de 1,5 °C par rapport à l'ère préindustrielle d'ici la fin du XXI^e siècle (IPCC, n.d.). Ainsi, la limite envisagée initialement par l'Accord de Paris de 2015 serait dépassée (CCNUCC, n.d.). Ce changement global n'est pas sans conséquences pour l'environnement et la biodiversité. Actuellement, et depuis plusieurs années, les écosystèmes mondiaux se trouvent sous pression (Hartmann et al., 2025 ; Lavorel, 2025 ; Mohr et al., 2025). L'Europe centrale se réchauffant plus vite que d'autres régions du monde, la forêt européenne est particulièrement sous pression (Huth et al., 2025 ; Mohr et al., 2025). Les changements globaux impactent les forêts, dans leur fonctionnement et dans leur aptitude à fournir des services écosystémiques. Comme le stockage de CO₂ dans la biomasse forestière constitue une stratégie de lutte contre le réchauffement climatique, il est d'autant plus important de trouver des moyens pour limiter à un minimum les impacts négatifs sur la forêt (Lavorel, 2025).

La forêt wallonne fait partie des forêts d'Europe centrale mises sous pression par les changements globaux. Il s'agit d'une région où la filière bois joue un rôle économique et social clé, notamment pour l'emploi rural. Au-delà de cette fonction productive, la forêt remplit également des fonctions écologiques et environnementales essentielles, telles que la régulation de l'eau, la protection des paysages et l'habitat pour la faune et la flore. Du point de vue sylvicole, les peuplements forestiers actuels reflètent encore souvent la sylviculture traditionnelle peu adaptée aux conditions climatiques futures. Cela engendre une sensibilité particulière des peuplements actuels face aux impacts du changement climatique (SPW ARNE et al., 2021). Ces spécificités font de la forêt wallonne un écosystème où les enjeux de limitation des impacts des changements globaux sont particulièrement importants.

La sylviculture pratiquée en Wallonie a donc besoin de stratégies d'adaptation afin de réduire la vulnérabilité des peuplements forestiers. Une sylviculture innovante, visant à favoriser l'installation de peuplements moins vulnérables aux impacts des changements globaux, peut notamment s'appuyer sur des peuplements mélangés en essences. Les peuplements mélangés comportent des essences à traits écologiques potentiellement très différents, ce qui peut conférer certains avantages au fonctionnement de l'écosystème et à la performance des arbres individuels qui les composent. De cette manière, les peuplements mélangés sont supposés mieux résister aux menaces liées au changement climatique telles que les sécheresses ou les attaques de pathogènes (Huth et al., 2025). Bien qu'ils soient actuellement minoritaires en Wallonie en termes de surface occupée, leur importance est supposée augmenter dans le futur.

En pratique, la plantation de mélanges est toutefois freinée par certains défis tels que le manque de connaissances scientifiques quant aux modalités de leur installation et de leur conduite (Messier et al., 2022). Le nombre d'études sur les peuplements mélangés a augmenté ces dernières années, mais plusieurs questions restent ouvertes. Ce déficit de connaissances concerne particulièrement l'éclaircie, qui constitue une intervention clé dans la gestion forestière. L'éclaircie permet aux arbres restants d'accéder davantage aux ressources et contribue à la production de bois de qualité. Cette intervention, qui vise à réduire l'effet compétitif du voisinage, est bien étudiée dans le contexte des peuplements monospécifiques réguliers. Or, dans les peuplements mélangés, l'intervention sylvicole de l'éclaircie présente inévitablement certaines particularités techniques et organisationnelles. Il en est de même pour les réponses des essences à une éclaircie, qui ne sont pas systématiquement identiques à celles observées en peuplement monospécifique. Les défis sont liés au fait qu'un mélange d'essences comporte des individus présentant des traits écologiques contrastés, dont la vitesse de croissance. Ce sont ces différences qui créent des situations de compétition hétérogènes au sein d'un peuplement mélangé, contrairement aux peuplements

monospécifiques où ces conditions sont plus homogènes. Il est notamment question du degré d'éclaircie nécessaire pour maximiser le bénéfice pour les arbres restants (Bauhus et al., 2017).

Le manque de connaissances sur la réponse des différentes essences à l'éclaircie en mélange limite encore leur installation, pourtant souhaitée dans le contexte des conditions climatiques changeantes. Afin de promouvoir l'installation de peuplements mélangés, il est donc nécessaire de mieux comprendre l'effet de l'éclaircie dans ces peuplements. Ce mémoire est spécifiquement dédié à la compréhension de la réponse du chêne sessile (*Quercus petraea*) à l'éclaircie. Cette essence compte parmi les plus importantes dans le contexte actuel de la Wallonie (Nailis et al., 2024). Le chêne sessile est supposé jouer un rôle clé dans la sylviculture future et les peuplements mélangés en comporteront très probablement à l'avenir. Néanmoins, en raison de sa vitesse de croissance relativement lente et de son intolérance à l'ombrage au stade juvénile, le chêne sessile est susceptible d'être concurrencé par des essences avoisinantes dominantes et plus compétitives. C'est dans l'objectif de maintenir le mélange sur le long terme que l'éclaircie entre également en jeu, via une réduction de la compétition interspécifique trop importante. L'éclaircie joue donc un rôle supplémentaire dans les peuplements mélangés (Ulbricht et al., 2026).

Cette recherche s'appuie d'abord sur des mesures prises dans le dispositif FORBIO (*Forest Biodiversity*). Ce dispositif inclut des peuplements de chênes purs et mélangés, et a fait l'objet d'une éclaircie selon une approche par arbre cible. À partir de ces mesures caractérisant les chênes sessiles ainsi que leur environnement, ce mémoire développe des modèles statistiques des accroissements radiaux pour analyser la réponse à l'éclaircie après deux années. L'utilisation de modèles statistiques permet d'étudier l'importance relative des différents facteurs écologiques déterminant l'accroissement d'un arbre individuel. De cette manière, il sera possible d'identifier les facteurs expliquant le mieux la variabilité des accroissements observés et d'ainsi mieux comprendre l'effet de l'éclaircie dans les différents types de peuplements, notamment les peuplements mélangés.

L'état de l'art détaille certaines notions mentionnées précédemment et approfondit les connaissances actuelles. Cette partie se termine par la présentation des objectifs, qui précise les questions de recherche et les pistes mises en place pour y répondre. La récolte des données et leur traitement sont présentés dans la partie « Matériel et méthodes ». Cette partie explique également les analyses statistiques préalables aux modèles de croissance choisis. Viennent ensuite les résultats, suivis de leur discussion. Enfin, ce travail se termine par une conclusion synthétisant les principaux points à retenir et ouvrant sur des recommandations sylvicoles pour le maintien du chêne, en monoculture comme en mélange.

1.2 État de l'art

1.2.1 Vulnérabilité des peuplements wallons actuels et pistes d'adaptation

1.2.1.1 Impacts généraux des changements globaux sur les forêts

Les conséquences du changement climatique sur l'écosystème forestier sont multiples. Tout d'abord, il y a les changements abiotiques. Selon Huth et al. (2025) et Hartmann et al. (2025), le changement climatique menace la forêt européenne par l'augmentation de la température moyenne, le changement de l'importance locale des précipitations et l'apparition plus fréquente d'événements climatiques extrêmes. Ces derniers incluent la sécheresse, la chaleur, le chablis et les précipitations intenses. Ces effets abiotiques affaiblissent l'état sanitaire des peuplements forestiers et les rendent ainsi plus vulnérables aux pressions biotiques, elles-mêmes influencées par le changement climatique (Hartmann et al., 2025; Huth et al., 2025 ; Lindner et al., 2010; SPW ARNE et al., 2021). Celles-ci comprennent les attaques de pathogènes (fongiques, virales, microbiennes) et d'insectes. La vulnérabilité aux

pathogènes peut ainsi être accentuée par des changements abiotiques. Avec les effets biotiques, la résistance et la résilience des forêts se voient réduites. Ce sont deux notions souvent rencontrées face aux effets du changement climatique. La résistance est la capacité d'une forêt à subir une perturbation (abiotique ou biotique) sans que sa structure ou son fonctionnement ne soient fortement altérés. La résilience désigne la capacité à retrouver l'état initial après cette perturbation (Huth et al., 2025).

Souvent, ce sont donc les interactions entre les effets abiotiques et biotiques qui engendrent la mortalité d'un arbre (Hartmann et al., 2025; Huth et al., 2025). En général, les effets du changement climatique sont supposés augmenter dans le futur (Hartmann et al., 2025; Lindner et al., 2010).

1.2.1.2 Vulnérabilité de la forêt wallonne aux changements climatiques

En ce qui concerne la résistance et la résilience au changement climatique de la forêt wallonne, deux facteurs importants doivent être soulignés. Il s'agit de la diversité structurelle et spécifique. Parmi les forêts wallonnes, 55 % ont une structure verticale régulière. En outre, plus de la moitié des peuplements wallons sont actuellement monospécifiques ou sous la forme d'un mélange de deux essences (SPW ARNE et al., 2021). Cette régularité en termes de structure verticale et de composition spécifique diminue la résistance au changement climatique (Grossiord, 2020 ; Huth et al., 2025 ; SPW ARNE et al., 2021 ; Messier et al., 2022). Trois essences dominantes doivent être mentionnées dans le contexte de la sylviculture wallonne actuelle. Il s'agit du chêne pédonculé (*Quercus robur*), du chêne sessile (*Quercus petraea*), du hêtre commun (*Fagus sylvatica*) et de l'épicéa commun (*Picea abies*) (Nailis et al., 2024). L'épicéa commun domine la surface de la forêt productive wallonne, soit 468 000 ha, avec 25 %. Les chênes indigènes en représentent 20 % et le hêtre commun environ 10 %. Les mélanges de chêne et de hêtre représentent environ 6 % de la surface productive de forêt. De plus, deux de ces trois essences sont marquées par une susceptibilité accrue au changement climatique, selon le fichier écologique des essences (Wallonie environnement SPW, n.d.). Le fichier écologique des essences indique que le hêtre et l'épicéa sont des essences à risque face aux effets du changement climatique. Ces deux essences sont très sensibles aux sécheresses estivales, aux canicules et au manque d'eau en général. De plus, leur résilience après une perturbation est limitée (Titeux et al., 2018). La sensibilité de l'épicéa est d'autant plus importante en raison de la sylviculture intensive. Sa plantation a très rarement pris en compte l'adéquation stationnelle (SPW ARNE et al., 2021). Les deux chênes indigènes diffèrent par leur adaptation au changement climatique (Wallonie environnement SPW, n.d.). Le chêne pédonculé est également sensible au manque d'eau, mais n'est cependant pas indiqué comme essence à risque. Seul le chêne sessile a un bon potentiel d'avenir dans le contexte du changement climatique. Cette essence présente une large amplitude écologique, tolère relativement bien la sécheresse, possède un enracinement puissant et présente une bonne résistance au vent. Pour ces raisons, le rôle sylvicole du chêne sessile en Europe centrale est supposé gagner en importance (Černý et al., 2024 ; Nicolescu et al., 2025). Il ne faut cependant pas oublier que cette essence est également affaiblie par les effets abiotiques du changement climatique (Titeux et al., 2018). La plantation seule de chêne sessile ne résout donc pas toute la problématique, mais cette essence sera un facteur clé de la sylviculture future adaptée aux changements climatiques.

La forêt wallonne est donc particulièrement exposée aux effets du changement climatique. Elle est composée de peuplements présentant une structure à risque et les essences qui les composent sont majoritairement menacées par les effets du changement climatique. Il en résulte surtout la nécessité d'adapter les peuplements aux effets du changement climatique. Cela est d'autant plus important pour la forêt wallonne parce qu'elle assure de nombreux services écosystémiques (SPW ARNE et al., 2021). Parmi ces services figurent la production de bois, la contribution au cycle du carbone, la protection des sols, la purification de l'eau, la régulation du climat, les activités récréatives pour les citoyens, etc. Cependant, un grand défi réside dans le fait que les décisions prises aujourd'hui doivent permettre d'assurer une résistance au cours des prochaines décennies et au-delà. De plus, l'évolution climatique future n'est pas connue avec exactitude (Huth et al., 2025).

1.2.1.3 Stratégies d'adaptation des forêts aux changements climatiques

Il existe plusieurs idées concrètes pour rendre un peuplement forestier plus résistant et résilient. Il s'agit par exemple le maintien de bois mort, l'abandon de la sylviculture intensive, le choix d'essences adaptées à la station, le choix de provenances différentes ainsi que l'irrégularisation de la structure verticale (Huth et al., 2025). La présente recherche se focalise sur une autre approche d'adaptation : la diversification spécifique à l'échelle du peuplement (Figure 1.2-1).

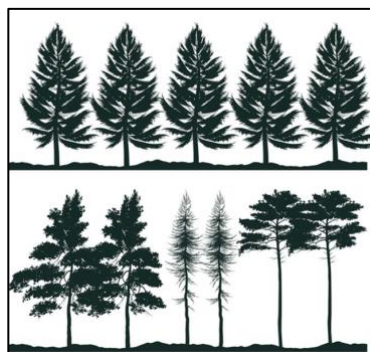


Figure 1.2-1 : Représentation conceptuelle d'un peuplement monospécifique (au-dessus) et d'un peuplement mélangé (en dessous) (Messier et al., 2022).

Cette méthode est soutenue par un large consensus scientifique, qui met en avant ses avantages pour renforcer la résistance et la résilience des forêts face au changement climatique (Van Der Plas et al., 2016 ; Aldea et al., 2017 ; Brockerhoff et al., 2017 ; Grossiord, 2020 ; Pretzsch et al., 2021 ; Messier et al., 2022 ; Hartmann et al., 2025 ; Huth et al., 2025 ; Ulbricht et al., 2026). La diversification spécifique à l'échelle du peuplement s'oppose à une sylviculture intensive traditionnelle visant des peuplements monospécifiques réguliers.

1.2.1.4 Intérêts des peuplements mélangés face aux changements climatiques

Plusieurs notions expliquent que les peuplements mélangés en essences sont supposés être mieux adaptés aux effets du changement climatique. Tout d'abord, les peuplements mélangés en essences fournissent plus de services écosystémiques que les peuplements monospécifiques (Messier et al., 2019). Les mélanges sont ainsi plus multifonctionnels. De plus, il existe un consensus scientifique selon lequel la biodiversité favorise le fonctionnement des écosystèmes ainsi que les services écosystémiques (Brockerhoff et al., 2017 ; Grossiord, 2020 ; Messier et al., 2022 ; Van Der Plas et al., 2016). Un système multifonctionnel est intrinsèquement plus résistant à des perturbations éventuelles, comme celles qui peuvent intervenir dans le contexte du changement climatique (Van Der Plas et al., 2016). Le travail de Grossiord (2020) explique trois mécanismes. Premièrement, la compétition intraspécifique est diminuée dans un mélange. Les essences aux traits écologiques différents utilisent les ressources différemment (dans l'espace et le temps), ce qui diminue la probabilité de compétition intraspécifique. Cet effet est décrit comme une partition des ressources, ou partition de niche, et permet une utilisation plus efficace des ressources (Figure 1.2-2). En outre, la facilitation décrit les effets mutuels bénéfiques entre des individus voisins d'identités différentes. Ce mécanisme inclut la redistribution de l'eau, une exposition réduite aux pathogènes spécialistes ou encore un meilleur accès aux nutriments (Figure 1.2-2). Ces deux mécanismes sont souvent difficiles à séparer clairement et sont ainsi regroupés sous la notion de complémentarité. L'effet de sélection représente la probabilité accrue de retrouver dans un mélange une essence spécifique particulièrement performante dans la résistance à la sécheresse (Figure 1.2-2). Un autre facteur retrouvé dans la littérature est la capacité tampon. Lors d'événements climatiques extrêmes, l'hétérogénéité d'un mélange crée des microclimats qui tamponnent les variations de température et la disponibilité en eau (S. Zhang et al., 2022).

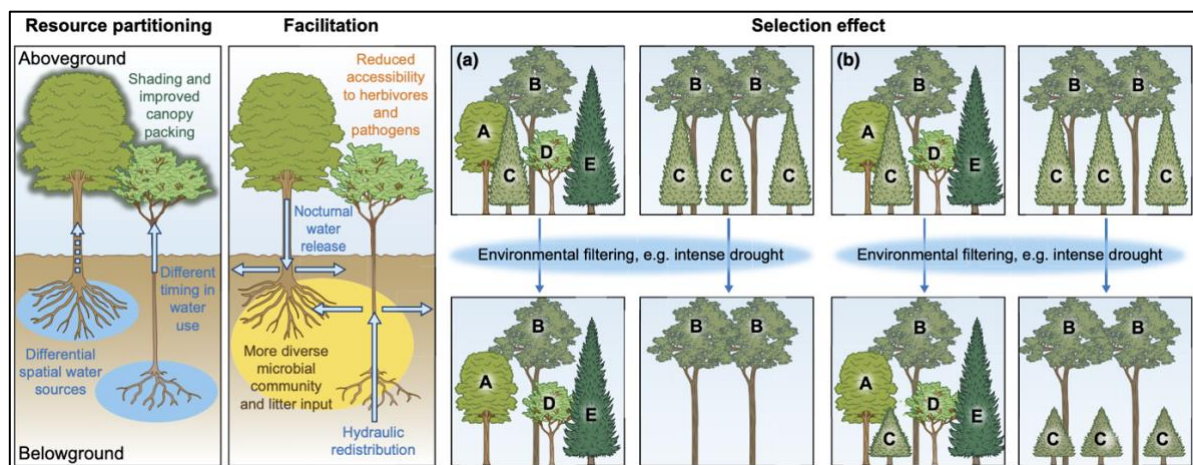


Figure 1.2-2 : Représentation des trois mécanismes : partition de niche (resource partitioning), facilitation (facilitation), effet de sélection (selection effect) (Grossiord, 2020).

Les deux effets de la complémentarité (partition de niche et facilitation) expliquent l'utilisation plus efficace des ressources comme la lumière ou l'eau ainsi que les effets bénéfiques mutuels des essences présentes dans le mélange. L'effet de sélection montre la différence entre des peuplements ayant le même nombre d'individus, mais un nombre d'essences différent (A, B, C, D, E vs B et C). Dans le peuplement le plus riche en essences, la probabilité de contenir davantage d'essences capables de survivre à une sécheresse intense (a) est plus grande (tous les arbres de l'essence C meurent sous l'effet de la sécheresse). L'exemple (b) montre que le peuplement le plus riche en essences a une probabilité plus élevée de contenir des essences capables de maintenir leur fonctionnement lors d'une sécheresse (la croissance de l'essence C est réduite).

Au-delà, beaucoup d'auteurs ont tenté de déterminer si c'est la composition spécifique ou la simple richesse spécifique qui contribue le plus au fonctionnement de l'écosystème. Les connaissances actuelles montrent que la diversité des traits écologiques joue un rôle primordial. Avoir un mélange d'essences fonctionnellement différentes serait ainsi plus important que le simple nombre d'essences prises en compte (Brockhoff et al., 2017 ; Messier et al., 2019).

1.2.1.5 Freins à la mise en place des peuplements mélangés

Bien que les effets bénéfiques des peuplements mélangés soient étudiés scientifiquement, des freins persistent et leur application sur le terrain ne fait que commencer. Messier et al. (2022) avancent surtout quatre limites. D'abord, la gestion technique (travaux, récolte, moment de l'intervention) est plus simple dans un peuplement monospécifique. Ensuite, il y a la présence d'un marché pour les produits standardisés pour quelques essences seulement. Puis, il y a la non-valorisation des bénéfices pour la nature. Enfin, il ne faut pas négliger le poids de l'habitude et l'orientation des gestionnaires vers des exemples de réussite passés. Pretzsch et al. (2021) ajoutent que des prescriptions précises manquent encore. Il ne faut pas négliger l'effet compétitif entre certaines essences présentant des traits écologiques différents. Chaque essence ne bénéficie pas de la même façon du mélange. Il existe ainsi des mélanges plus ou moins compatibles. Par conséquent, certaines essences sont difficiles à maintenir dans un mélange sans intervention humaine, telle que l'éclaircie.

L'application concrète reste donc freinée, également dans le contexte wallon où ces raisons sont bien valables. La forêt privée représente environ la moitié de la surface forestière et dépend donc des différentes volontés et choix des propriétaires. Certains appliquent déjà des mesures d'adaptation au changement climatique, mais de manière encore hésitante et inégale (Van Gameren & Zaccai, 2015).

Malgré les freins, les bénéfices des mélanges d'essences sur le fonctionnement écosystémique sont réels et largement documentés. Le département de la Nature et des Forêts (DNF) encourage la plantation de peuplements mélangés via des formations organisées avec l'aide de l'asbl Forêt Nature (Forêt Nature, 2024). De même, la Société

Royale Forestière de Belgique promeut l'installation d'une biodiversité à tous les niveaux (Société Royale Forestière de Belgique, n.d.). Cela laisse supposer que les peuplements mélangés feront partie de la sylviculture wallonne future. Une meilleure compréhension du peuplement mélangé et de ses interactions spécifiques est cependant nécessaire pour y parvenir.

1.2.1.6 Principaux mélanges rencontrés en région wallonne

Les mélanges typiques rencontrés en Wallonie sont au nombre de deux. La combinaison du chêne et du hêtre, qui représente 6 % de la surface productive, constitue actuellement le mélange feuillu le plus fréquent en Wallonie. (Nailis et al., 2024). Le mélange d'épicéa et de douglas est un autre peuplement rencontré, représentant 3 % de la surface productive. Des peuplements mélangés existent donc déjà à l'heure actuelle, mais ils comportent rarement plus de deux essences. Leur importance devrait augmenter, tant pour les mélanges à deux essences que pour des mélanges encore plus riches en essences. Actuellement, le chêne sessile figure parmi les essences les plus présentes dans les mélanges.

1.2.1.7 Promouvoir le chêne sessile dans un contexte de changement climatique

Parmi les essences principales wallonnes, le chêne sessile est l'une des essences dont la promotion future est supposée être la plus importante. Comme mentionné précédemment, il présente une bonne adaptabilité potentielle au changement climatique. De plus, le chêne sessile est supposé gagner en importance en Europe centrale, dont fait partie la Wallonie (Černý et al., 2024 ; Nicolescu et al., 2025). Par ailleurs, son bois de qualité est apprécié et son prix élevé reste assez constant dans le temps, ce qui en fait une essence intéressante sur le plan économique (Spiecker, 2021). Le bois de chêne sessile a de nombreux débouchés et est donc toujours demandé par l'industrie et les consommateurs (Balleux, 1990). En Wallonie, en 2024, environ 300 000 m³ de bois de chêne ont été récoltés. Par ailleurs, le chêne abrite de nombreuses espèces animales et est donc une essence appréciée pour son potentiel élevé de biodiversité (Černý et al., 2024 ; Nicolescu et al., 2025 ; Wallonie environnement SPW, n.d.). Pour ces raisons, il est probable que le chêne sessile restera présent en Wallonie au cours des prochaines décennies et au-delà, et continuera de jouer un rôle clé dans la sylviculture wallonne. Une étude portant sur le comportement de cette essence en peuplement mélangé s'avère donc utile, voire nécessaire.

1.2.2 Spécificités techniques des peuplements mélangés

1.2.2.1 Installation et maintien de l'équilibre entre essences dans un mélange

Étant donné les croissances juvéniles potentiellement très différentes entre les essences plantées en mélange, dès la phase de l'installation et de la qualification, les essences commencent à entrer en compétition interspécifique trop importante et indésirable. Cette dernière peut supprimer les essences les moins compétitives à un jeune stade. L'objectif d'établir et maintenir l'équilibre des essences plantées, à long terme (Bauhus et al., 2017). Il faut donc accorder une attention particulière à l'installation des essences.

Au stade juvénile, le chêne sessile présente une croissance relativement lente et une tolérance à l'ombrage relativement faible (Wallonie environnement SPW, n.d.). Le chêne sessile risque donc d'échouer lors de l'installation en raison d'une compétition interspécifique trop élevée (Bauhus et al., 2017 ; Pretzsch et al., 2021). Il faut donc veiller à la survie du chêne sessile, et une méthode possible consiste en un schéma de plantation avec séparation spatiale. Les essences peuvent être agencées différemment lors de la plantation afin de diminuer la compétition interspécifique (Bauhus et al., 2017 ; Pretzsch et al., 2021 ; Saha et al., 2014). Selon la compatibilité des essences, le schéma de plantation peut varier (Figure 1.2-3). Une séparation temporelle de la plantation peut également réduire la compétition interspécifique (Bauhus et al., 2017).

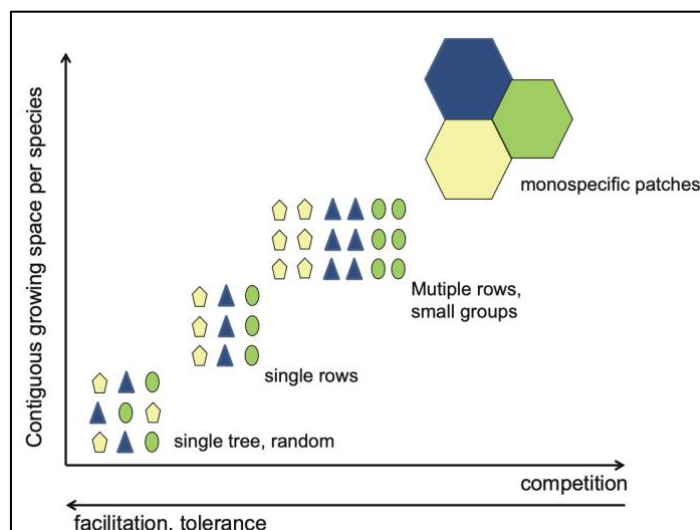


Figure 1.2-3 : Besoin de séparation spatiale des essences lors de la plantation d'un peuplement mélangé (Bauhus et al., 2017).

La facilitation et la tolérance entre essences différentes diminuent avec l'augmentation de la compétition interspécifique. Ainsi, pour des essences à traits écologiques peu compatibles, le besoin en séparation spatiale augmente. Avec une séparation croissante, l'espace disponible pour une essence augmente, ce qui réduit la compétition interspécifique.

Puis, il est question de maintenir le chêne sessile parmi les autres essences. S'il est initialement planté en groupes suffisamment grands, la compétition interspécifique est supposée augmenter avec l'âge du peuplement (Bauhus et al., 2017 ; Pretzsch et al., 2021). Le maintien à l'issue de l'installation et de la qualification du mélange est donc également un défi à relever pendant la phase d'expansion des houppiers. Les essences intolérantes à l'ombrage telles que le chêne sessile nécessitent des interventions adaptées. Une méthode adaptée aux mélanges est l'éclaircie, qui permet de maintenir l'équilibre spécifique du mélange planté, en coupant les compétiteurs voisins (Bauhus et al., 2017 ; Pretzsch et al., 2021 ; Ulbricht et al., 2026).

Les autres raisons justifiant l'éclaircie restent globalement similaires en peuplements monospécifiques et mélangés. Parmi celles-ci figurent la production de bois de qualité via un accroissement en grosseur plus important, la réduction de la durée du cycle sylvicole, la réduction de l'effet compétitif, ainsi que l'augmentation de la stabilité au vent et de la résistance aux pathogènes (Bauhus et al., 2017).

1.2.2.2 Spécificités des éclaircies en peuplements mélangés

La sylviculture traditionnelle ayant principalement ciblé les interventions en peuplements monospécifiques réguliers, peu d'attention a été accordée à l'éclaircie en peuplement mélangé. De plus, la plantation de forêts mélangées reste un concept relativement récent. L'éclaircie en peuplements monospécifiques est donc beaucoup mieux documentée et mieux comprise. Une simple adaptation des prescriptions de l'éclaircie en peuplement monospécifique aux mélanges ne s'avère pas adéquate (Bauhus et al., 2017). L'éclaircie en peuplement mélangé s'avère bien plus complexe et rencontre certains défis. Ces différences découlent de la structure particulière des mélanges. Les paragraphes suivants décrivent les raisons en se basant sur les informations de Bauhus et al. (2017).

Pour commencer, il y a une différence technique concernant la façon dont un peuplement est exploité. En peuplement monospécifique, les arbres présentent une forte homogénéité. Les interventions comme l'égale, l'éclaircie ou la récolte en fin de cycle sylvicole sont ainsi plus faciles à planifier dans le temps et hautement mécanisées. Toute l'industrie y est adaptée. En revanche, les peuplements mélangés sont marqués par une hétérogénéité en essences, en traits écologiques, en besoins physiologiques, en niveau de production de bois, en compétition interspécifique, en vitesse de croissance, etc. Ainsi, le mélange comporte des interactions

biotiques beaucoup plus nombreuses. Même à âge égal, tous les individus n'ont pas la même dimension. Cela nécessite une observation attentive pour décider du bon moment des éclaircies. Celles-ci sont supposées être plus fréquentes, mais d'une intensité réduite. De plus, toutes les essences n'atteignent pas en même temps la hauteur à laquelle il faut intervenir pour la première éclaircie. Il faut également noter que les traits écologiques, tels que la tolérance à l'ombrage ou la vitesse de croissance, ne sont pas stables dans le temps. De cette manière, les interactions de compétition évoluent au cours du cycle sylvicole et, avec elles, le besoin en éclaircie. Un système diversifié en essences présente ainsi inévitablement des défis techniques.

Une deuxième différence majeure est liée à la capacité d'accueil d'un écosystème. Un écosystème ne dispose pas de ressources illimitées et ne peut donc pas abriter une infinité d'arbres. À partir d'une densité maximale, l'écosystème entreprend une éclaircie naturelle, l'auto-éclaircie, par laquelle certains individus meurent en raison d'une compétition trop élevée. En peuplement monospécifique, les prescriptions d'éclaircie se basent sur cette densité naturelle maximale qui sert de référence. Les prescriptions empiriques recommandent une densité de tiges pour un âge ou une hauteur dominante donnée. Or, dans les mélanges, l'auto-éclaircie est beaucoup moins prévisible, les interactions entre les individus étant plus hétérogènes. Il s'avère alors difficile de recommander une densité précise pour un âge donné, étant donné que toutes les essences n'ont pas les mêmes vitesses de croissance. De plus, la densité d'auto-éclaircie en forêt mélangée ne correspond pas à une simple moyenne pondérée des densités observées en peuplements monospécifiques pour chaque essence (Pretzsch et al., 2021). Il a souvent été observé qu'un peuplement mélangé peut abriter plus d'individus, ce qui est dû aux effets complémentaires des différentes essences qui le composent.

Dans un mélange, il faut également trouver un équilibre de densité. Les arbres ne doivent pas être trop espacés, autrement l'effet complémentaire disparaît. À l'inverse, une densité trop élevée engendre une compétition qui réduit les complémentarités et peut éliminer les essences moins compétitives. Un défi majeur de l'éclaircie en peuplement mélangé est donc de trouver une densité d'équilibre optimale. Cependant, cette dernière dépend des essences présentes ainsi que des conditions environnementales limitantes. L'effet d'une réduction de la compétition sur la complémentarité varie selon que la ressource limitante est l'eau ou la lumière, ainsi que selon le degré de ces conditions limitantes. De plus, chaque essence ne bénéficie pas de la même manière d'une réduction de la densité, parce que les effets complémentaires et compétitifs ne sont pas les mêmes d'une essence à l'autre. Ainsi, chaque essence ne répond pas de façon identique à l'éclaircie. Cela s'explique par des traits écologiques différents et représente un défi supplémentaire pour l'éclaircie en peuplement mélangé.

De plus, un arbre individuel ou une essence peut ne pas répondre de la même façon à la réduction de la compétition en mélange et en peuplement monospécifique (Ulbricht et al., 2026). La compétition exercée sur un arbre individuel dépend des essences qui l'entourent (Figure 1.2-4). Chaque essence a potentiellement un effet compétitif différent, qu'il s'agisse d'une compétition inter- ou intraspécifique. Cela représente un autre défi lors de l'éclaircie. Il s'agit de déterminer quel prélèvement permet de réduire le plus efficacement la compétition. La réduction de la compétition pourrait varier significativement selon le voisin prélevé, selon qu'il s'agit d'une essence identique ou non, et donc d'une compétition intra- ou interspécifique.

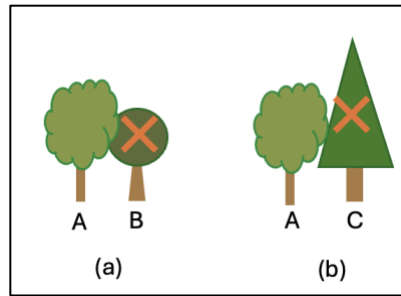


Figure 1.2-4 : Schéma conceptuel de l'éclaircie d'une essence A, selon différentes essences voisines. L'essence A est libérée de la compétition d'un individu de l'essence B (a) et de l'essence C (b). L'essence A est supposée de réagir différemment à l'éclaircie dans les deux situations.

D'une manière générale, Bauhus et al. (2017) indiquent que les réponses spécifiques des essences face à l'éclaircie en mélange n'ont que très peu été étudiées. Faute de recherche suffisante, les mélanges sont souvent considérés comme une agglomération de peuplements monospécifiques. Cela empêche une éclaircie adaptée aux mélanges spécifiques et, dans le pire des cas, peut diminuer la productivité. Pour y remédier, Bauhus et al. (2017) proposent l'éclaircie selon une approche par arbre cible (Figure 1.2-5), qui se distingue par sa flexibilité et sa sélection d'arbres individuels à favoriser. Cette méthode vise le développement de tiges de qualité, en sélectionnant des tiges spécifiques. Les plus forts compétiteurs de l'arbre sélectionné sont alors prélevés précisément, étape par étape. Cela présente l'avantage de pouvoir adapter la réduction de la compétition selon le voisinage concret d'un arbre cible. Cette approche peut être appliquée de manière flexible, quelle que soit la composition spécifique du peuplement. Bauhus et al. (2017) soulignent que cette méthode permet de maintenir la diversité spécifique souhaitée, de choisir les arbres cibles les plus adaptés et d'optimiser leur nombre ainsi que le moment de la première éclaircie en fonction du mélange.

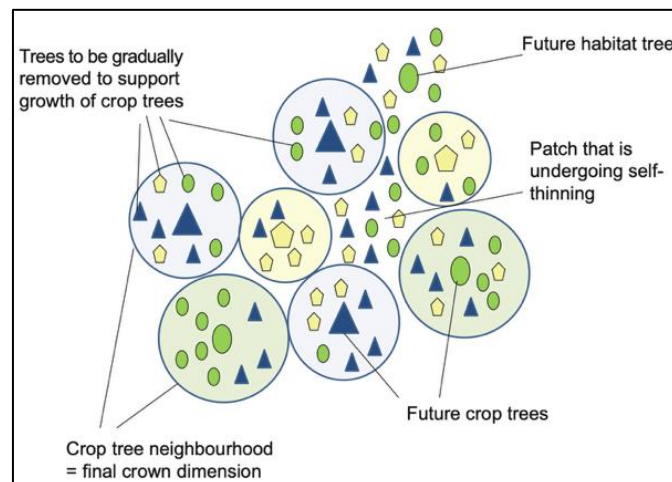


Figure 1.2-5 : Représentation conceptuelle de l'éclaircie selon l'approche par arbre cible (crop tree) (Bauhus et al., 2017).

La figure montre les arbres cibles sélectionnés ainsi que la dimension circulaire finale de leur houppier (final crown dimension). Au sein de ce cercle, supposé représenter la zone d'influence de l'arbre cible, les compétiteurs sont progressivement enlevés afin de permettre l'expansion du houppier. Les surfaces situées entre les arbres cibles ne sont pas touchées.

1.2.3 Facteurs écologiques affectant la croissance individuelle d'un arbre

Dans le but de proposer les prescriptions dont les arbres cibles peuvent le plus bénéficier, il faut connaître d'autres facteurs de l'environnement immédiat influençant la croissance individuelle de l'arbre cible. Une question préalable est celle de la détermination de la taille et de la forme de la zone d'influence, c'est-à-dire de la distance maximale à laquelle un voisin

peut être identifié comme compétiteur pour les ressources. Cette question a été intégrée dans les recherches de Canham et al. (2004). Souvent, la zone d'influence est la projection au sol du houppier de l'arbre cible ayant atteint sa dimension d'exploitabilité (Figure 1.2-5) (Bauhus et al., 2017). Ainsi, la zone d'influence est couramment décrite comme un cercle autour de l'arbre cible (Deschênes, 2016 ; Bauhus et al., 2017). Or, la distance maximale varie également selon les essences voisines et la forme de la compétition (Figure 1.2-6). Plusieurs paramètres peuvent donc être pris en compte lors de la détermination d'une zone d'influence.

1.2.3.1 Compétition du voisinage local

De nombreuses recherches ont essayé de quantifier la compétition exercée sur un arbre par son environnement immédiat. D'une manière générale, la compétition est décrite comme l'utilisation d'une même ressource limitée. Il s'agit d'une interaction qui peut réduire la valeur adaptative d'un ou plusieurs individus impliqués (Deschênes, 2016). Comme le montre la figure ci-dessous, l'effet compétitif du voisinage peut être divisé en deux catégories (Coates et al., 2009). D'un côté, il y a la compétition souterraine pour le développement des racines et l'utilisation de l'eau ou des éléments nutritifs. De l'autre côté, il y a la compétition aérienne pour la lumière. La compétition souterraine est généralement proportionnelle à la taille de l'individu (symétrique), alors qu'elle est disproportionnée pour la compétition aérienne (asymétrique) (Acquah & Marshall, 2020 ; Bhandari et al., 2021 ; Von Oheimb et al., 2011). Dans un mélange, les deux formes de compétition sont supposées être présentes (Acquah & Marshall, 2020). Cependant, la compétition du voisinage local sous la forme de l'ombrage est particulièrement intéressante en mélange, où les essences diffèrent potentiellement en vitesse de croissance, en opacité du houppier et en (in)tolérance à l'ombrage.

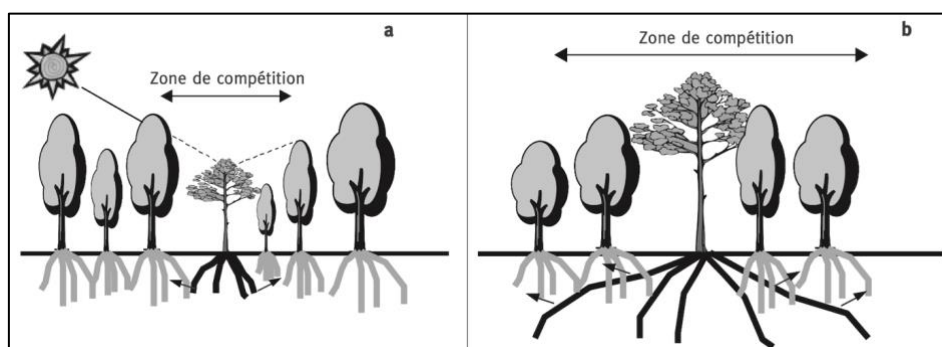


Figure 1.2-6 : Représentation schématique de la compétition entre un arbre sujet et son voisinage local (Prevosto, 2005).

L'exemple (a) montre que la plus forte compétition pour la lumière provient des voisins de plus grande dimension que l'arbre cible. La compétition pour la lumière est asymétrique, car elle est disproportionnée par rapport à la dimension des individus. La zone de compétition est relativement petite. Dans l'autre cas (b), l'arbre cible est soumis à une compétition pour l'eau et les nutriments. La zone de compétition est plus large, car les voisins prélèvent les ressources proportionnellement à leur dimension (compétition symétrique).

De manière générale, il est probable que plus la densité du voisinage local augmente, plus il y a de compétiteurs pour les ressources. Par conséquent, un arbre cible dans un voisinage dense subit une compétition plus forte et voit sa croissance individuelle réduite. Ce facteur est adapté au cas des peuplements mélangés, car il agit à l'échelle de l'environnement immédiat de l'arbre cible (Canham et al., 2004).

La compétition exercée par les individus du voisinage local est couramment quantifiée à l'aide d'indices de compétition. Ces derniers sont nombreux et utilisés depuis longtemps. Il y a deux grands types d'indices, dont les indices dépendants et indépendants de la distance (Canham et al., 2004 ; Coates et al., 2009 ; Deschênes, 2016 ; Prevosto, 2005). Les indices dépendants de la distance utilisent la connaissance spatialisée de l'emplacement des voisins au sein d'une zone d'influence circulaire où l'arbre cible se trouve au centre (Prevosto, 2005). Ce type d'indice se concentre donc sur un niveau local autour de l'arbre cible. Cependant, il existe

différentes classes d'indices, comme le décrit Prevosto (2005). Une classe souvent rencontrée est celle des indices basés sur le ratio de taille, pondérés par la distance. Parmi ceux-ci, il y a par exemple l'indice de Hegyi, qui utilise un ratio de diamètre à hauteur de poitrine. Zhang (2016) en a fait une adaptation basée sur la surface terrière. Dans tous les cas, ces indices suivent la même logique. L'effet compétitif du voisin augmente avec sa taille et diminue avec sa distance à l'arbre cible, toute autre chose étant constante. L'indice de compétition est alors la somme des effets individuels. L'importance relative de ces effets pouvant varier d'une essence à l'autre, certains auteurs ajoutent des exposants spécifiques adimensionnels (Canham et al., 2004 ; Coates et al., 2009). Ces derniers auteurs prennent également en compte le fait que toutes les essences n'exercent pas le même effet compétitif. Pour cette raison, ils ajoutent un coefficient de compétition spécifique. Une autre recherche de Boivin (2010) propose d'intégrer une mesure de l'azimut du voisin. Ce choix intègre la composante de la compétition aérienne pour la lumière, car il est à supposer que l'azimut influence l'ombre projetée par le voisin. Canham et al. (2004) proposent également une mesure d'azimut, mais plutôt dans le but d'évaluer si les voisins sont répartis de manière homogène ou non autour de l'arbre. Ainsi, différentes versions adaptées existent. D'autres classes d'indices dépendants de la distance sont les indices utilisant les couvertures angulaires, les caractéristiques des houppiers ou encore les aires potentiellement disponibles (Prevosto, 2005 ; Deschênes, 2016).

En revanche, les indices indépendants de la distance n'utilisent aucune donnée spatialisée, telle que l'azimut ou la distance séparant les deux arbres considérés. Là encore, il existe différentes classes d'indices. Il y a des indices basés sur la vigueur des houppiers, sur le ratio de taille et sur les caractéristiques du peuplement (surface terrière, densité de tiges, indice de Reineke) dans son ensemble ou à l'échelle locale (Prevosto, 2005 ; Deschênes, 2016 ; Acquah & Marshall, 2020). Dans ce dernier cas, l'indice est calculé uniquement pour le voisinage local, en déterminant une zone d'influence autour de l'arbre en question (Roberts & Harrington, 2008).

Quant à l'utilisation des indices, les indices indépendants de la distance sont mieux adaptés aux peuplements monospécifiques et réguliers (Prevosto, 2005 ; Deschênes, 2016). En peuplement mélangé, les indices dépendants de la distance sont particulièrement adaptés, car ils prennent en compte le voisinage immédiat de l'arbre étudié de manière spatialement explicite (Zhao et al., 2006). Ce type d'indice permet donc de quantifier et de comparer l'effet compétitif sur l'arbre cible selon différents mélanges.

Puis, il est possible de prendre plus explicitement en compte l'ombrage. Les peuplements mélangés ont une structure de la canopée assez hétérogène. Les différences d'opacité et de hauteur des houppiers engendrent des conditions lumineuses hétérogènes à une échelle très locale. Ainsi, une quantification de la ressource lumineuse interceptée par les arbres cibles est supposée contribuer à l'explication de la variabilité de leur croissance. Évidemment, la sensibilité à l'ombrage dépend de la tolérance à l'ombrage de l'essence en question. Dans le cas du chêne sessile, il nécessite une grande quantité de lumière vu sa faible tolérance à l'ombrage.

Au stade actuel, la quantification de la compétition du voisinage local s'est surtout basée sur des modèles spatialement explicites qui décrivent l'environnement aérien (Canham et al., 2004). Ces modèles utilisent des relations allométriques, des caractéristiques spécifiques des essences en question et des géométries de houppier pour quantifier l'ombrage que les arbres voisins projettent sur l'arbre cible. Courbaud et al. (2003) fournissent un modèle à l'échelle individuelle particulièrement adapté aux peuplements à structure spatiale hétérogène, tels que les mélanges. Ce modèle spatialement explicite compare, pour chaque arbre, la ressource lumineuse réellement interceptée à la ressource complète si l'arbre poussait en champ libre. Un ratio servant d'indice de compétition peut alors être calculé afin d'évaluer l'effet du voisinage sur l'accès de l'arbre cible à la lumière. Stadt et al. (2007) utilisent également des algorithmes spatialement explicites pour quantifier le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR). Cette mesure peut alors être présentée comme éclaircissement ou transformée en

ombrage. L'ombrage est défini comme le pourcentage de densité de flux de photons photosynthétiques (PPFD) incidents qui est bloqué par le houppier de l'arbre compétiteur voisin (Canham et al., 2004 ; Stadt et al., 2007). L'éclairement relatif mesure l'inverse, la part des rayons atteignant le houppier de l'arbre en question.

D'autres recherches ont développé des indices de compétition pour quantifier la compétition pour la lumière (Rieder et al., 2024). Ces derniers comptent le nombre de voxels (déterminés par détection laser) de houppiers avoisinants entrant dans un espace propre (cône ou cylindre) à l'arbre cible.

1.2.3.2 Dimension de l'arbre

Un facteur couramment utilisé pour expliquer la croissance est celui de la taille initiale de l'arbre. L'effet de la taille peut être formulé de différentes manières. Le diamètre à hauteur de poitrine est souvent utilisé (Canham et al., 2006 ; Bhandari et al., 2021 ; Coates et al., 2009 ; Acquah et al., 2020 ; Lhotka et al., 2011). En théorie, la hauteur totale peut également être utilisée comme variable de l'effet de taille initiale. Or, sa mesure étant plus coûteuse en temps et en efforts, l'effet de taille est le plus souvent exprimé à l'aide du diamètre initial (Bhandari et al., 2021).

Il existe un consensus scientifique selon lequel la taille initiale explique une part importante de la variabilité de la croissance entre les arbres. En effet, la taille initiale de l'arbre, au début de la saison de croissance considérée, reflète sa capacité à accéder aux ressources disponibles (Figure 1.2-7) (Bhandari et al., 2021 ; Coomes & Allen, 2007 ; Z. Zhang et al., 2016). Un arbre initialement plus grand possède potentiellement un système racinaire et un houppier plus développés, ce qui lui donne un meilleur accès aux ressources. Un système racinaire plus développé permet d'exploiter les ressources nutritives dans un volume de sol plus important. En parallèle, un houppier plus large augmente la surface foliaire et donc l'activité photosynthétique, tout en réduisant potentiellement l'effet compétitif exercé par les voisins (Figure 1.2-7).

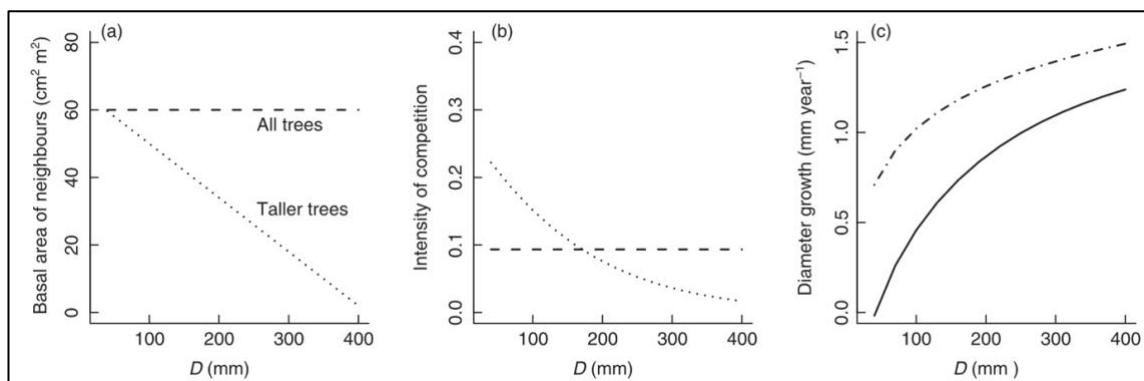


Figure 1.2-7 : Modèle conceptuel des manières comment la dimension initiale influence la croissance en conséquence d'un changement de la compétition (Coomes & Allen, 2007).

(a) L'arbre cible a un diamètre à hauteur de poitrine D (mm). Plus il est gros, moins il y a de voisins présentant une surface terrière individuelle plus élevée. (b) L'intensité de la compétition pour la lumière (.....) diminue fortement avec la dimension, car la probabilité d'être mis à l'ombre par un voisin diminue. La compétition pour les nutriments (— — —) reste cependant constante, toute autre chose étant égale. (c) Plus l'arbre cible est gros, plus sa croissance en diamètre est élevée. La différence entre la croissance potentielle (absence de compétiteurs ;) et la croissance moyenne sous l'effet des compétiteurs (—) est la plus importante pour les individus de faible diamètre.

La taille initiale d'un arbre, à essence, site et âge fixé, est également un reflet de la compétition de son environnement qu'il a subie jusque-là (Canham et al., 2006).

1.2.3.3 Effet de l'éclaircie

L'éclaircie selon une approche par arbre cible est réalisée pour réduire la compétition locale. Cette dernière étant un facteur déterminant la croissance, il est supposé que l'éclaircie favorise la croissance et constitue donc l'un des facteurs déterminant la croissance de l'arbre (Ulbricht et al., 2026 ; Figure 1.2-5).

1.2.3.4 D'autres facteurs écologiques, à échelle plus large

Les facteurs décrits jusque-là agissent tous à l'échelle locale de l'arbre. D'autres facteurs écologiques jouent à une échelle spatiale nettement plus large, tels que des variables édaphiques ou le climat. Il est supposé qu'un sol plus fertile permet un taux d'accroissement plus important. Ce facteur est souvent pris en compte au moyen d'une analyse en composantes principales (Canham et al., 2006 ; Z. Zhang et al., 2016) ou comme variable catégorielle selon la classe de fertilité (Lhotka et al., 2011 ; Roberts & Harrington, 2008). Les recherches qui prennent en compte des variables climatiques se basent sur des températures ou encore sur des précipitations (Buechling et al., 2017 ; Collado et al., 2023). Les deux facteurs décrits dans ce paragraphe sont moins adaptés à l'analyse de la variabilité de la croissance individuelle au sein d'un même peuplement. Dans le contexte local, ils sont supposés être constants pour chaque individu.

La prise en compte de l'effet de l'âge est intéressante parce que les essences ont une croissance différente selon leur stade de développement (Aldea et al., 2017 ; Buechling et al., 2017). L'utilisation de ce facteur nécessite une connaissance de l'âge des arbres, ce qui n'est pas toujours disponible dans les forêts mélangées de structure irrégulière. Comme pour tous les autres facteurs, l'échelle à laquelle les croissances sont comparées est déterminante pour savoir si le facteur est pertinent ou non. Dans une plantation où les individus ont tous le même âge, l'âge ne permet pas d'expliquer la variabilité des croissances individuelles.

1.2.4 Modélisation de l'accroissement et de la réponse à l'éclaircie

La quantification des facteurs de compétition et de dimension initiale permet donc d'expliquer la variabilité de la croissance individuelle de l'arbre cible. L'échelle à laquelle ces facteurs interviennent est particulièrement adaptée aux peuplements mélangés. Toutefois, la seule quantification de la compétition et de la dimension initiale ne suffit pas à estimer la réponse d'un arbre à l'éclaircie.

1.2.4.1 Manières d'évaluer la réponse à l'éclaircie

Dans un premier temps, il faut choisir une méthode pour estimer cette réponse. Outre une analyse de l'architecture du houppier ou de traits fonctionnels foliaires, la réponse d'un arbre cible à l'éclaircie peut être évaluée à travers son accroissement en grosseur (Zeng et al., 2024). L'interprétation de la réponse à l'éclaircie nécessite donc une modélisation de l'accroissement de l'arbre en question au cours des saisons suivant l'intervention. Pour cela, les facteurs déterminant la croissance doivent être intégrés dans un modèle de croissance. Les modèles de croissance permettent entre autres de prédire l'effet de l'éclaircie sur l'accroissement d'un arbre et d'évaluer l'importance relative des différentes variables explicatives.

1.2.4.2 Manières de modéliser l'accroissement

La modélisation d'accroissement est documentée avec de nombreuses variables réponses différentes. Selon les auteurs, il s'agit d'un accroissement en diamètre (absolu ou relatif) (Bhandari et al., 2021 ; Canham et al., 2006 ; Coates et al., 2009 ; Fukumoto et al., 2020), en surface terrière (Acquah & Marshall, 2020; Del Río et al., 2025) ou en volume (Engel et al., 2021 ; Stimm et al., 2022). Il existe également des différences concernant l'échelle temporelle de ces accroissements. La majorité des modèles utilisés prédisent un accroissement courant

annuel, mais certains modèles évaluent l'accroissement intra saisonnier (Aldea et al., 2017) ou même un accroissement moyen périodique sur plusieurs saisons (Lhotka, 2017).

1.2.4.3 Modèles de croissance

En général, les modèles rencontrés pour prédire l'accroissement d'un arbre diffèrent par leur forme. Selon les auteurs, les modèles statistiques sont soit des modèles additifs linéaires, soit des modèles multiplicatifs non linéaires. Les modèles multiplicatifs considèrent souvent une croissance potentielle, en l'absence de compétition, qui est réduite par des facteurs scalaires allant de 0 à 1. Ces derniers représentent par exemple l'effet de taille ou l'effet de la compétition, qu'elle soit souterraine ou aérienne (Boivin, 2010 ; Canham et al., 2006 ; Coates et al., 2009). La fonction exponentielle est couramment utilisée pour transformer les indices de compétition en un facteur scalaire.

D'autre part, des modèles additifs sont couramment utilisés (Bhandari et al., 2021 ; Collado et al., 2023 ; Del Río et al., 2025 ; Fukumoto et al., 2020 ; Lhotka & Loewenstein, 2011 ; Ulbricht et al., 2026 ; Yue et al., 2022). Dans ce cas, les modèles utilisés sont souvent linéaires et les facteurs écologiques, tels que l'effet de la taille initiale ou la compétition locale, sont additionnés.

Certains auteurs utilisent des modèles logarithmiques pour linéariser un modèle non linéaire ou réduire l'hétéroscédasticité (Bhandari et al., 2021 ; Del Río et al., 2025). Dans certains cas, les variables sont relativisées afin de réduire les problèmes de colinéarité (Ulbricht et al., 2026). Enfin, de nombreux auteurs intègrent également un effet aléatoire dans leurs modèles afin d'expliquer une variance liée à un effet partagé entre certaines observations. L'intégration d'un effet aléatoire peut notamment être utile lorsque plusieurs arbres partagent un même contexte de mélange. Elle permet de tenir compte d'une partie de la variance liée à cette appartenance commune et de mieux distinguer les effets individuels des facteurs locaux, tels que la taille initiale ou la compétition du voisinage.

1.2.4.4 Intégration de l'éclaircie et de l'effet de la composition

Certains auteurs incluent dans leurs modèles l'intensité ou la méthode d'éclaircie (Aldea et al., 2017; Del Río et al., 2025; Roberts & Harrington, 2008; Ulbricht et al., 2026). Ce facteur est soit présent sous forme de variable catégorielle, prenant des valeurs comprises entre zéro et un pour représenter différentes intensités d'éclaircie, soit sous forme de variable binaire prenant une valeur de zéro ou un (non éclairci = 0 et éclairci = 1). La première version permet d'évaluer l'intensité de l'éclaircie, alors que la deuxième indique uniquement si l'arbre cible a été éclairci ou non. Une autre méthode consiste à comparer les paramètres de modèles ajustés séparément pour des peuplements éclaircis à des intensités différentes, ou à intégrer l'effet de l'éclaircie à l'aide d'un effet aléatoire (Fukumoto et al., 2020).

La prise en compte du type de peuplement, monospécifique ou mélangé, peut également aider à prédire l'accroissement et donc à déterminer la réponse à l'éclaircie. Ulbricht et al. (2026) utilisent une variable binaire pour le type de peuplement (monospécifique = 0 et mélange = 1). Si l'objectif est de décrire plus précisément la composition spécifique, une variable catégorielle à plusieurs niveaux peut être considérée (Del Río et al., 2025).

De plus, il est possible d'inclure dans le modèle un facteur d'interaction entre le mélange et l'éclaircie. Ce facteur d'interaction permet de tester si l'effet d'une variable sur la variable réponse du modèle dépend du niveau d'une autre variable. Dans ce cas, il permet de tester si l'effet de l'éclaircie dépend du type de peuplement. Cela s'avère utile pour étudier le comportement d'un arbre cible face à l'éclaircie en fonction de son environnement et du mélange. Cette méthode est utilisée par Del Río et al. (2025) et Ulbricht et al. (2026), qui prennent en compte le mélange et l'intensité d'éclaircie dans un même modèle.

1.3 Objectifs

La forêt wallonne assure une multitude de services écosystémiques, dont la production de bois. Cependant, elle est très sensible aux effets abiotiques et biotiques liés au changement climatique. La sylviculture doit trouver des solutions adaptées à long terme. Un consensus scientifique préconise de mettre en place davantage de peuplements mélangés. Or, il en découle certaines difficultés de compatibilité entre essences, surtout pour le chêne sessile, qui jouera cependant un rôle clé dans la sylviculture wallonne future. Chaque essence a des traits écologiques différents et, dans un mélange, ces différences se traduisent par des niveaux de compétition inégaux et des bénéfices relatifs du mélange différents. Le chêne sessile est particulièrement concerné, vu sa croissance relativement lente au stade juvénile et son besoin élevé en lumière. L'éclaircie joue ainsi un rôle clé dans le maintien et donc la production de bois de chêne. En revanche, l'éclaircie en peuplement mélangé rencontre certains défis par rapport à l'éclaircie en peuplement monospécifique. Ces inconnues sont entre autres responsables du nombre réduit de plantations de forêts mélangées. Afin de promouvoir le recours à la plantation du chêne sessile dans des mélanges, il est indispensable d'étudier davantage le comportement individuel des chênes face à l'éclaircie.

L'objectif de ce travail de fin d'études est de quantifier la réponse des chênes sessiles à l'éclaircie en peuplements monospécifiques et mélangés. Cette étude cherche aussi à identifier les facteurs affectant la variabilité de la réponse des chênes en fonction du type de peuplement dans lequel ils se trouvent.

Certaines hypothèses existent concernant ces questions de recherche. Tout d'abord, les chênes sont supposés répondre à l'éclaircie selon leur dimension initiale (Canham et al., 2006). Un chêne sessile de dimension relativement réduite a souvent un petit houppier et n'aurait donc pas les mêmes potentialités qu'un chêne plus grand de profiter instantanément de la réduction de la compétition. Une autre hypothèse prévoit que la réponse à l'éclaircie sera d'autant plus importante que l'intensité de la compétition initiale est élevée (Ulbricht et al., 2026). En réalité, il est probable que les deux hypothèses sont liées entre elles et que c'est probablement une combinaison des deux qui explique la réponse d'un chêne cible à l'éclaircie. Si un chêne cible ne répond que faiblement à l'éclaircie, c'est probablement parce qu'il est de petite dimension. Or, il est probablement de petite taille, car il n'avait pas assez de ressources dans le passé. Ainsi, il peut être supposé que les chênes cibles ne profitent pas de la même manière de l'éclaircie selon les différents types de peuplement. En moyenne, les peuplements purs et mélangés peuvent différer par leur niveau de compétition et leur structure verticale. Dans les peuplements mélangés, la composition spécifique des essences présentes est également susceptible d'influencer la réponse des chênes, notamment selon les différences d'architecture du couvert, de croissance ou de tolérance à l'ombrage des espèces associées.

La stratégie mise en place pour répondre à la question de recherche et vérifier les hypothèses combine des mesures de terrain et une modélisation statistique de l'accroissement en grosseur. Les mesures de terrain nécessaires à cette analyse sont réalisées sur le site expérimental FORBIO à Gedinne, en Wallonie. Ce dispositif abrite des chênes sessiles dans des parcelles de compositions très contrastées. La recherche se focalise sur l'éclaircie de chênes en peuplements purs et mélangés, réalisée en février 2024. La quantification de la réponse du chêne à l'éclaircie repose sur la conception de modèles de croissance pour la saison de croissance 2025. La modélisation porte ainsi sur une saison de croissance post-éclaircie, avec un décalage d'une année par rapport à la coupe.

2 Matériel et méthodes

2.1 Site expérimental de FORBIO

2.1.1 Informations générales

La recherche s'effectue dans le dispositif du projet *Forest Biodiversity* (FORBIO) (Verheyen et al., 2013). Ce dernier s'intègre dans le réseau international *Tree Diversity Network* (TreeDivNet). Il existe trois dispositifs FORBIO en Belgique, dont un se trouve près de Gedinne. C'est ce dernier qui est utilisé dans le cadre de ce travail de fin d'études. Le dispositif de Gedinne est composé de deux sous-sites ou blocs, appelés d'après les lieux-dits Gribelle et Gouverneurs. Les deux blocs sont espacés d'environ deux kilomètres et présentent un dispositif scientifique identique (Figure annexe 14).

Tableau 2-1 : Informations générales du site expérimental (Verheyen et al., 2013)

Commune	Gedinne (Province du Luxembourg)
Sites	Gribelle (Gr) et Gouverneurs (Go)
Coordonnées	49°59'51"N 4°58'40"E (Gr) et 49°58'30"N 4°59'06"E (Go)
Surface du dispositif expérimental	± 4,5 ha (Gr) et ± 4,5 ha (Go)
Altitude	367-376m (Gr) et 421-426m (Go)
Climat	Précipitation moyenne annuelle : 1021mm Température moyenne annuelle : 6,9°C
Type de sol (Carte Numérique Wallonne des Sols/WRB code)	Gbb/Cambisol (Gr et Go) Sol limono-caillouteux à charge phylladeuse et à drainage favorable
Antécédent	Plantation d'épicéas de 1920 à 2005 (Gr et Go)

2.1.2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental a été conçu afin d'évaluer à la fois l'effet de la richesse spécifique, correspondant au nombre d'espèces ligneuses présentes dans le peuplement (de 1 à 4), et celui de la composition spécifique. Pour chaque niveau de richesse, cinq modalités de composition ont été mises en place afin de représenter différentes associations d'essences. Dans le cas du hêtre, deux monocultures supplémentaires ont également été installées afin de permettre l'analyse d'un éventuel effet de provenance.

Chaque site comporte 22 parcelles. Chaque parcelle correspond à un peuplement de composition différente, allant de peuplements monospécifiques à des mélanges de deux, trois et jusqu'à quatre essences différentes. Ces mélanges ont été constitués à partir d'un pool de cinq essences au total, dont trois essences feuillues et deux essences résineuses (Tableau 2-2).

Tableau 2-2 : Traits écologiques des cinq essences présentes dans le dispositif de Forbio (statut de succession (Burschel & Huss, 1997), opacité (Verheyen et al., 2012), tolérance à l'ombrage et la croissance selon le fichier écologique des essences (Wallonie environnement SPW, n.d.)

Essence	Feuillu ou résineux	Statut de succession	Opacité du houppier	Tolérance à l'ombrage en stade juvénile	Croissance
Chêne	Feuillu	2	3	Faible tolérance	Précoce, lente, soutenue
Hêtre	Feuillu	3	5	Tolérance	Tardive, moyenne, soutenue
Érable	Feuillu	2	4	Tolérance moyenne	Précoce, rapide, non-soutenue
Douglas	Résineux	2	4	Faible tolérance	Précoce, rapide, soutenue
Mélèze	Résineux	1	1	Très intolérant	Précoce, rapide, non-soutenue

Le statut de succession allant de 1 (essence pionnière) à 3 (essence climacique) ; L'opacité du houppier allant de 1 (houppier léger) à 5 (houppier dense)

Plus précisément, il s'agit des essences *Quercus petraea*, *Fagus sylvatica*, *Acer pseudoplatanus*, *Pseudotsuga menziesii* et *Larix x eurolepis*. Dans la suite du présent rapport, ces essences sont appelées respectivement chêne, hêtre, érable, douglas et mélèze. L'utilisation d'essences à traits écologiques différents permet de créer des conditions de compétition contrastées en mélange. La recherche se concentrant uniquement sur le chêne, seules les parcelles contenant du chêne sont prises en compte (Figure 2.1-1).

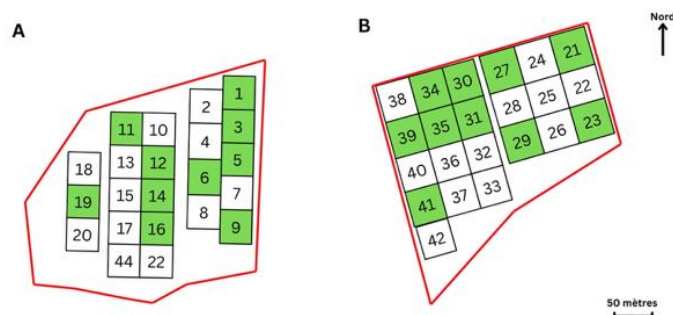


Figure 2.1-1 : Représentation schématique des deux blocs : (A) Gribelle et (B) Gouverneurs. Les parcelles colorées en vert contiennent du chêne.

Chaque bloc comporte 10 parcelles contenant du chêne, dont neuf mélanges et une monoculture. Parmi les neuf mélanges, il y a deux mélanges de deux essences, trois mélanges de trois essences et quatre mélanges de quatre essences. Chaque mélange, c'est-à-dire composition, est représenté deux fois, à Gribelle et Gouverneurs (Tableau 2-3).

Toutes les parcelles mesurent 42 × 42 m (17,6 ares), à l'exception des parcelles à Gouverneurs ayant un numéro de parcelle supérieur à 29 (Figure 2.1-1). Ces dernières mesurent 42 × 37 m (15,5 ares). Le schéma de plantation varie en fonction de la richesse spécifique, mais est toujours réalisé selon des clusters rectangulaires de neuf individus de la même essence. Au bord des parcelles, ces clusters ont parfois 12 individus, pour des raisons de place disponible. Les arbres ont été plantés en 2010 selon un espacement de 1,5 × 1,5 m. Un cluster a donc une dimension théorique de 3 × 3 m. Les placettes de mélanges à deux essences comportent les clusters sous forme d'échiquier. Pour les parcelles de mélanges de trois, voire quatre essences, l'agencement des clusters a été défini aléatoirement tout en gardant un équilibre entre les essences.

2.1.3 Réalisation de l'éclaircie

La réponse à la question de recherche nécessite de disposer de chênes éclaircis et non éclaircis, et ce, dans différents types de peuplement. Une éclaircie selon l'approche par arbre cible a été réalisée en février 2024 dans l'ensemble des parcelles et blocs. L'intervention a été appliquée à la moitié des chênes cibles. Le statut d'éclaircie des chênes cibles distingue donc les chênes cibles éclaircis (T, *thinned*) et les chênes cibles témoins (C, *control*). Pour les chênes cibles éclaircis (T), jusqu'à deux individus parmi les plus compétitifs du voisinage ont été coupés (Figure 2.1-2). Les chênes cibles témoins (C) n'ont reçu aucun traitement. Les arbres voisins ont été coupés de manière à libérer l'espace autour du houppier du chêne cible, afin d'apporter davantage de lumière.

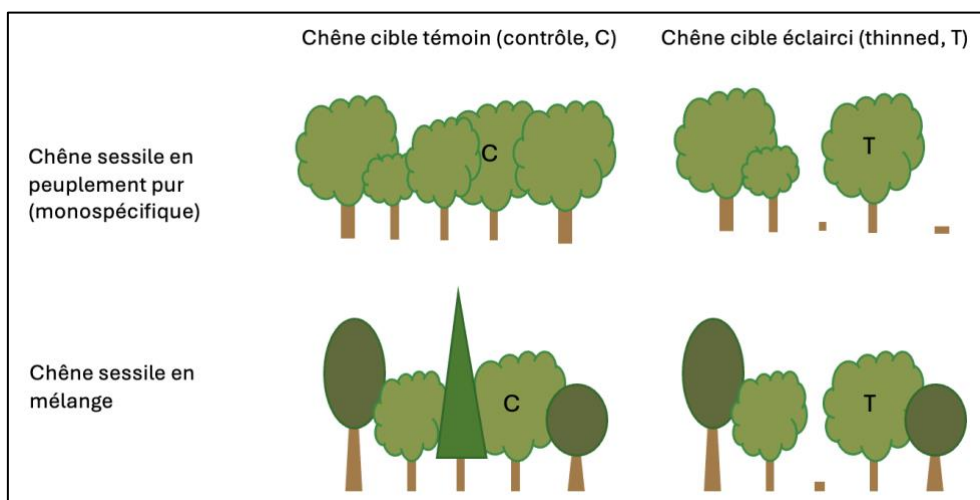


Figure 2.1-2 : Environnement compétitif typique des arbres cibles non éclaircis (C) et éclaircis (T) en monoculture (en haut) et en mélange (en bas ; 1 exemple parmi les 9 mélanges étudiés). Au maximum 2 arbres ont été enlevés par arbre cible.

La sélection de chênes cibles a eu lieu en 2023. Les chênes cibles ont été sélectionnés selon un critère de dominance, en privilégiant les individus les plus gros. Étant donné qu'un équilibre en essences est désiré, chaque essence est représentée par un nombre équivalent d'arbres cibles. Ce nombre dépend de la richesse spécifique de la parcelle en question. Ainsi, une parcelle monospécifique de chêne comporte 40 chênes cibles. Ce nombre diminue avec le nombre d'essences présentes dans une parcelle. Dans une parcelle de deux, trois et jusqu'à quatre essences, il y a respectivement 20, entre 12 et 14, et 10 chênes cibles. Les arbres cibles restants sont des essences associées. Le nombre total d'arbres cibles, toutes essences confondues, reste relativement identique à chaque fois, soit proche de 40. Les chênes cibles éclaircis (T) et témoin (C) sont présents en proportions théoriquement équivalentes, à l'échelle de la parcelle. Le nombre théorique total de chênes cibles s'élève à environ 320, répartis sur 10 parcelles à Gouverneurs et 10 parcelles à Gribelle. En théorie, chaque bloc comporte 80 chênes éclaircis et 80 chênes témoins.

2.1.4 Parcelles contenant des chênes

Le Tableau 2-3 résume les compositions de parcelles de FORBIO contenant de chêne. Ces parcelles sont la base expérimentale de la recherche. Chaque parcelle représente une composition de richesse et composition spécifique. Dans la suite du rapport, les compositions sont appelées selon leur acronyme (Tableau 2-3).

Tableau 2-3 : Parcelles contenant des chênes avec leur composition et richesse spécifique.

Richesse spécifique	Composition	Acronyme	Numéro de la parcelle	
			Gribelle	Gouverneurs
1	Chêne	Qu	11	30
2	Chêne-mélèze	La_Qu	5	21
2	Chêne-hêtre	Fa_Qu	14	39
3	Chêne-hêtre-douglas	Fa_Ps_Qu	3	27
3	Chêne-érable-mélèze	Ac_La_Qu	19	31
3	Chêne-érable-douglas	Ac_Ps_Qu	9	34
4	Chêne-érable-mélèze-douglas	Ac_La_Ps_Qu	1	29
4	Chêne-hêtre-érable-mélèze	Ac_Fa_La_Qu	12	23
4	Chêne-hêtre-mélèze-douglas	Fa_La_Ps_Qu	6	35
4	Chêne-hêtre-érable-douglas	Ac_Fa_Ps_Qu	16	41

2.2 Mesures de terrain à FORBIO

2.2.1 Mesures dendrométriques

2.2.1.1 Inventaire des grosseurs

La circonférence de chaque arbre cible est mesurée à l'aide d'un mètre ruban souple gradué en millimètres. La mesure est prise à hauteur de poitrine, soit à 1,30 m au-dessus du sol. Si la circonférence est inférieure à 7 cm, le diamètre est mesuré à l'aide d'un pied à coulisse. Les mesures sont réalisées en hiver, pendant l'arrêt de croissance, afin de permettre une comparaison précise entre les années.

Les mesures de terrain incluent trois inventaires. Lors de l'hiver 2023-2024, seuls les chênes cibles T ont été mesurés. L'inventaire de l'hiver 2024-2025 concerne l'ensemble des chênes cibles, tandis que l'inventaire réalisé durant l'hiver 2025-2026 prend en compte la circonférence de chaque arbre (inventaire complet). L'intérêt de cet inventaire complet est de prendre en compte la variabilité des grosseurs selon les essences présentes dans le mélange et d'obtenir une caractérisation plus précise de la structure du peuplement. Le chapitre 7.8. de l'annexe donne des détails techniques sur les mesures.

2.2.1.2 Inventaire des hauteurs

Certaines analyses prennent en compte la hauteur totale des arbres. Celle-ci est obtenue à l'aide d'une relation allométrique spécifique à chaque essence. Dans le projet FORBIO, des mesures de la hauteur totale et de la circonférence à 1,30 m, pour les années 2021 et 2023, sont disponibles pour certains arbres. Ces données servent à établir, pour chaque essence, une relation allométrique entre la hauteur totale et le diamètre à 1,30 m au-dessus du sol. Les allométries sont ainsi calibrées à partir de mesures réalisées directement sur le site.

2.2.2 Caractérisation du voisinage local des chênes cibles

La modélisation de l'accroissement utilise des variables explicatives décrivant certains facteurs écologiques, notamment la compétition du voisinage local exercée sur le chêne cible. Cela implique la mesure de la grosseur des arbres voisins compétiteurs, ainsi que de leur distance et de leur azimut par rapport au chêne cible.

Il faut déterminer au préalable une distance maximale jusqu'à laquelle les arbres voisins sont considérés comme compétiteurs. La méthode considérée pour identifier un voisin comme

compétiteur est adaptée aux différences de vitesses de croissance juvénile des essences avoisinantes (Tableau 2-2). Elle tient compte du fait que, pour une même grosseur et une même distance, chaque essence n'exerce pas le même effet compétitif sur le chêne cible (Canham et al., 2006). Le voisinage local compétitif est ainsi emboîté et défini selon différents rayons en fonction de l'essence voisine (Figure 2.2-1) : 3,5 m pour les feuillus, 5 m pour le douglas et 6,5 m pour le mélèze.

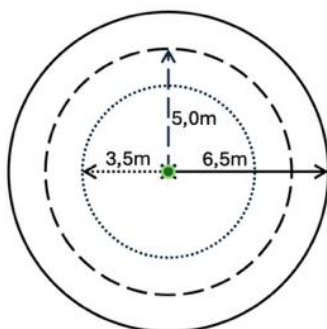


Figure 2.2-1 : Représentation schématique du voisinage compétitif local, dans lequel les arbres voisins sont supposés comme entrant en compétition avec le chêne cible, situé au centre.

Au sein du cercle intérieur (.....), chaque individu est considéré comme compétiteur. À l'intérieur du cercle du milieu (— — —) et du cercle extérieur (—), seuls les douglas et mélèzes sont supposés être des compétiteurs.

La mesure de distance (Figure 2.2-2) est réalisée à l'aide de deux instruments de la marque suédoise Haglöf, en 2025. Il s'agit du Vertex 5 constitué d'un récepteur et d'un transpondeur (Haglöf Sweden, 2021). Chaque arbre tombant dans ce voisinage local emboîté, pour autant qu'il dépasse 1,30 m de hauteur, est considéré comme compétiteur. Sa grosseur est celle mesurée par l'inventaire complet de grosseur de l'hiver 2025-2026.

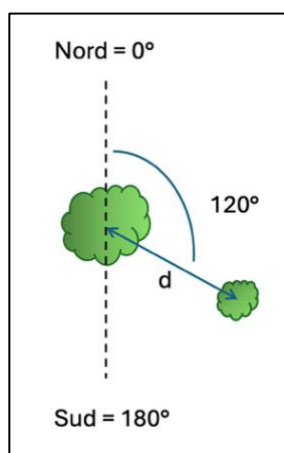


Figure 2.2-2 : Représentation schématique de l'azimut et de la distance par rapport au chêne cible.

Le chêne cible se trouve au milieu de la figure, sur l'axe nord-sud. L'arbre voisin se trouve à un certain azimut par rapport au nord. La distance d correspond à la distance entre le tronc du chêne cible et le du tronc de l'arbre voisin, à 1,30 m au-dessus du sol.

Les mesures d'azimut (Figure 2.2-2) complètent la connaissance de l'emplacement spatial des individus du voisinage local emboîté. Cette mesure est considérée, car un voisin situé au sud du chêne cible peut exercer un effet compétitif plus important qu'un voisin au nord en raison du blocage de la lumière et des rayons photosynthétiquement actifs (Bhandari et al., 2021 ; Boivin, 2010). L'azimut, mesuré à la boussole, aide ainsi à nuancer l'effet compétitif du voisinage. Les azimuts de 0° , 90° , 180° et 270° correspondent respectivement au nord, à l'est, au sud et à l'ouest du chêne cible. Les mesures ont été réalisées en 2025, en même temps que celles des distances.

2.2.3 Mesures de l'éclairement relatif

Puis, une mesure directe de l'accès du chêne cible à la lumière est réalisée à la hauteur de son houppier. La lumière utilisable par les plantes correspond au rayonnement photosynthétiquement actif (PAR ; 400–700 nm) et est exprimée sous forme de densité de flux de photons photosynthétiques (PPFD ; $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) (Baudry et al., 2010). Les mesures ont été réalisées à l'aide de deux capteurs quantiques MQ-200X de la marque *Apogee* (Figure 2.2-3) (Apogee, n.d.). Deux mesures ont été effectuées simultanément, une près du chêne cible, et une en milieu ouvert (Figure annexe 15). Le rapport entre les deux mesures correspond à l'éclairement relatif (ER).

En milieu ouvert, le capteur est fixé à l'extrémité d'un bâton en bois de deux mètres (Figure 2.2-3). Au niveau du chêne cible, une perche télescopique de 10 mètres est utilisée (marque *Aquascopic*). Elle permet d'adapter la hauteur du capteur à la morphologie du houppier. Le capteur, relié par un câble de 10 mètres, est fixé à l'extrémité mobile de la perche.

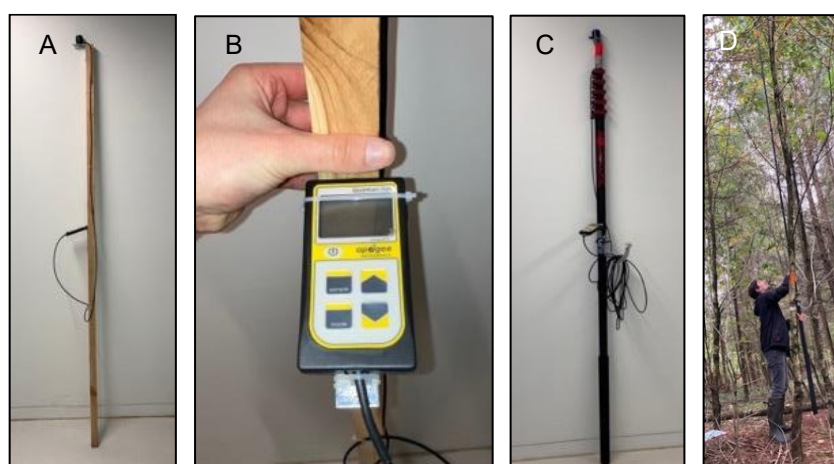


Figure 2.2-3 : Capteur quantique MQ 200X, fixé à l'embout d'un bâton de bois (A) et d'une perche télescopique (C).

L'écran de l'appareil (B) montre la valeur de PPFD au moment de la prise de mesure. Sur place, la perche est montée jusqu'à la hauteur choisie selon la hauteur du chêne cible (D).

Le pied de la perche est placé à deux positions par rapport à l'arbre cible (150° et 210° par rapport à l'axe nord-sud, Figure 2.2-2). Ces positions permettent de décrire l'environnement lumineux de la partie sud du houppier, direction d'où provient la majorité du rayonnement solaire (Bhandari et al., 2021 ; Boivin, 2010).

Le capteur est positionné à la limite du houppier du chêne cible, de manière à émerger légèrement des feuilles. Ainsi, il ne capte pas l'ombre du chêne cible, mais uniquement celle des arbres voisins. La hauteur de mesure est choisie dans une gamme flexible comprise entre 60 et 75 % de la hauteur du houppier. Cette flexibilité est nécessaire, car les houppiers présentent des morphologies variables.

La compétition pour la lumière est la plus intense durant la saison de végétation, lorsque les arbres sont photosynthétiquement actifs. Les mesures ont donc été réalisées en état feuillu, entre septembre et début octobre 2025, lorsque le ciel était couvert de manière homogène. L'éclairement relatif a été mesuré sur 200 chênes, répartis de manière homogène entre les parcelles et les statuts d'éclaircie. Dans chaque parcelle contenant du chêne, cinq chênes de chaque statut ont été mesurés.

2.3 Déterminants de la réponse des chênes à l'éclaircie

2.3.1 Cadre conceptuel

L'analyse de l'accroissement en grosseur des chênes lors d'une saison post-éclaircie, décalée d'un an, est utilisée pour quantifier la réponse à l'éclaircie. Cette réponse est modélisée à l'aide de modèles de croissance (Bhandari et al., 2021 ; Canham et al., 2006 ; Coates et al., 2009 ; Fukumoto et al., 2020 ; Acquah & Marshall, 2020 ; Del Río et al., 2025). Pour distinguer l'effet de l'éclaircie sur l'accroissement des effets liés à d'autres sources de variation, il est nécessaire d'intégrer ces dernières dans les modèles de croissance. Les facteurs pris en compte sont la taille initiale des chênes cibles, la compétition à l'échelle du voisinage local et la concurrence globale à l'échelle de la parcelle.

Avant l'intégration de ces variables dans les modèles de croissance, il est nécessaire de passer en revue les différents facteurs écologiques et de montrer comment ces facteurs sont quantifiés par la présente recherche.

2.3.2 Dimension initiale

La taille initiale, en termes de grosseur, est supposée expliquer en partie la croissance d'un arbre (Zhang et al., 2016 ; Coomes & Allen, 2007) et est ainsi considérée pour les modèles de croissance. L'analyse de la grosseur des chênes cibles permet également de vérifier si les gestionnaires les ont sélectionnés parmi les plus gros chênes. Pour cela, le diamètre moyen des chênes cibles est comparé à la distribution des diamètres de tous les chênes de la parcelle. Le relevé en plein de l'hiver 2025-2026 est utilisé, car c'est le seul inventaire disposant de l'ensemble des grosseurs.

La taille initiale correspondant au diamètre de l'hiver 2024-2025, ce relevé est utilisé pour tester si la différence de diamètre entre les chênes cibles témoins (C) et éclaircis (T) est significative à l'échelle de chaque parcelle. Le diamètre des chênes cibles, mesuré durant l'hiver 2024-2025, est également utilisé pour visualiser la distribution des tailles initiales selon les compositions.

2.3.3 Compétition locale et accès aux ressources

L'environnement local du chêne cible est supposé refléter l'accès actuel aux ressources, notamment à la lumière, et donc la compétition à l'échelle du voisinage local (Figure 2.2-1). À ce titre, il représente probablement une source de variabilité de l'accroissement du chêne cible et peut être retenu pour la modélisation de la croissance (Canham et al., 2006 ; Zhang et al., 2016). Trois indicateurs de compétition locale sont présentés dans ce sous-chapitre.

2.3.3.1 Indice de compétition (NCI)

Une première méthode est l'utilisation d'un indice de compétition dépendant de la distance (*Neighbourhood competition index*, NCI). La présente recherche utilise une version simplifiée de l'indice de Hegyi (Canham et al., 2006). Tout arbre tombant dans le voisinage emboîté décrit précédemment est considéré comme arbre compétiteur.

$$NCI [-] = \sum_{j=1}^n \left(\frac{\sin(\varphi + azimuth) + v + 1}{v + 2} \right) \frac{d_j}{dist_{ij}}$$

Pour n arbres voisins compétiteurs j , l'indice de compétition (NCI) est la somme des indices calculés individuellement pour chaque voisin. Cet indice est calculé comme le rapport entre le diamètre du voisin compétiteur (d_j [mm], mesuré à 1,30 m au-dessus du sol) et la distance ($dist_{ij}$ [mm]) le séparant du chêne cible. L'azimut est intégré pour donner plus de poids aux

arbres situés au sud du chêne cible (Boivin, 2010). Ainsi, l'indice (NCI), qui reflète plutôt la compétition souterraine selon Canham et al. (2006), intègre également une composante de la compétition pour la lumière. La phase ϕ est choisie à $-\pi/2$ pour donner l'effet le plus faible au nord du chêne cible (0°) et le plus fort au sud du chêne cible (180°). La fonction sinus vaut alors 1 au sud et -1 au nord. Le paramètre v a été fixé préalablement à 2, en testant plusieurs valeurs et en sélectionnant celle donnant la meilleure prédiction de l'accroissement. De cette manière, un arbre voisin au sud (180°) a un poids de 1, tandis qu'un arbre voisin au nord (0°) a un poids de 0,5. L'azimut doit être transformé de degrés ($^\circ$) en radians. Les mesures de l'inventaire en plein de l'hiver 2025-2026 sont utilisées pour ces calculs.

2.3.3.2 Éclairement relatif au niveau du houppier du chêne cible

Une deuxième possibilité consiste à utiliser l'éclairement relatif (ER), mesuré à l'échelle du chêne cible. L'éclairement relatif est pris en compte, car il reflète directement la ressource lumineuse à hauteur du houppier (Baudry et al., 2013). Comme décrit précédemment, deux mesures d'éclairement relatif sont réalisées par chêne cible. La moyenne arithmétique est utilisée comme indicateur de compétition du voisinage local.

$$ER [-] = \frac{ER_{150^\circ} + ER_{210^\circ}}{2}$$

2.3.3.3 Hauteur relative du chêne cible par rapport au voisinage local

Un troisième indicateur consiste à utiliser la hauteur relative du chêne cible par rapport à la hauteur moyenne des arbres du voisinage local emboîté ($H_{relative_voisinage}$). L'indicateur est calculé comme la hauteur totale (h_i) du chêne cible i rapportée à la hauteur moyenne de Lorey des voisins ($H_{moyenne_voisinage}$). Cette dernière pondère la hauteur totale des voisins (h_j) par leur surface terrière individuelle (g_j), accordant davantage de poids aux arbres plus gros (Rondeux, 2021).

$$H_{relative_voisinage} [-] = \frac{h_i}{H_{moyenne_voisinage}} \text{ avec } H_{moyenne_voisinage} = \frac{\sum_{j=1}^n g_j h_j}{g_{voisinage_local}} [m]$$

La pondération permet de refléter le caractère dominant des gros individus dans le voisinage. Ainsi, l'indicateur ($H_{relative_voisinage}$) est supposé refléter l'accès à la lumière. La pondération prend en compte la surface terrière absolue du voisinage local emboîté ($g_{voisinage_local}$ [m^2]), déterminée à partir de l'inventaire en plein de l'hiver 2025-2026.

2.3.4 Composition et concurrence globale à l'échelle de la parcelle

Trois manières sont prises en compte pour décrire l'effet de la composition. D'abord, une variable catégorielle est considérée pour représenter la composition spécifique, selon les essences présentes. Ce choix est adapté, car la composition correspond à des groupes discrets et bien définis (Tableau 2-3). Chaque combinaison d'essences influence différemment la structure et la croissance, ce qui justifie l'utilisation de niveaux distincts. En prenant la monoculture de chêne comme référence, il est possible de comparer l'effet des autres compositions sur la variable étudiée.

La composition affecte la concurrence globale à l'échelle de la parcelle. Contrairement aux indicateurs de l'environnement local, chaque chêne cible d'une même parcelle partage la même valeur de l'indicateur de concurrence globale. L'utilisation de variables continues plutôt que catégorielles permet de mieux prendre en compte la structure des compositions et de réduire le nombre de paramètres des modèles. Cinq indicateurs de concurrence globale sont utilisés, dont quatre basés sur la surface terrière et un sur la hauteur.

Les indicateurs basés sur la surface terrière sont calculés à partir du relevé en plein de l'hiver 2025-2026. Ces indicateurs reposent sur les sommes des surfaces terrières individuelles

(Tableau 2-4). La surface terrière individuelle est calculée à l'aide de la circonférence à 1,30 m au-dessus du sol, selon la formule de la surface d'un cercle (Rondeux, 2021).

L'indicateur utilisant les hauteurs repose sur l'allométrie basée sur les mesures de 2021 et 2023. Les hauteurs totales actuelles (H) sont estimées à partir du diamètre actuel à 1,30 m (d130), mesuré lors de l'inventaire en plein de l'hiver 2025-2026. La méthode choisie est une relation de puissance (Dhôte & Hercé, 1994), modélisée sous forme logarithmique.

$$\ln(H) = \ln(a) + b * \ln(d130)$$

$$H = a * d130^b * CF$$

Les paramètres empiriques *a* et *b* sont estimés par le modèle statistique. Le passage de la version logarithmique à la forme puissance nécessite l'application d'un facteur de correction CF pour tenir compte du biais de transformation, afin de ne pas sous-estimer la hauteur totale réelle des arbres (Forrester et al., 2017). Le Tableau annexe 3 présente, par essence, les valeurs chiffrées des paramètres *a* et *b*, des facteurs de correction CF, ainsi que les R² des allométries.

Tableau 2-4 : Calcul des indicateurs de concurrence globale basés sur la surface terrière et la hauteur

Indicateur de concurrence globale (échelle parcelle)	Calcul
Surface terrière totale (G_{parcelle} , [m ² /ha])	$G_{\text{parcelle}} [\text{m}^2/\text{ha}] = \frac{\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^{n_i} g_{ij}}{A} = \frac{G_{\text{parcelle absolue}}}{A}$ Somme des surfaces terrières individuelles (g_{ij} [m²]) des arbres <i>j</i> appartenant aux <i>s</i> essences de la parcelle. <i>A</i> [ha] correspond à la surface de la parcelle et permet de rapporter la surface terrière absolue ($G_{\text{parcelle absolue}}$) à l'échelle de l'hectare.
Surface terrière relative de chêne (% $G_{\text{relative_quercus}}$, [-])	$\%G_{\text{relative quercus}} [-] = \frac{G_{\text{Quercus}}}{G_{\text{parcelle absolue}}}$ G_{Quercus} [m²] correspond à la somme des surfaces terrières individuelles (g_j [m²]) de tous les chênes <i>j</i> présents dans la parcelle.
Surface terrière relative de résineux (% $G_{\text{relative_resineux}}$, [-])	$\%G_{\text{relative resinoux}} [-] = \frac{G_{\text{résineux}}}{G_{\text{parcelle absolue}}}$ $G_{\text{résineux}}$ [m²] correspond à la somme des surfaces terrières individuelles (g_j [m²]) des mélèzes et des douglas présents dans la parcelle.
Surface terrière relative d'essences intolérantes à l'ombrage (% $G_{\text{relative_intol}}$, [-])	$\%G_{\text{relative intol}} [-] = \frac{G_{\text{intol}}}{G_{\text{parcelle absolue}}}$ G_{intol} [m²] correspond à la somme des surfaces terrières individuelles (g_j [m²]) des chênes, des mélèzes et des douglas présentes dans la parcelle.

Tableau 2-4 - suite

Hauteur moyenne relative des chênes ($H_{relative_parcelle}$, [-])	$H_{relative\ parcelle} [-] = \frac{H_{moyenne\ Quercus}}{H_{moyenne\ parcelle}}$ Rapport entre deux hauteurs moyennes de Lorey - Pour les chênes uniquement : $H_{moyenne\ Quercus} [m] = \frac{\sum_{j=1}^n g_j h_j}{G_{Quercus}}$ Moyenne des hauteurs totales individuelles (h_j [m]) pondérée par les surfaces terrières individuelles (g_j [m²]) pour l'ensemble des chênes de la parcelle. - Pour toutes les essences i de la parcelle : $H_{moyenne\ parcelle} [m] = \frac{\sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^{n_i} g_{ij} h_{ij}}{G_{parcelle\ absolue}}$ Moyenne des hauteurs totales individuelles (h_{ij} [m]) pondérée par les surfaces terrières individuelles (g_{ij} [m²]) pour l'ensemble des arbres de la parcelle.
---	--

La surface terrière totale de la parcelle ($G_{parcelle}$, Tableau 2-4), étant une mesure de la densité, est supposée bien refléter la concurrence globale subie par les chênes cibles (Prevosto, 2005). Les différences de croissance juvénile entre les essences peuvent conduire à des densités différentes selon les compositions.

Les trois surfaces terrières relatives apportent des nuances supplémentaires. La contribution des chênes à la surface terrière ($\%G_{relative_quercus}$, Tableau 2-4) intègre à la fois la composition et la richesse spécifique. La contribution des essences résineuses ($\%G_{relative_resineux}$, Tableau 2-4) intègre davantage la structure verticale, le mélèze et le douglas étant les essences à croissance juvénile les plus importantes et ainsi les plus hautes. La part d'essences intolérantes à l'ombrage ($\%G_{relative_intol}$, Tableau 2-4) prend en compte l'opacité des houppiers, les essences intolérantes à l'ombrage présentant des houppiers moins denses (Tableau 2-2).

Le dernier indicateur du Tableau 2-4, $H_{relative_parcelle}$, étant une mesure de la structure verticale, est supposé bien refléter la concurrence globale subie par les chênes cibles. La pondération permet de bien considérer le caractère dominant de la composition.

La troisième méthode s'intéresse au diamètre moyen des chênes cibles, témoins et éclaircis confondus, à l'échelle d'une parcelle. À espèce, site et âge fixés, le diamètre moyen est supposé refléter la compétition cumulée dans le temps et dans l'espace et est donc potentiellement utile pour décrire l'effet de la compétition.

2.3.5 Caractérisation de l'éclaircie

L'effet de l'éclaircie implique une réduction de la compétition locale et donc un accès accru des arbres éclaircis aux ressources. Par conséquent, il est supposé favoriser la croissance de l'arbre cible (Del Río et al., 2025 ; Fukumoto et al., 2020 ; Ulbricht et al., 2026). Le matériel enlevé lors de l'éclaircie a été documenté par l'équipe technique en 2024. La grosseur de chaque compétiteur coupé (maximum deux) est donc connue pour chaque chêne cible éclairci.

L'éclaircie a été réalisée selon l'approche par arbre cible. Les chênes étant éclaircis en fonction de leur compétition locale et leur besoin individuel, la réduction de compétition n'est pas identique pour tous. Une différence d'accroissement entre deux chênes peut ainsi être liée à une différence de l'impact de l'éclaircie sur la compétition locale. La composition étant susceptible d'influencer le voisinage local, elle peut également conduire à des réductions de

compétition différentes entre chênes cibles éclaircis. Il est donc nécessaire de caractériser l'éclaircie réalisée dans les différentes parcelles.

Les éclaircies peuvent être caractérisées qualitativement (nature d'éclaircie) et quantitativement (matériel enlevé en absolu ou en intensité) (Gebhardt, 2017). Les analyses reposent sur les mesures des arbres enlevés lors de l'éclaircie de 2024 ainsi que sur le relevé en plein de l'hiver 2025-2026.

Les indicateurs de l'éclaircie peuvent être décrits à l'échelle locale et globale. Ils sont d'abord décrits à l'échelle locale du chêne cible éclairci (T). Les chênes cibles témoin (C) sont exclus de ces indicateurs. L'idée est de quantifier plusieurs indicateurs décrivant différentes dimensions.

Tableau 2-5 : Calcul et détails des indicateurs de l'éclaircie, à échelle locale.

Indicateur de l'éclaircie, niveau voisinage local	Calcul
Nature de l'éclaircie (Nature _{locale} , [-])	$Nature_{locale} = \frac{g_{moyenne\ enlevée}}{g_{chêne\ cible}}$ $g_{moyenne\ enlevée} [m^2]$ correspond à la moyenne arithmétique des surfaces terrières individuelles (g_j) des arbres enlevés autour du chêne cible éclairci (T) (maximum deux arbres). Lorsqu'un seul arbre est enlevé, $g_{moyenne\ enlevée} [m^2]$ est égale à la surface terrière individuelle de cet arbre voisin. $g_{chêne\ cible} [m^2]$ correspond à la surface terrière individuelle du chêne cible éclairci (T), mesurée lors de l'hiver 2023-2024.
Surface terrière enlevée par l'éclaircie (g _{enlevée_voisinage_local} , [m ²])	$g_{enlevée\ voisinage\ local} [m^2]$ correspond à la somme des surfaces terrières individuelles (g_j) des arbres enlevés autour du chêne cible éclairci (T). Lorsqu'un seul arbre est enlevé, l'indicateur est égal à sa surface terrière individuelle.
Intensité locale de l'éclaircie, en surface terrière (I _{g_local} , [-])	$I_{g\ local} [-] = \frac{g_{enlevée\ voisinage\ local}}{g_{voisinage\ local\ avant}} = \frac{g_{enlevée\ voisinage\ local}}{g_{enlevée\ voisinage\ local} + g_{voisinage\ local\ après}}$ $g_{voisinage\ local\ avant} [m^2]$ correspond à la surface terrière du voisinage local, avant l'éclaircie $g_{voisinage\ local\ après} [m^2]$ correspond à la surface terrière du voisinage local mesuré après l'éclaircie, lors de l'inventaire en plein de l'hiver 2025-2026 (l'accroissement depuis l'éclaircie en février 2024 est négligé).

Il s'agit, à l'exception de la nature de l'éclaircie (Nature_{locale}), d'indicateurs quantitatifs du matériel enlevé lors de l'intervention. La nature de l'éclaircie indique si les arbres voisins coupés sont de grosseur plus importante, équivalente ou plus faible. L'indicateur renseigne ainsi indirectement sur le caractère plus ou moins libérant de l'intervention pour l'accès à la lumière. La surface terrière enlevée ($g_{enlevée\ voisinage\ local}$) décrit le matériel retiré en valeur absolue. L'intensité (I_{g_local}) reflète davantage le changement relatif induit par l'éclaircie par rapport à la situation initiale et donc la réduction de compétition locale subie par le chêne cible. Les indicateurs quantitatifs et qualitatifs permettent ainsi de documenter les éclaircies au sein de la parcelle et puis entre les types de peuplements.

Des indicateurs d'éclaircie globale sont également calculés à l'échelle de la parcelle. À cette échelle, aucune distinction n'est faite entre les essences cibles et l'ensemble du matériel

enlevé est pris en compte. Cela répond à deux objectifs. D'une part, dans les peuplements mélangés, un chêne cible peut bénéficier de la coupe d'un arbre réalisée au profit d'un arbre cible d'une autre essence. D'autre part, cette approche permet de comparer l'effet global de l'éclaircie entre différents types de peuplements, sans se limiter à une essence particulière.

Tableau 2-6 : Calcul et détails des indicateurs de l'éclaircie, à échelle de la parcelle

Indicateur de l'éclaircie, niveau parcelle	Calcul
Nature de l'éclaircie (Nature _{parcelle} , [-])	$Nature_{parcelle} [-] = \frac{g_{moyenne\ enlevée\ parcelle}}{g_{moyenne\ chêne\ T}}$ $g_{enlevée\ moyenne\ parcelle} [m^2]$ correspond à la moyenne arithmétique de toutes les surfaces terrières individuelles (g_j) des arbres enlevés dans une parcelle. $g_{moyenne\ chêne\ T} [m^2]$ correspond à la surface terrière moyenne des chênes cibles éclaircis (T), de l'hiver 2023-2024.
Surface terrière enlevée par l'éclaircie (g _{enlevée_parcelle} , [m ² /ha])	$g_{enlevée\ parcelle} [m^2/ha]$ correspond à la somme de la surface terrière individuelle (g_j) de tous les arbres enlevés, ramené à l'hectare
Intensité de l'éclaircie en surface terrière (I _{g_parcelle} , [-])	$I_{g\ parcelle} [-] = \frac{g_{enlevée\ parcelle}}{G_{parcelle} + g_{enlevée\ parcelle}}$ $G_{parcelle} [m^2/ha]$ correspond à la somme des surfaces terrières individuelles (g_j) de chaque arbre de la parcelle, ramené à l'hectare (Tableau 2-5).

Les indicateurs globaux de l'éclaircie sont donc les mêmes que pour la caractérisation de l'éclaircie locale, mais sont calculés à l'échelle de la parcelle (Tableau 2-6). La surface terrière enlevée (g_{enlevée_parcelle}) est ramenée à l'hectare, les parcelles du bloc Gouverneurs n'ayant pas toutes la même surface.

2.4 Traitement statistique

La recherche utilise à de nombreuses étapes des tests statistiques. Ces derniers sont tous réalisés en RStudio (version 4.5.0). Le langage de programmation R présente une multitude d'outils fiables et souvent utilisés dans les recherches scientifiques. Les packages *lme4* et *stats* sont utilisés avec les fonctions *lmer* et *lm* respectivement. Les fonctions *lmer* et *lm* sont utilisées respectivement pour les modèles mixtes et modèles à effets fixes. Dans le cas des modèles linéaires mixtes, les modèles sont estimés par maximum de vraisemblance lors des comparaisons entre modèles, puis par maximum de vraisemblance restreint pour l'estimation finale des paramètres. La comparaison de modèles est faite avec l'Akaike Information Criterion (AIC). Le R² est considéré à titre indicatif.

Le sortie (fonction summary) des modèles fournit les coefficients associés à chaque variable explicative en question. Dans le cas des modèles simples à effets fixes, la signification statistique des variables explicatives est évaluée grâce à une analyse de variance (anova) de type I. Il s'agit d'un test de type III dans le cas des modèles mixtes ainsi que dans le cas de modèles avec des interactions. Les p-valeurs (p) sont utilisées pour déterminer si l'effet estimé d'une variable est significatif dans le modèle.

Pour certains modèles, des tests post-hoc sont réalisés, avec la fonction *emmeans* du package *emmeans*. Dans la comparaison par paires, une correction de *Tukey* est prise en compte. Cela

permet d'interpréter les moyennes ajustées selon le modèle et de déterminer entre quelles paires l'effet testé diffère significativement.

Lorsque l'analyse est à l'échelle de l'arbre individuel, les modèles prennent en compte un effet aléatoire de la parcelle, lié à la structure du jeu de données. Cela intègre le fait que deux arbres au sein d'une parcelle sont supposés être non indépendants. Les données sont également réparties entre deux blocs. Ne présentant que deux niveaux, l'effet du bloc est mal adapté à un effet aléatoire. Il est donc considéré comme effet fixe. Lorsqu'il n'apporte pas de variance expliquée, le bloc est retiré du modèle. Il en est de même pour l'effet aléatoire de la parcelle. Dans ce cas, le modèle mixte (fonction *lmer*) est simplifié dans un modèle à effet fixe uniquement (fonction *lm*).

Des corrélations sont testées avec la fonction *cor.test* du package *stats*.

2.4.1 Analyses exploratoires

Les facteurs présentés précédemment sont susceptibles d'influencer la croissance des chênes cibles. Cette partie est consacrée à une exploration préalable des variables explicatives avant la modélisation de l'accroissement.

2.4.1.1 Comparaison de variables caractérisant un même facteur écologique

Différentes variables supposées décrire un même facteur écologique sont comparées afin d'évaluer dans quelle mesure elles décrivent un même effet écologique. Ceci permet de déterminer si elles sont redondantes ou complémentaires. La comparaison implique une analyse de corrélation ainsi que des modèles statistiques.

Pour la compétition locale, les relations entre l'indice de compétition (NCI), l'éclairement relatif (ER) et la hauteur relative des chênes cibles ($H_{\text{relative_voisinage}}$) sont étudiées. Des modèles mixtes incluant la composition (variable catégorielle) et son interaction avec l'indicateur permettent d'évaluer si ces relations varient selon les compositions.

Pour la concurrence globale, les corrélations entre les différents indicateurs sont analysées, avec une attention particulière portée à la relation entre la surface terrière totale de la parcelle (G_{parcelle}) et la hauteur moyenne relative des chênes ($H_{\text{relative_parcelle}}$). Cette relation est étudiée à l'aide d'un modèle linéaire simple.

Dans les deux cas, les relations entre indicateurs sont visualisées à l'aide des droites prédites par les modèles ajustés.

2.4.1.2 Relations entre la composition et les variables explicatives de la croissance (taille initiale, éclaircie, compétition locale, concurrence globale)

Les relations entre les variables représentant différents facteurs écologiques sont étudiées afin d'évaluer, d'une part, l'effet de la composition sur ces variables et, d'autre part, les liens entre elles. L'objectif est d'identifier des variables décrivant des effets écologiques distincts, afin de sélectionner les variables les plus pertinentes pour les modèles de croissance et d'en faciliter l'interprétation écologique.

Ces variables explicatives sont soit calculées à l'échelle locale du chêne cible (diamètre initial du chêne cible, NCI, ER, $H_{\text{relative_voisinage}}$, $\text{Nature}_{\text{locale}}$, $\text{Nature}_{\text{parcelle}}$, $G_{\text{enlevée_voisinage_local}}$, $G_{\text{enlevée_parcelle}}$, $I_{\text{g_local}}$, $I_{\text{g_parcelle}}$), soit calculées à l'échelle de la parcelle (diamètre initial moyen des chênes cibles, G_{parcelle} , $\%G_{\text{relative_quercus}}$, $\%G_{\text{relative_resineux}}$, $\%G_{\text{relative_intol}}$, $H_{\text{relative_parcelle}}$). Pour les variables calculées à l'échelle locale, la composition est représentée par la variable catégorielle ainsi que par les indicateurs de concurrence globale à l'aide de modèles mixtes. Pour les variables mesurées à l'échelle de la parcelle, seules les relations avec la variable catégorielle sont étudiées. Dans ce cas, des modèles linéaires simples sont utilisés, puisque les valeurs sont définies à l'échelle de la parcelle. Dans tous les cas, l'effet du bloc est contrôlé.

La parcelle est prise en compte comme effet aléatoire, mais retirée lorsqu'elle n'apporte pas d'explication de variabilité.

Dans les modèles intégrant la variable catégorielle, des tests post-hoc sont réalisés afin d'identifier les compositions présentant des différences significatives.

Les relations entre ces variables explicatives de la croissance et la variable catégorielle sont visualisées à l'aide des moyennes ajustées estimées par les modèles ainsi que de leurs intervalles de confiance à 95 %. Les relations avec les indicateurs de concurrence globale sont quant à elles visualisées à l'aide des droites prédites par les modèles, sur la base des valeurs moyennes observées à l'échelle des parcelles.

2.4.1.3 Impact de l'éclaircie sur la compétition locale du chêne cible

Des modèles mixtes sont utilisés afin d'évaluer l'effet de l'éclaircie sur ces indicateurs. Une interaction entre l'éclaircie et la variable catégorielle représentant la composition est également intégrée afin de déterminer si cet effet varie selon les compositions.

Dans un premier temps, l'éclaircie est représentée par une variable binaire distinguant les chênes cibles témoins (C) et éclaircis (T), afin de déterminer si ces deux groupes présentent des niveaux de compétition locale différents. Des tests post-hoc sont ensuite réalisés afin d'identifier les compositions présentant des différences significatives.

Dans un second temps, l'éclaircie est représentée par son intensité locale (I_{g_local}), afin d'évaluer si l'importance de la réduction du matériel sur pied est associée au niveau de compétition locale observé.

2.4.2 Modélisation de la croissance individuelle en grosseur

La modélisation porte sur l'accroissement annuel durant la saison de croissance 2025 et intègre différents facteurs écologiques. Les modèles décrits dans cette section visent à quantifier l'accroissement des chênes cibles et à évaluer la réponse à l'éclaircie, en estimant l'effet propre de cette intervention tout en contrôlant les autres sources de variabilité influençant la croissance.

2.4.2.1 Modèle de croissance de référence

L'accroissement en grosseur peut être modélisé suivant différentes grandeurs physiques, comme le diamètre (ou la circonférence) (Bhandari et al., 2021; Canham et al., 2006; Coates et al., 2009; Fukumoto et al., 2020), la surface terrière individuelle (Acquah & Marshall, 2020 ; Del Río et al., 2025), ou encore le volume (Engel et al., 2021 ; Stimm et al., 2022). La surface terrière est mathématiquement plus complexe à modéliser que le diamètre, puisqu'elle dépend à la fois du diamètre initial et de son accroissement. Quant au volume, son estimation est généralement moins précise, car elle repose sur des relations allométriques. Le choix est donc d'utiliser le diamètre comme variable réponse. Cela permet à la fois une simplification mathématique et une interprétation écologique intuitive.

L'accroissement annuel est considéré comme un accroissement absolu en diamètre, exprimé en millimètres (mm). Il s'agit d'une variable réponse intuitive à interpréter écologiquement, contrairement à l'accroissement relatif, qui exprime une variation proportionnelle. Le modèle estime ainsi une valeur directement comparable entre arbres éclaircis et témoins ainsi qu'entre différentes compositions. L'accroissement annuel correspond à la différence entre le diamètre final et le diamètre initial du chêne cible, par rapport à la saison de croissance 2025. Le calcul du diamètre utilise les circonférences des inventaires de grosseur de l'hiver 2024-2025 et 2025-2026 (Rondeux, 2021). Un trait de peinture a permis de prendre la mesure à la même hauteur.

$$accroissement[mm] = \frac{circonférence_{hiver\ 2025/26}}{\pi} - \frac{circonférence_{hiver\ 2024/25}}{\pi}$$

Le modèle de croissance de référence est un modèle linéaire mixte additif. Il combine des effets fixes et des effets aléatoires afin de prendre en compte une partie de la variabilité non expliquée liée à la structure du jeu de données. Le modèle de croissance de référence inclut les différentes variables explicatives représentant les facteurs écologiques étudiés (taille initiale, compétition locale, éclaircie, composition), ainsi que l'effet du bloc (Gouverneurs et Gribelle). La parcelle est considérée comme effet aléatoire, noté u . L'erreur résiduelle est notée ε .

$$Y[mm] = \beta_0 + \beta_1 \times \text{taille initiale} + \beta_2 \times \text{compétition locale} + \beta_3 \times \text{éclaircie} + \beta_4 \times \text{composition} + \beta_5 \times \text{éclaircie} \times \text{composition} + \beta_6 \times \text{bloc} + u + \varepsilon$$

L'objectif de la recherche n'est pas seulement de quantifier l'effet de l'éclaircie sur les chênes cibles, mais également de comprendre si les chênes répondent différemment à l'éclaircie selon la composition dans laquelle ils se trouvent. Pour y répondre, l'interaction entre l'effet de l'éclaircie et de la composition est intégrée dans le modèle de croissance (Del Río et al., 2025 ; Ulbricht et al., 2026).

2.4.2.2 Stratégie de modélisation

En raison de la relation attendue entre la taille initiale, la compétition du voisinage local et la composition, une relativisation à l'échelle de la parcelle est appliquée. Pour la taille initiale, le diamètre de chaque chêne cible est divisé par le diamètre moyen des chênes cibles (C et T) de la parcelle correspondante. De manière analogue, l'indice de compétition locale est rapporté à la valeur moyenne de cet indicateur au sein de la parcelle. Cette approche vise à réduire la dépendance de ces variables vis-à-vis de la composition en les exprimant relativement au contexte moyen de la parcelle. Elle permet également de caractériser la position relative d'un chêne cible au sein de la parcelle, tant pour sa taille que pour le niveau de compétition locale qu'il subit. Une approche similaire est utilisée par Ulbricht et al. (2026). Les variables présentant une corrélation trop forte entre elles ne sont pas conservées simultanément dans les modèles de croissance. Dans ce cas, la variable jugée la plus pertinente sur les plans écologique et statistique est retenue.

Les variables liées à la taille initiale, à la composition, à la compétition locale et à l'intensité de l'éclaircie (I_{g_local}) sont centrées sur la moyenne de l'ensemble du jeu de données afin de faciliter l'interprétation écologique des modèles. Dans le cas de l'effet de la taille initiale et de la compétition locale, le centrage est réalisé sur la base des variables de taille et de compétition locale relativisées. Le centrage est réalisé en soustrayant la moyenne globale à chaque valeur individuelle. Une valeur égale à zéro correspond ainsi à la moyenne observée dans le jeu de données. L'intercept représente alors l'accroissement attendu pour un chêne cible présentant des conditions moyennes de taille, de compétition et de composition. Cette interprétation est écologiquement plus pertinente qu'une situation où toutes les variables seraient égales à zéro, condition non observée sur le terrain.

L'éclaircie est d'abord considérée comme une variable binaire distinguant les chênes cibles témoins (C = 0) des chênes cibles éclaircis (T = 1). Dans un second temps, l'objectif est d'utiliser une variable décrivant le degré de modification de la situation de compétition autour du chêne cible. L'intensité locale d'éclaircie (I_{g_local} , Tableau 2-5), correspondant à la surface terrière enlevée dans le voisinage local par rapport à la surface terrière avant intervention, est utilisée à cette fin. Ces deux manières de tenir compte de l'éclaircie sont fréquemment rencontrées dans la littérature (Del Río et al., 2025 ; Ulbricht et al., 2026). La variable binaire permet de tester l'effet du statut d'éclaircie, alors que l'intensité (I_{g_local}) permet d'en évaluer l'effet en fonction de l'intensité de la réduction de la compétition locale. Ainsi, à partir d'un même modèle de croissance de référence, deux approches de modélisation sont développées. La première utilise l'ensemble des chênes cibles (modèle binaire de l'éclaircie),

tandis que la seconde, qui utilise l'intensité locale d'éclaircie comme variable continue, est limitée aux chênes éclaircis (T) (modèle d'intensité de l'éclaircie).

2.4.2.3 Critères de sélection des modèles

Pour les facteurs écologiques liés à la composition et à la compétition du voisinage local, plusieurs variables explicatives potentielles de l'accroissement sont considérées. Cela conduit à un grand nombre de combinaisons possibles dans les modèles de croissance des deux approches retenues pour représenter l'effet de l'éclaircie. Afin de limiter le nombre de variables utilisées dans les modèles de croissance, une seule variable est retenue par facteur écologique. Une étape préalable consiste donc à sélectionner les variables les plus pertinentes pour chacun de ces facteurs écologiques. À cette étape, les variables ne sont pas encore centrées.

Pour la composition, les variables candidates comprennent la variable catégorielle représentant la composition, les cinq indicateurs de concurrence globale ainsi que le diamètre moyen des chênes cibles. Pour le facteur de la compétition du voisinage local, les variables candidates sont l'indice de compétition (NCI, relativisé), l'éclairement relatif (ER, relativisé) et la hauteur relative des chênes cibles par rapport à leur voisinage local ($H_{\text{relative_voisinage}}$, relativisé). Une fois les variables retenues, elles sont centrées.

La sélection est réalisée à l'aide de modèles statistiques dans lesquels chaque variable candidate est testée séparément comme variable explicative de l'accroissement. Les variables retenues sont celles présentant les meilleures performances prédictives, selon l'AIC. Lorsque plusieurs variables d'un même facteur présentent des performances comparables, elles sont toutes conservées. Le processus de sélection est réalisé séparément pour les deux approches utilisées pour prendre en compte l'effet de l'éclaircie.

3 Résultats

Ce chapitre présente d'abord des analyses exploratoires des déterminants potentiels de la croissance des chênes cibles, à savoir la taille initiale, l'éclaircie, la compétition à l'échelle du voisinage local et la concurrence à l'échelle de la parcelle. Ces résultats servent ensuite de base à la construction et à la comparaison des modèles de croissance.

3.1 Taille initiale des chênes cibles

3.1.1 Sélection des chênes cibles dans la population des chênes

Les chênes cibles figurent en moyenne parmi les plus gros chênes de chaque parcelle (Figure 3.1-1). À Gribelle, pour chaque composition, le diamètre moyen des chênes cibles se situe au-dessus de la médiane de la distribution et dépasse généralement le troisième quartile, indiquant qu'ils sont en moyenne plus gros qu'environ 75 % des chênes de la parcelle. Cette tendance est également observable à Gouverneurs, malgré quelques exceptions. Toutefois, les moyennes des chênes cibles restent toujours supérieures à la médiane de la distribution des diamètres.

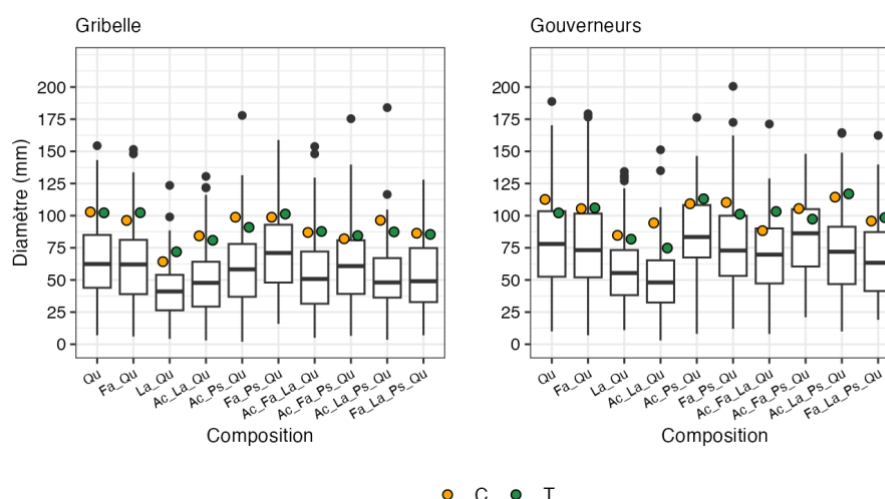


Figure 3.1-1 : Distribution des diamètres de tous les chênes d'une parcelle et les moyennes des chênes cibles témoins (C) et éclaircis (T), selon les compositions et les blocs (Gribelle et Gouverneurs).

La position par rapport à la distribution montre si les gestionnaires ont sélectionné les chênes cibles parmi les plus gros chênes de la parcelle.

Dans les deux blocs, la position sociale des chênes cibles parmi tous les chênes varie selon les parcelles, certaines moyennes se situant près du maximum observé dans les boxplots. Les chênes cibles de Gouverneurs présentent des diamètres moyens plus élevés que ceux de Gribelle ($p < 0,0001$). Par ailleurs, des différences de diamètre entre les chênes cibles témoins (C) et éclaircis (T) apparaissent dans certaines parcelles, particulièrement à Gouverneurs. Toutefois, les tests statistiques montrent qu'aucune de ces différences n'est significative.

3.1.2 Dimensions initiales des chênes cibles

Les distributions des diamètres initiaux de l'hiver 2024-2025 varient visiblement selon les compositions (Figure 3.1-2). Des tendances similaires sont observées dans les deux blocs. La composition présente un effet global significatif sur le diamètre initial des chênes cibles ($p < 0,001$). Selon le test post-hoc, après contrôle de l'effet du bloc, les diamètres initiaux moyens des chênes de la monoculture (Qu) diffèrent significativement de ceux observés dans les mélanges La_Qu ($p < 0,0001$) et Ac_La_Qu ($p = 0,0016$) (Figure 3.1-3).

De manière générale, les chênes cibles présentent des diamètres initiaux plus élevés à Gouverneurs qu'à Gribelle ($p < 0,0001$), ce qui est également visible à travers les médianes observées (Figure 3.1-2).

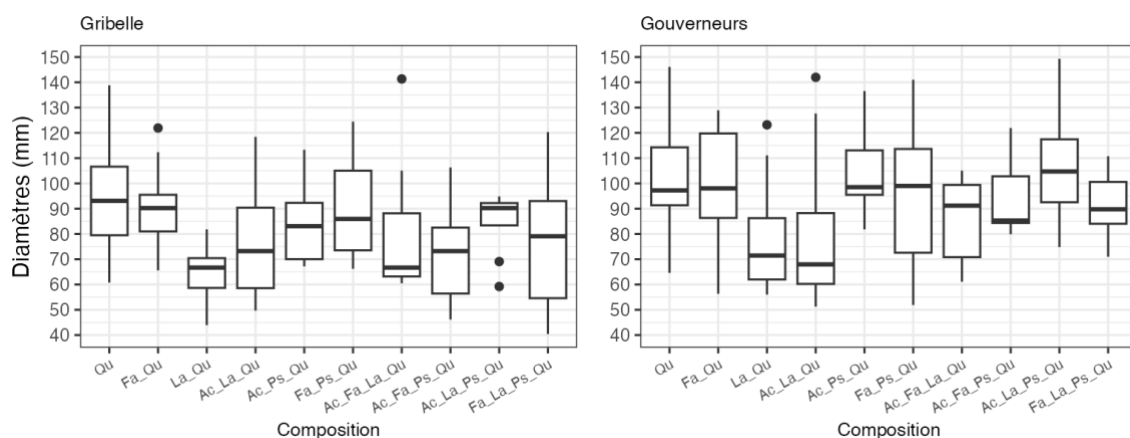


Figure 3.1-2 : Distribution des diamètres initiaux (hiver 2024-2025) des chênes cibles (C et T confondus), selon les compositions et les blocs (Gribelle et Gouverneurs).

Les chênes cibles des monocultures (Qu) ont des diamètres moyens parmi les plus élevées (environ 95 mm), tandis que les mélanges La_Qu présentent des chênes cibles de plus faibles diamètres (environ 70 mm) (Figure 3.1-2).

La taille initiale est la plus élevée dans la monoculture (Qu), avec une moyenne ajustée par le modèle de 97 mm (Figure 3.1-3). Les chênes cibles ont les diamètres les plus faibles dans les mélanges avec le mélèze, notamment La_Qu (71 mm) et Ac_La_Qu (78 mm). Les intervalles de confiance à 95 % indiquent la gamme de valeurs plausibles de la moyenne réelle estimée.

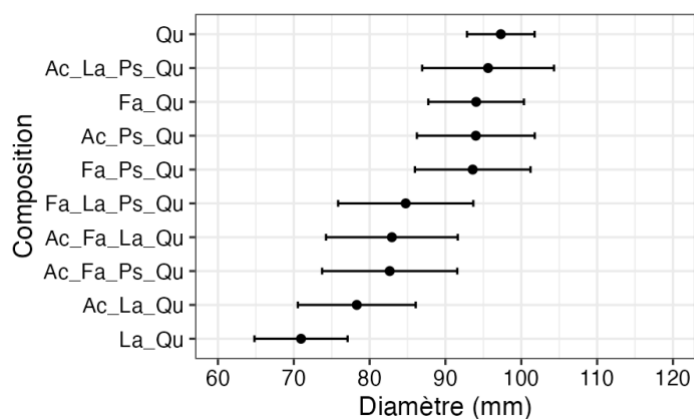


Figure 3.1-3 : Moyennes ajustées (en ordre décroissant) des diamètres initiaux des chênes cibles avec l'intervalle de confiance de 95%, selon les compositions (l'effet du bloc étant contrôlé).

3.2 Caractérisation de l'éclaircie

3.2.1 Caractérisation de l'éclaircie locale à l'échelle du chêne cible

3.2.1.1 Nature de l'éclaircie à l'échelle du chêne cible

La nature de l'éclaircie ($Nature_{locale}$) décrit qualitativement la manière dont l'éclaircie a été réalisée. Dans certains cas, les valeurs de cet indicateur sont très dispersées (surtout La_Qu). Dans certaines compositions, dont la monoculture de chêne (Qu), Fa_Qu, Fa_Ps_Qu et Ac_Ps_Qu, l'indicateur est proche de 1 (Figure 3.2-1).

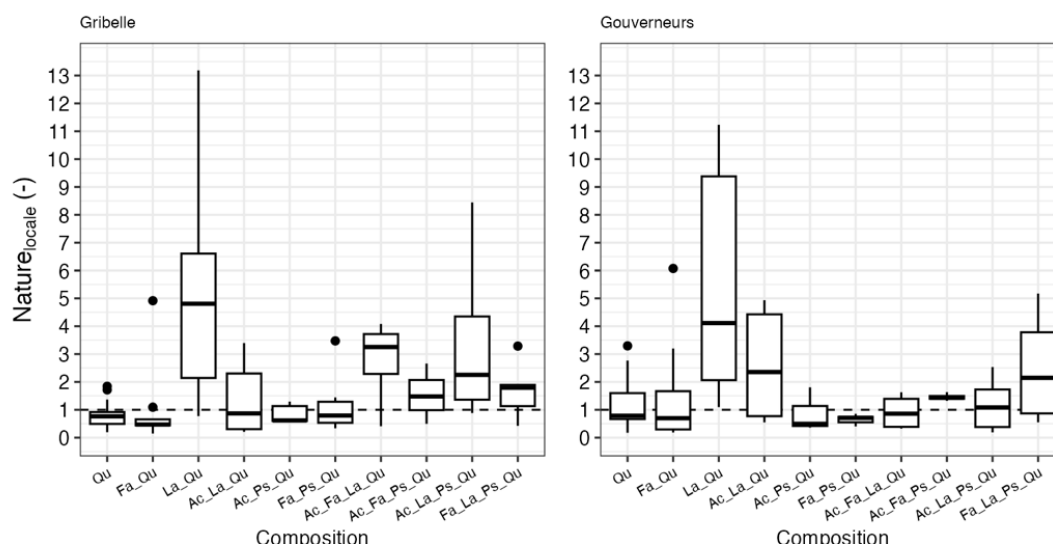


Figure 3.2-1 : Distributions de la nature de l'éclaircie, à l'échelle du voisinage local ($Nature_{locale}$, [-]), selon les compositions et les blocs (Gribelle et Gouverneurs).

La distribution montre que, dans ces derniers peuplements, les voisins enlevés sont en moyenne de grosseur comparable à celle du chêne cible concerné. La Figure 3.2-1 montre également que, dans les mélanges La_Qu, les chênes cibles ont été libérés de voisins dont la surface terrière moyenne peut dépasser dix fois celle du chêne cible, aussi bien à Gouverneurs qu'à Gribelle. Par rapport à ce mélange, toutes les autres compositions présentent des valeurs de $Nature_{locale}$ significativement plus faibles ($p < 0,05$) (Figure 3.2-4). Quant au bloc, il n'a pas d'influence significative sur la nature de l'éclaircie ($p > 0,05$).

La variable catégorielle de la composition est significative dans le modèle ($p < 0,0001$), indiquant un effet de la composition sur la nature de l'éclaircie locale. Le test post-hoc montre que la nature de l'éclaircie du mélange La_Qu est la seule à différer significativement de celle de la monoculture de chêne (Qu) ($p < 0,0001$) (Figure 3.2-4).

Le test de la relation entre la nature de l'éclaircie et les indicateurs de concurrence globale (qui représentent la composition à l'échelle de la parcelle) montre une relation significative pour la surface terrière totale ($G_{parcelle}$, $p = 0,00186$ et pente positive), la part de résineux ($\%G_{relative_resineux}$, $p = 0,0166$ et pente positive) et la hauteur moyenne relative des chênes ($H_{relative_parcelle}$, $p = 0,0023$ et pente négative). La visualisation de ces relations est basée sur les valeurs moyennes à l'échelle de la parcelle et est présentée en annexe (Figure annexe 1).

3.2.1.2 Surface terrière retirée localement autour du chêne cible

La Figure 3.2-2 montre que la surface terrière enlevée dans le voisinage local ($g_{enlevée_voisinage_local}$) varie entre les compositions. La variable catégorielle de la composition est significative dans le modèle ($p < 0,0001$), indiquant que la quantité de matériel enlevé varie selon les compositions. Pour la monoculture (Qu), le test post-hoc montre seulement une différence significative avec le mélange La_Qu ($p < 0,0001$). Dans la majorité des autres comparaisons, la quantité enlevée est plus faible en monoculture. Or, toutes ces autres comparaisons impliquant la monoculture (Qu) présentent des p-valeurs supérieures à 0,05 (Figure 3.2-4).

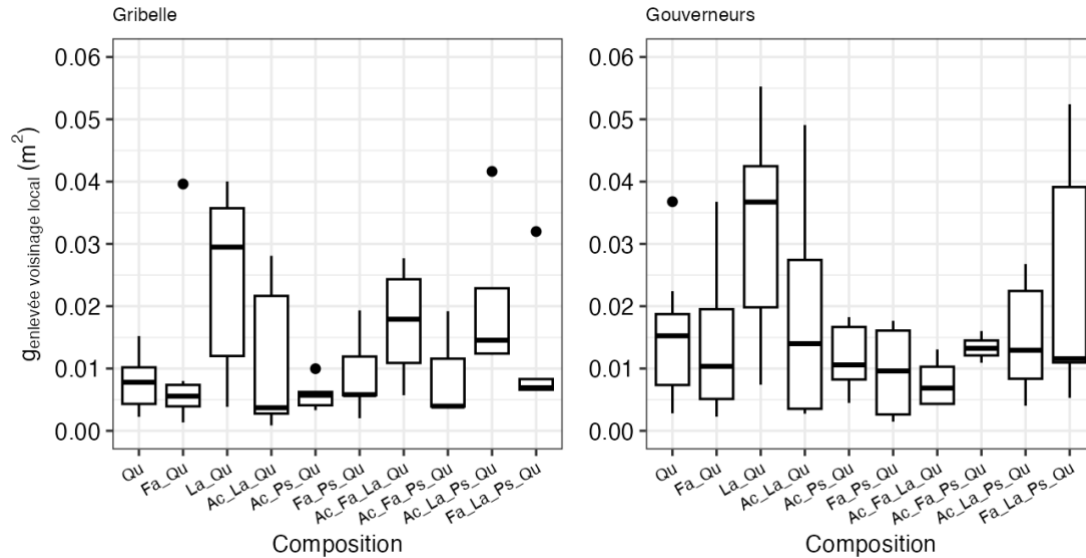


Figure 3.2-2: Distributions de la surface terrière enlevée, à l'échelle de voisinage local ($g_{\text{enlevée_voisinage_local}}$, [m^2]), selon les compositions et les blocs (Gribelle et Gouverneurs).

Les surfaces terrières enlevées par chêne cible ($g_{\text{enlevée_voisinage_local}}$) sont relativement dispersées, particulièrement dans les mélanges Ac_La_Qu et La_Qu. Le mélange La_Qu se distingue de nouveau par les valeurs les plus élevées, avec des médianes supérieures à 0,03 m^2 de surface terrière enlevée dans le voisinage local. Cette observation est cohérente avec les différences significatives observées dans les comparaisons post-hoc ($p < 0,05$). La majorité des autres compositions, dont la monoculture (Qu, $p < 0,0001$), présentent des surfaces terrières enlevées ($g_{\text{enlevée_voisinage_local}}$) significativement plus faibles (Figure 3.2-4). La_Qu ne diffère toutefois pas significativement des compositions Ac_La_Ps_Qu et Fa_La_Ps_Qu. De manière générale, une quantité plus importante de matériel a été enlevée à Gouverneurs qu'à Gribelle ($p = 0,0169$).

Le test de la relation entre la surface terrière enlevée par l'éclaircie dans le voisinage local du chêne cible ($g_{\text{enlevée_voisinage_local}}$) et les indicateurs de concurrence globale montre une relation significative pour la surface terrière totale (G_{parcelle} , $p = 0,000203$ et pente positive), la part de résineux ($\%G_{\text{relative_resineux}}$, $p = 0,0229$ et pente positive) et la hauteur moyenne relative des chênes ($H_{\text{relative_parcelle}}$, $p = 0,00337$ et pente négative). La visualisation de ces relations est basée sur les valeurs moyennes à l'échelle de la parcelle et est présentée en annexe (Figure annexe 2).

3.2.1.3 Intensité locale de l'éclaircie

En considérant l'intensité locale de l'éclaircie (I_{g_local} , surface terrière enlevée par rapport à la surface terrière initiale du voisinage local), des différences d'éclaircie entre compositions sont toujours visibles (Figure 3.2-3). La variable catégorielle de la composition n'est cependant que marginalement significative dans le modèle ($p = 0,066$). En accord avec ce résultat, bien que des différences visuelles suggèrent un effet de la composition, le test post-hoc ne met en évidence aucune différence significative d'intensité locale d'éclaircie (I_{g_local}) entre la monoculture de chêne (Qu) et les autres compositions ($p > 0,05$). Plus généralement, aucune différence significative n'est observée entre les compositions (Figure 3.2-4).

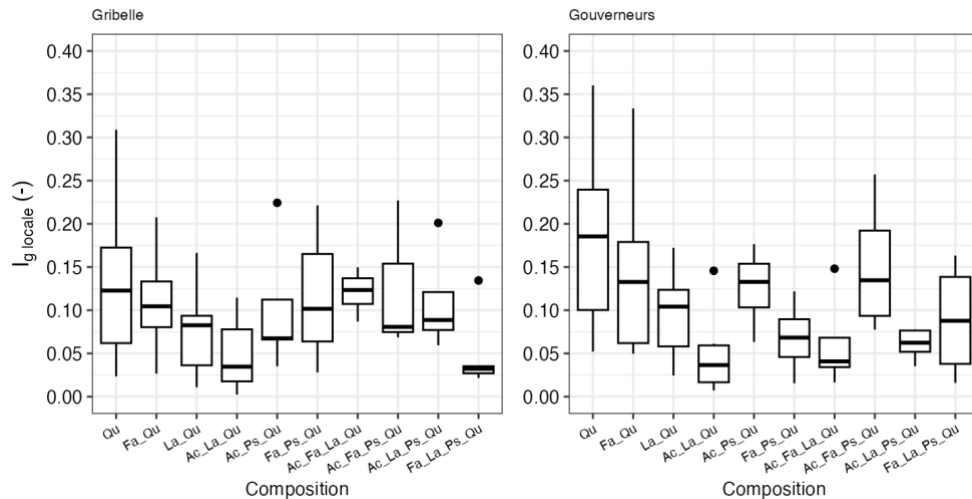


Figure 3.2-3 : Distributions de l'intensité locale de l'éclaircie (I_{g_local} [-], surface terrière enlevée par rapport à la surface terrière initiale du voisinage local), selon les compositions et les blocs (Gribelle et Gouverneurs).

La monoculture de chêne présente, dans les deux blocs, la médiane la plus élevée ainsi que les valeurs maximales les plus élevées (environ 12 % à Gribelle et 18 % à Gouverneurs). Les intensités (I_{g_local}) y atteignent près de 30 % de surface terrière initiale du voisinage local. Les mélanges Ac_Fa_Ps_Qu et Fa_Qu présentent également des intensités pouvant atteindre 20 % dans les deux blocs. À l'inverse, aucune intensité supérieure à 15 % n'est observée dans les compositions Ac_Fa_La_Qu, Ac_La_Ps_Qu et Ac_La_Qu. Les intensités locales d'éclaircie (I_{g_locale}) ne diffèrent pas significativement entre les blocs ($p > 0,05$).

Le test de la relation entre l'intensité de l'éclaircie (I_{g_local}) et les indicateurs de concurrence globale montre une relation significative pour la surface terrière totale ($G_{parcèle}$, $p = 0,0121$ et pente négative), la part de chênes ($\%G_{relative_quercus}$, $p = 0,00197$ et pente positive), la part de résineux ($\%G_{relative_resineux}$, $p = 0,000507$ et pente négative) et la hauteur moyenne relative des chênes ($H_{relative_parcèle}$, $p = 0,000801$ et pente positive). La visualisation de ces relations est basée sur les valeurs moyennes à l'échelle de la parcelle et est présentée en annexe (Figure annexe 3).

3.2.1.4 Effets de la composition sur la conduite de l'éclaircie à l'échelle locale

La figure ci-dessous visualise les différents indicateurs locaux de l'éclaircie modélisés, en contrôlant l'effet de la composition et du bloc. De manière générale, la monoculture de chêne (Qu) se situe parmi les cas les plus extrêmes.

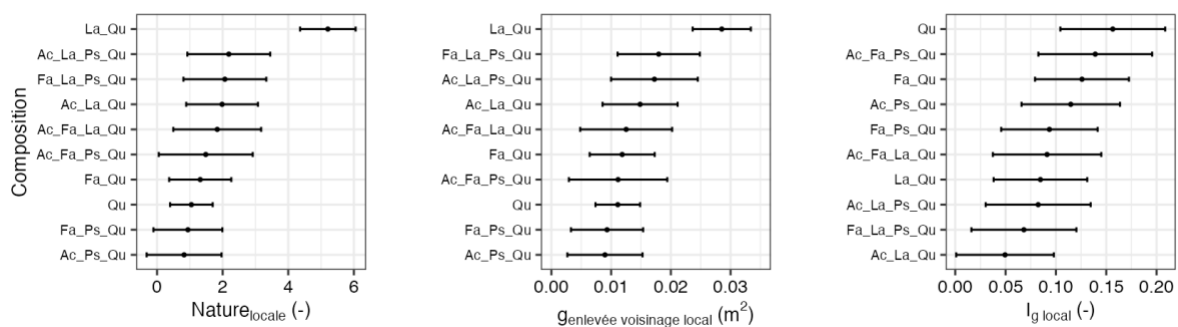


Figure 3.2-4 : Moyennes ajustées (en ordre décroissant) avec intervalle de confiance de 95% des indicateurs locaux de l'éclaircie ($Nature_{locale}$, $genlevée_voisinage_local$, I_{g_local}), selon les compositions (l'effet du bloc étant contrôlé).

Bien que la monoculture présente des valeurs de $Nature_{locale}$ parmi les plus faibles, indiquant que les arbres voisins supprimés sont en moyenne de taille similaire aux chênes cibles éclaircis (T), elle présente également les plus faibles quantités de surface terrière absolue enlevée ($g_{enlevée_voisinage_local}$). Cependant, c'est dans cette composition que la réduction relative de surface terrière (I_{g_local}) est la plus importante. Comme indiqué précédemment, cette différence d'intensité n'est toutefois pas significative et doit être considérée comme une tendance.

3.2.2 Caractérisation de l'éclaircie à l'échelle de la parcelle

3.2.2.1 Nature de l'éclaircie à l'échelle de la parcelle

À l'échelle de la parcelle, la nature de l'éclaircie ($Nature_{parcelle}$) correspond à la grosseur moyenne des arbres enlevés, y compris les arbres coupés au profit d'arbres cibles d'autres essences que le chêne, rapportée à la grosseur moyenne des chênes cibles. La Figure 3.2-5 montre que la taille relative des arbres enlevés par rapport aux chênes cibles varie selon les compositions. Cela suggère ainsi que la nature ($Nature_{parcelle}$) de la réduction de la compétition diffère entre peuplements. Dans le modèle, la variable catégorielle de la composition est significative ($p = 0,00973$). Le test post-hoc montre une seule différence significative entre la monoculture et La_Qu ($p = 0,0322$) (Figure 3.2-8).

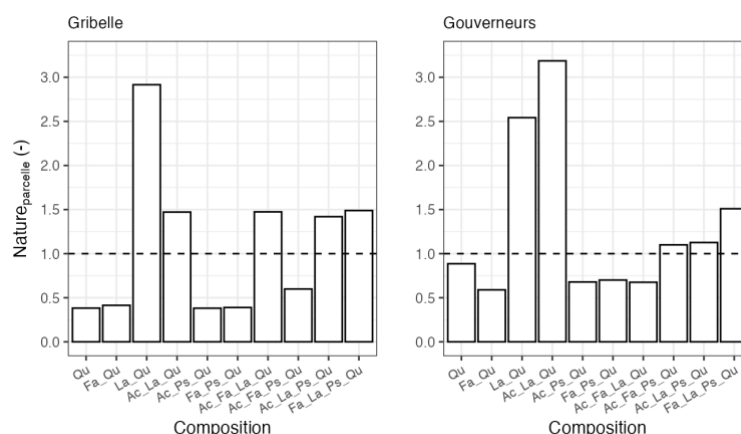


Figure 3.2-5 : La nature de l'éclaircie, à l'échelle de la parcelle ($Nature_{parcelle}$, [-]), selon les compositions et les blocs (Gribelle et Gouverneurs).

À Gribelle, l'éclaircie réalisée dans toutes les parcelles contenant du mélèze aboutit à l'enlèvement d'individus en moyenne plus gros que les chênes cibles (valeur > 1 , Figure 3.2-5). Cette tendance est particulièrement marquée dans La_Qu, où les arbres enlevés sont en moyenne environ trois fois plus gros que les chênes cibles. Les autres mélanges, ainsi que la monoculture de chêne, présentent au contraire des arbres enlevés de diamètre moyen inférieur à celui des chênes cibles. À Gouverneurs, les mélanges contenant du mélèze se distinguent de manière moins nette, la composition Ac_Fa_La_Qu présentant même une valeur inférieure à 1. Les compositions Ac_La_Qu et La_Qu se démarquent toutefois avec des valeurs de $Nature_{parcelle}$ respectivement égales à 3,2 et 2,5. Les compositions Ac_Fa_Ps_Qu et Ac_La_Ps_Qu présentent des valeurs proches de 1, tandis que les autres mélanges ainsi que la monoculture de chêne présentent, en moyenne, des arbres enlevés moins gros que les chênes cibles. L'allure générale reste généralement comparable entre les deux blocs, l'effet du bloc n'étant pas significatif ($p > 0,05$).

Le test de la relation entre la nature de l'éclaircie et les indicateurs de concurrence globale, qui représentent la composition à l'échelle de la parcelle, montre une relation significative pour la surface terrière totale ($G_{parcelle}$, $p < 0,0001$ et pente positive), la part de chênes ($\%G_{relative_quercus}$, $p = 0,0296$ et pente négative), la part des essences intolérantes à l'ombrage ($\%G_{relative_intol}$, $p = 0,0201$ et pente positive), la part de résineux ($\%G_{relative_resineux}$, $p = 0,00116$ et pente positive) et la hauteur moyenne relative des chênes ($H_{relative_parcelle}$, $p < 0,0001$ et pente

négative). La visualisation de ces relations est basée sur les valeurs moyennes à l'échelle de la parcelle et est présentée en annexe (Figure annexe 4).

3.2.2.2 Surface terrière retirée à l'échelle de la parcelle

La surface terrière enlevée à l'échelle de la parcelle ($g_{\text{enlevée_parcelle}}$) prend en compte l'ensemble des arbres coupés, non seulement au profit des chênes cibles, mais également au profit des arbres cibles des autres essences. La variable catégorielle de la composition est significative ($p = 0,00357$), indiquant un effet de la composition sur la quantité absolue de matériel enlevé ($g_{\text{enlevée_parcelle}}$). En cohérence avec ce résultat, la Figure 3.2-6 montre une allure similaire à celle de la Figure 3.2-5 et met en évidence des différences visuelles entre les compositions. Le test post-hoc montre une différence significative dans la quantité de matériel enlevé entre Qu et La_Qu ($p = 0,0214$) (Figure 3.2-8).

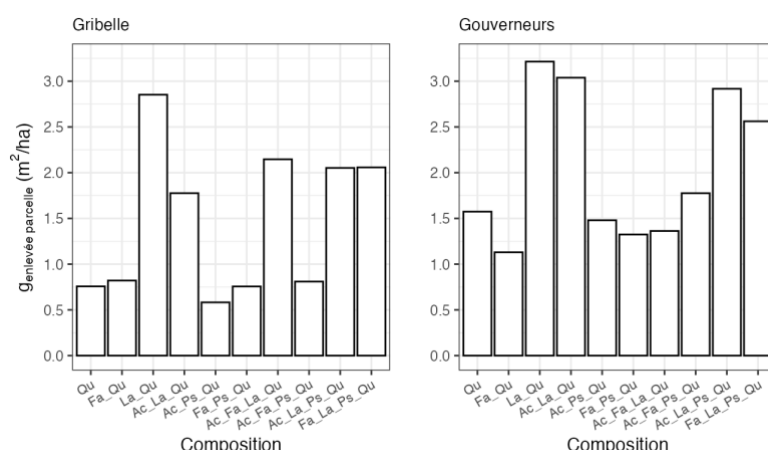


Figure 3.2-6 : Surface terrière absolue enlevée dans la parcelle ($g_{\text{enlevée_parcelle}}$, [m²/ha]), selon les compositions et les blocs (Gribelle et Gouverneurs).

Dans les deux blocs, à l'exception du mélange Ac_Fa_La_Qu à Gouverneurs, les mélanges contenant du mélèze se distinguent visiblement des autres compositions (Figure 3.2-6). Cette tendance est cohérente avec les comparaisons post-hoc, plusieurs contrastes impliquant des compositions contenant du mélèze étant significatifs ($p < 0,05$). En particulier, dans les deux blocs, La_Qu présente la surface terrière enlevée la plus importante, avec environ 3 m²/ha.

Une quantité significativement plus importante de surface terrière est enlevée à Gouverneurs qu'à Gribelle ($p = 0,0100$). Par exemple, à Gribelle, les mélanges ne contenant pas de mélèze présentent tous une surface terrière enlevée inférieure à 1 m²/ha. À Gouverneurs, cette valeur est généralement supérieure à 1 m²/ha (Figure 3.2-6).

Le test de la relation entre la surface terrière enlevée par l'éclaircie ($g_{\text{enlevée_parcelle}}$) et les indicateurs de concurrence globale montre une relation significative pour la surface terrière totale (G_{parcelle} , $p < 0,0001$ et pente positive), la part de chênes ($\%G_{\text{relative_quercus}}$, $p = 0,0132$ et pente négative), la part d'essences intolérantes à l'ombrage ($\%G_{\text{relative_intol}}$, $p = 0,00613$ et pente positive), la part de résineux ($\%G_{\text{relative_resineux}}$, $p = 0,000103$ et pente positive) et la hauteur moyenne relative des chênes ($H_{\text{relative_parcelle}}$, $p < 0,0001$ et pente négative). La visualisation de ces relations est basée sur les valeurs moyennes à l'échelle de la parcelle et est présentée en annexe (Figure annexe 5).

3.2.2.3 Intensité de l'éclaircie à l'échelle de la parcelle

Les mêmes tendances sont observables pour les intensités à l'échelle de la parcelle ($I_{g_parcelle}$, surface terrière enlevée par rapport à la surface terrière initiale de la parcelle, Figure 3.2-7). Dans le modèle, la variable catégorielle de la composition n'est pas significative ($p = 0,197$), indiquant l'absence d'effet significatif de la composition sur l'intensité de l'éclaircie à l'échelle

de la parcelle ($I_{g_parcelle}$). Le test post-hoc montre également qu'aucune composition ne diffère significativement de la monoculture de chêne (Qu) ($p > 0,05$) (Figure 3.2-8).

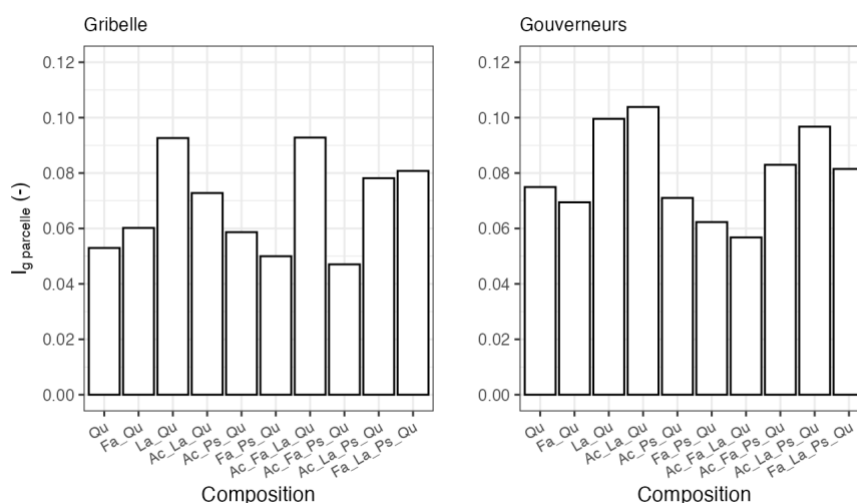


Figure 3.2-7 : L'intensité globale de l'éclaircie à l'échelle de la parcelle (I_{g_local} [-], surface terrière enlevée par rapport à la surface terrière initiale de la parcelle), selon les compositions et les blocs (Gribelle et Gouverneurs).

Comme précédemment, dans les deux blocs, à l'exception du mélange Ac_Fa_La_Qu à Gouverneurs, les mélanges contenant du mélèze se distinguent visiblement des autres compositions (Figure 3.2-7). Toutefois, cette tendance est moins marquée que pour la surface terrière enlevée en valeur absolue ($g_{enlevée_parcelle}$, Figure 3.2-6). En cohérence, les comparaisons post-hoc ne mettent en évidence aucune différence significative entre les compositions ($p > 0,05$).

Les intensités de l'éclaircie à l'échelle de la parcelle ($I_{g_parcelle}$) ne dépassent généralement pas 11 %. À Gribelle, les intensités de l'éclaircie sont en partie plus faibles qu'à Gouverneurs, mais de manière non significative ($p > 0,05$).

Le test de la relation entre l'intensité de l'éclaircie ($I_{g_parcelle}$) et les indicateurs de concurrence globale (qui représentent la composition à l'échelle de la parcelle) montre une relation significative pour la surface terrière totale ($G_{parcelle}$, $p < 0,0001$ et pente positive), la part d'essences intolérantes à l'ombrage ($\%G_{relative_intol}$, $p = 0,0196$ et pente positive), la part de résineux ($\%G_{relative_resineux}$, $p = 0,00348$ et pente positive) et la hauteur moyenne relative des chênes ($H_{relative_parcelle}$, $p = 0,000883$ et pente négative). La visualisation de ces relations est basée sur les valeurs moyennes à l'échelle de la parcelle et est présentée en annexe (Figure annexe 6).

3.2.2.4 Effets de la composition sur la conduite de l'éclaircie à l'échelle de la parcelle

La Figure 3.2-8 présente les moyennes ajustées par le modèle, c'est-à-dire les moyennes estimées après contrôle de l'effet du site. Pour chaque indicateur global, les mélanges contenant du mélèze figurent parmi ceux présentant les moyennes les plus élevées. La largeur des intervalles de confiance à 95 % reflète l'incertitude associée à l'estimation des moyennes.

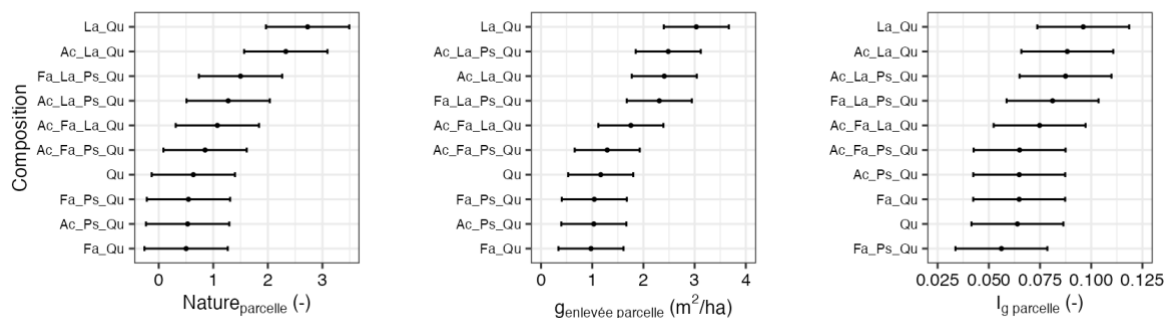


Figure 3.2-8 : Moyennes ajustées (en ordre décroissant) avec intervalle de confiance de 95% des indicateurs globaux de l'éclaircie ($Nature_{parcelle}$, $Genlevée_{parcelle}$, $Ig_{parcelle}$), selon les compositions (l'effet du bloc étant contrôlé).

La monoculture de chêne (Qu) tend également à se situer parmi les compositions présentant les valeurs les plus extrêmes, bien que ces différences ne soient pas systématiquement significatives.

3.3 Compétition du voisinage local

3.3.1 Indice de compétition (NCI)

Dans les deux blocs, la monoculture fait partie des compositions présentant les valeurs de l'indice de compétition (NCI) les moins élevées, avec des valeurs d'environ 0,3 (Figure 3.3-1). D'autres mélanges à indice de compétition faible sont Ac_Ps_Qu et Fa_Qu. Le mélange La_Qu est, dans les deux blocs, parmi les mélanges aux indices de compétition (NCI) les plus élevés, avec environ 0,6 à Gribelle et 0,5 à Gouverneurs. La variable catégorielle de la composition est significative ($p = 0,00754$), indiquant un effet de la composition. Visuellement, les compositions contenant du mélèze tendent à présenter des indices de compétition (NCI) plus élevés. Statistiquement, les comparaisons post-hoc montrent toutefois que cette tendance ressort surtout pour le mélange La_Qu, pour lequel cinq différences sont significatives ($p < 0,05$), notamment celle avec la monoculture Qu ($p = 0,0295$). Le mélange La_Qu est le seul à présenter un indice de compétition (NCI) significativement différent de celui observé en monoculture de chêne (Figure 3.3-4).

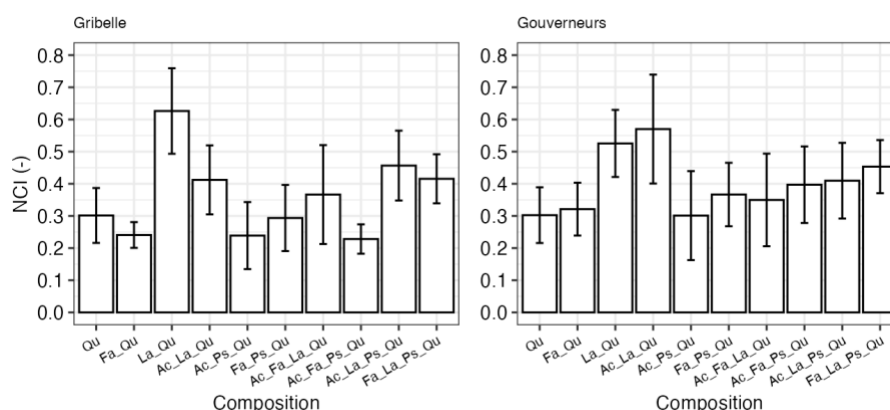


Figure 3.3-1 : Moyennes et écarts types de l'indice de compétition (NCI), selon les compositions et les blocs (Gribelle et Gouverneurs).

La Figure 3.3-1 montre des différences globales de l'indice de compétition entre les compositions des deux blocs, qui ne sont cependant pas significatives. Les écarts types diffèrent entre compositions, traduisant une variabilité plus ou moins importante de l'indice de compétition (NCI) au sein des parcelles.

Le test de la relation entre l'indice de compétition (NCI) et les indicateurs de concurrence globale, qui représentent la composition à l'échelle de la parcelle, montre une relation significative pour la surface terrière totale (G_{parcelle} , $p < 0,0001$ et pente positive), la part de chênes ($\%G_{\text{relative_quercus}}$, $p = 0,0231$ et pente négative), la part d'essences intolérantes à l'ombrage ($\%G_{\text{relative_intol}}$, $p = 0,008$ et pente positive), la part de résineux ($\%G_{\text{relative_resineux}}$, $p = 0,00035$ et pente positive) et la hauteur moyenne relative des chênes ($H_{\text{relative_parcelle}}$, $p < 0,0001$ et pente négative). La visualisation de ces relations est présentée en annexe (Figure annexe 7).

3.3.2 Éclairement relatif

La Figure 3.3-2 montre des moyennes maximales d'éclairement relatif (ER) autour de 0,7 en monoculture de chêne (Qu). L'éclairement relatif du mélange Ac_Ps_Qu est comparable à celui de la monoculture à Gribelle. À Gouverneurs, Ac_Fa_Ps_Qu et Fa_Ps_Qu ont également des éclairagements relatifs proches. Les différences visuelles entre les compositions sont confirmées statistiquement. La variable catégorielle de la composition est significative dans le modèle ($p < 0,0001$). Les comparaisons post-hoc montrent que l'éclairement relatif en monoculture de chêne est significativement différent de celui mesuré dans toutes les compositions comprenant du mélèze (La_Qu ($p < 0,0001$), Ac_La_Qu ($p < 0,0001$), Ac_Fa_La_Qu ($p < 0,0001$), Ac_La_Ps_Qu ($p = 0,0340$) et Fa_La_Ps_Qu ($p = 0,0001$), Figure 3.3-4). La tendance ressort surtout pour La_Qu, qui présente les différences les plus marquées.

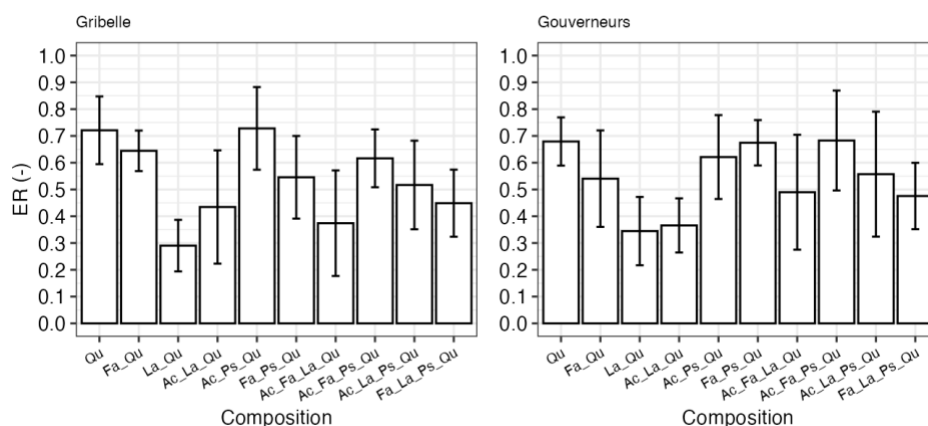


Figure 3.3-2 : Moyennes et écarts types de l'éclairement relatif (ER), selon les compositions et les blocs (Gribelle et Gouverneurs).

En cohérence avec ces résultats, les éclairagements relatifs (ER) les plus bas sont observés dans les mélanges contenant du mélèze, particulièrement dans La_Qu, où la valeur est d'environ 0,3. La Figure 3.3-2 montre que cet indicateur est majoritairement similaire entre les compositions des deux blocs. Cela est confirmé par un test post-hoc qui ne montre pas de différence globale significative d'éclairement relatif entre les deux blocs. Les écarts types diffèrent entre compositions, traduisant une variabilité plus ou moins importante de l'indicateur au sein des parcelles.

Le test de la relation entre l'éclairement relatif (ER) et les indicateurs de concurrence globale montre une relation significative pour la surface terrière totale (G_{parcelle} , $p < 0,0001$ et pente négative), la part de chênes ($\%G_{\text{relative_quercus}}$, $p = 0,00331$ et pente positive), la part de résineux ($\%G_{\text{relative_resineux}}$, $p = 0,000779$ et pente négative) et la hauteur moyenne relative des chênes ($H_{\text{relative_parcelle}}$, $p < 0,0001$ et pente positive). La visualisation de ces relations est présentée en annexe (Figure annexe 8).

3.3.3 Hauteur relative du chêne cible

La figure ci-dessous montre les hauteurs relatives des chênes cibles ($H_{\text{relative_voisinage}}$, rapport entre la hauteur totale du chêne cible et la hauteur moyenne de Lorey du voisinage local). Les plus faibles hauteurs relatives ($H_{\text{relative_voisinage}}$) sont observées dans les mélanges contenant du mélèze. En revanche, en monoculture de chêne (Qu) et Fa_Qu, les chênes cibles sont en moyenne au moins aussi grands que leur voisinage (valeur proche de 1). Les mélanges Ac_Fa_Ps_Qu, Ac_Ps_Qu et Fa_Ps_Qu ont des positions relatives intermédiaires. En cohérence avec cela, la variable catégorielle de la composition est significative ($p < 0,0001$). Cela suggère que la hauteur relative des chênes cibles ($H_{\text{relative_voisinage}}$) est dépendante de la composition. En effet, le test post-hoc montre que la monoculture (Qu) diffère significativement de toutes les compositions contenant du mélèze (La_Qu ($p = 0,0035$), Ac_La_Qu ($p < 0,0012$), Ac_Fa_La_Qu ($p = 0,0013$), Ac_La_Ps_Qu ($p = 0,0045$) et Fa_La_Ps_Qu ($p = 0,0011$, Figure 3.3-4).

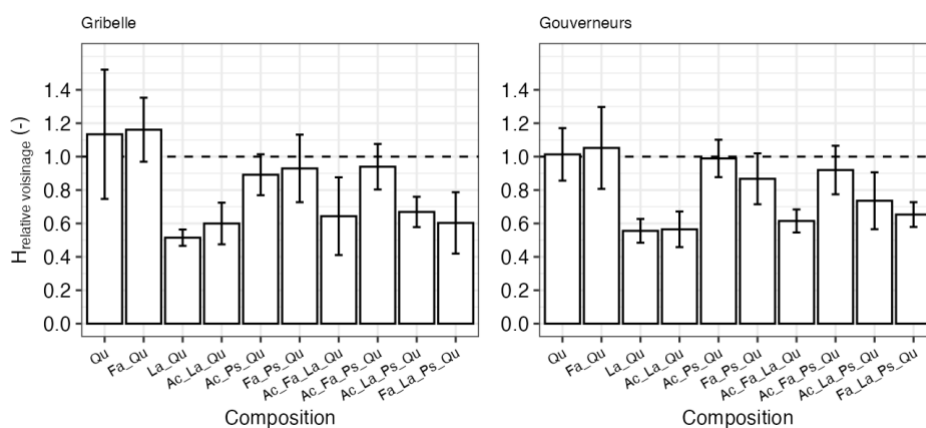


Figure 3.3-3 : Moyennes et écarts types de la hauteur relative des chênes cibles par rapport à leur voisinage local ($H_{\text{relative_voisinage}}$), selon les compositions et les blocs (Gribelle et Gouverneurs).

L'indicateur est similaire entre les compositions correspondantes des deux blocs (Figure 3.3-3). Cela est confirmé par un test post-hoc qui ne montre pas de différence globale significative entre les hauteurs relatives ($H_{\text{relative_voisinage}}$) des deux blocs. Les écarts types varient entre les compositions, montrant des hauteurs relatives variables au sein des compositions.

Le test de la relation entre la hauteur relative des chênes cibles ($H_{\text{relative_voisinage}}$) et les indicateurs de concurrence montre une relation significative pour la surface terrière totale (G_{parcelle} , $p < 0,0001$ et pente négative), la part de chênes ($\%G_{\text{relative_quercus}}$, $p = 0,000193$ et pente positive), la part d'essences intolérantes à l'ombrage ($\%G_{\text{relative_intol}}$, $p = 0,0169$ et pente négative), la part de résineux ($\%G_{\text{relative_resineux}}$, $p < 0,0001$ et pente négative) et la hauteur moyenne relative des chênes à l'échelle de la parcelle ($H_{\text{relative_parcelle}}$, $p < 0,0001$ et pente positive). La visualisation de ces relations est présentée en annexe (Figure annexe 9).

3.3.4 Effets de la composition sur la compétition locale

La Figure 3.3-4 montre les moyennes ajustées par le modèle après contrôle de l'effet du bloc. La monoculture de chêne (Qu) figure parmi les compositions présentant les plus faibles valeurs de l'indice de compétition (NCI), mais les valeurs les plus élevées d'éclairement relatif (ER) et de hauteur relative des chênes cibles ($H_{\text{relative_voisinage}}$). L'indice de compétition y est d'environ 0,3, l'éclairement relatif d'environ 0,7 et la hauteur relative des chênes cibles d'environ 1,1.

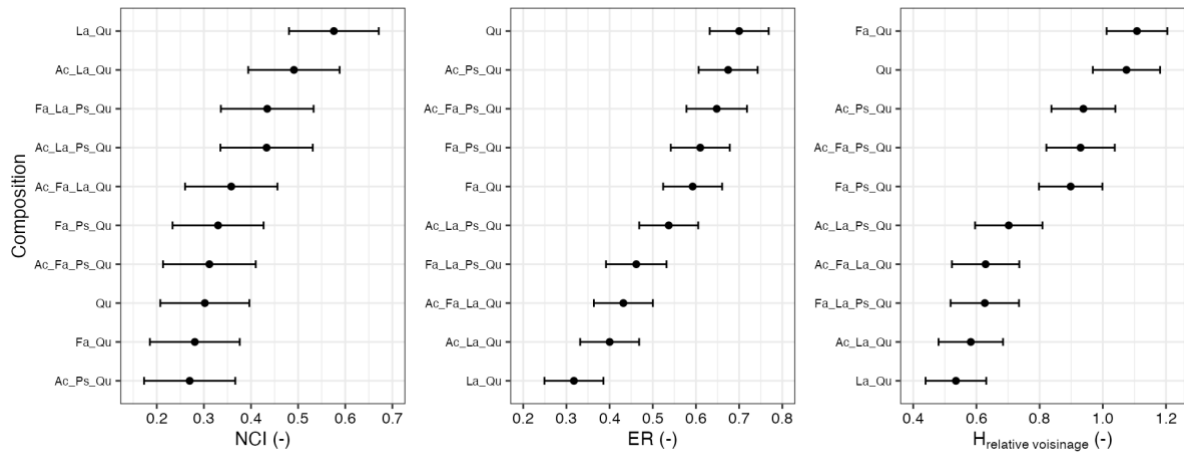


Figure 3.3-4 : Moyennes ajustées (en ordre décroissant) avec intervalle de confiance de 95% des trois indicateurs (NCI, ER, $H_{relative_voisinage}$), selon les compositions (l'effet du bloc étant contrôlé).

Les mélanges contenant du mélèze présentent les valeurs les plus élevées de l'indice de compétition (NCI) ainsi que les plus faibles valeurs d'éclairement relatif (ER) et de hauteur relative ($H_{relative_voisinage}$). Pour ce dernier indicateur, un gradient net apparaît entre les mélanges contenant du mélèze, ceux contenant du douglas et les mélanges feuillus.

3.3.5 Relations entre les indicateurs de compétition locale

Le modèle reliant l'éclairement relatif (ER) à l'indice de compétition (NCI) met en évidence une interaction significative entre l'indice de compétition et la composition ($p = 0,041$). Cela indique que la relation entre l'indice de compétition (NCI) et l'éclairement relatif (ER) varie selon les compositions étudiées.

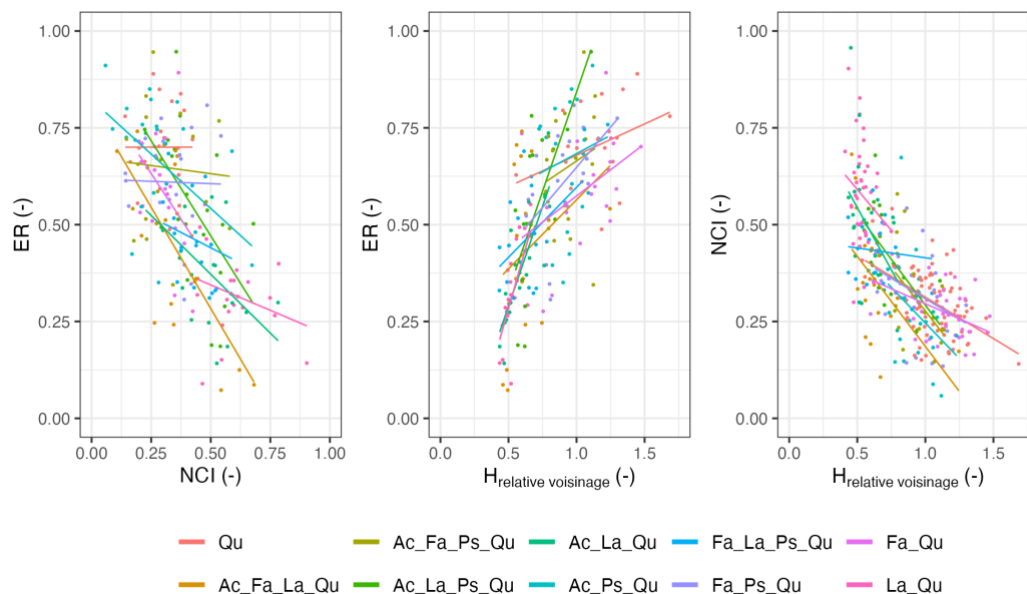


Figure 3.3-5 : Relations entre les trois indicateurs de compétition locale (NCI, ER, $H_{relative_voisinage}$), selon les compositions.

En revanche, l'effet principal de l'indice de compétition (NCI) n'est pas significatif dans la composition de référence (Qu, $p = 0,998$). Pour la monoculture de chêne, la relation entre l'éclairement relatif et l'indice de compétition apparaît quasi constante, avec une pente proche de zéro (Figure 3.3-5). L'éclairement relatif de cette composition reste proche de 0,7. De plus, les valeurs de l'indice de compétition observées en monoculture (Qu) restent relativement faibles et ne dépassent pas 0,5, tandis que les mélanges présentent globalement des valeurs

de l'indice de compétition plus élevées. Par rapport à la monoculture (Qu), les relations observées dans les différents mélanges sont majoritairement négatives, avec des intensités variables selon la composition. Le signe négatif des pentes indique qu'une augmentation de l'indice de compétition (NCI) est associée à une diminution de l'éclairement relatif (ER).

Le modèle reliant l'éclairement relatif (ER) à la hauteur relative du chêne cible ($H_{\text{relative_voisinage}}$) montre également une interaction significative entre la hauteur relative et la composition ($p = 0,0139$). Cette relation dépend donc de la composition. L'effet de la hauteur relative dans la composition de référence (Qu) n'est pas significatif ($p = 0,206$). La pente observée en monoculture est visiblement moins marquée que celles des autres compositions, mais n'est pas significativement différente de zéro. L'éclairement relatif de cette composition reste de nouveau proche de 0,7 (Figure 3.3-5). De plus, les valeurs de hauteur relative ($H_{\text{relative_voisinage}}$) observées en monoculture de chêne atteignent, voire dépassent, 1,25. Les mélanges, à l'exception de Fa_Qu, présentent globalement des valeurs de hauteur relative moins élevées. Par rapport à la monoculture, les relations observées dans les différents mélanges sont majoritairement caractérisées par des pentes plus positives, avec des intensités variables selon la composition. Le signe positif des pentes indique qu'une augmentation de la hauteur relative du chêne cible par rapport au voisinage est associée à une augmentation de l'éclairement relatif (ER).

Enfin, le modèle reliant l'indice de compétition (NCI) à la hauteur relative des chênes cibles ($H_{\text{relative_voisinage}}$) met en évidence un effet significatif de la hauteur relative dans la composition de référence (Qu) ($p = 0,0175$). L'interaction significative entre la hauteur relative ($H_{\text{relative_voisinage}}$) et la composition ($p = 0,00721$) indique que la relation entre la hauteur relative du chêne cible et l'indice de compétition (NCI) varie selon les compositions. La pente observée en monoculture est négative. L'indice de compétition (NCI) de la monoculture ne dépasse pas 0,5. De plus, les valeurs de hauteur relative observées en monoculture de chêne (Qu) atteignent voire dépassent 1,25, tandis que les mélanges, à l'exception de Fa_Qu, présentent globalement des valeurs de hauteur relative moins élevées. Par rapport à la monoculture (Qu), les relations observées dans les différents mélanges sont majoritairement négatives, avec des intensités variables selon la composition. Le signe négatif des pentes indique qu'une augmentation de la hauteur relative du chêne cible par rapport au voisinage ($H_{\text{relative_voisinage}}$) est associée à une diminution de l'indice de compétition (NCI).

Les corrélations observées entre les variables confirment les tendances mises en évidence par la Figure 3.3-5, avec des relations négatives entre l'indice de compétition et les deux autres indicateurs (ER, $r = -0,61$; $H_{\text{relative_voisinage}}$, $r = -0,62$), et une relation positive entre l'éclairement relatif et la hauteur relative ($r = 0,66$).

3.4 Composition et concurrence globale

3.4.1 Indicateurs de concurrence globale

3.4.1.1 Surface terrière totale et ventilation entre essences

La Figure 3.4-1 montre à la fois la surface terrière totale (G_{parcelle}) et les surfaces terrières relatives des chênes, des résineux et des essences intolérantes à l'ombrage. La surface terrière totale varie visiblement d'une composition à l'autre. En effet, le test anova montre que la variable catégorielle de la composition est significative ($p = 0,000150$). Le test post-hoc montre que les compositions La_Qu, Ac_La_Qu, Ac_La_Ps_Qu et Fa_La_Ps_Qu présentent des surfaces terrières totales significativement différentes de celle de la monoculture de chêne (Qu) (Figure 3.4-3).

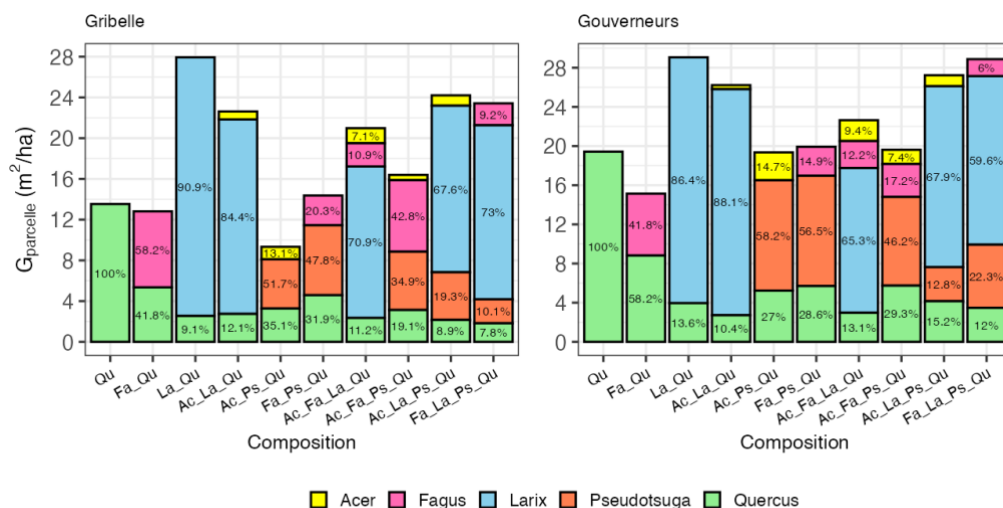


Figure 3.4-1 : Surface terrière totale (G_{parcelle}) de la parcelle, rapportée à l'hectare, ventilée par les essences concernées, selon les compositions et blocs (Gribelle et Gouverneurs).

(Acer = érable ; Fagus = hêtre ; Larix = mélèze ; Pseudotsuga = douglas ; Quercus = chêne)

Les ventilations montrent également les proportions de chênes ($\%G_{\text{relative_quercus}}$), de résineux ($\%G_{\text{relative_resineux}}$) et d'essences intolérantes à l'ombrage ($\%G_{\text{relative_intol}}$).

La surface terrière totale (G_{parcelle}) de la monoculture de chêne (Qu) figure parmi les moins élevées, avec environ 14 m²/ha à Gribelle et 20 m²/ha à Gouverneurs (Figure 3.4-1). La surface terrière totale est la plus élevée dans les parcelles contenant du mélèze. Elle atteint notamment ses valeurs maximales dans les deux mélanges La_Qu, avec des valeurs proches de 28 m²/ha. Concernant les deux blocs, la surface terrière est plus élevée à Gouverneurs ($p = 0,0007$), comme l'allure de la Figure 3.4-1 le laisse également supposer.

La part de chênes ($\%G_{\text{relative_quercus}}$) semble davantage influencée par l'identité des essences partenaires que par la richesse spécifique (Figure 3.4-1). Les deux mélanges de deux essences Fa_Qu et La_Qu ont des répartitions très inégales. Ac_La_Ps_Qu, où la proportion de tiges de chêne est plus élevée, présente une valeur de $\%G_{\text{relative_quercus}}$ comparable à celle de La_Qu. Le test anova montre que la variable catégorielle de la composition est significative ($p < 0,0001$). Le test post-hoc montre des différences significatives par rapport à la monoculture (Qu) pour chaque composition (Figure 3.4-3).

Hormis dans les compositions Fa_Qu et Qu, où elle est nulle, la proportion de résineux ($\%G_{\text{relative_resineux}}$) est généralement supérieure à 50 % (Figure 3.4-1, Figure 3.4-3). Le test anova montre que la variable catégorielle de la composition est significative ($p < 0,0001$). Le test post-hoc montre des différences significatives par rapport à la monoculture (Qu) pour chaque composition de mélange, à l'exception de Fa_Qu (Figure 3.4-3).

Finalement, la part d'essences intolérantes à l'ombrage ($\%G_{\text{relative_intol}}$) est supérieure à 50 % pour toutes les compositions à l'exception de Fa_Qu, où elle est très légèrement inférieure à 50 %. Le test anova montre que la variable catégorielle de la composition est significative ($p < 0,000151$). Le test post-hoc ne montre pas de différence significative par rapport à la monoculture de chêne, sauf pour Fa_Qu ($p = 0,0003$) et Ac_Fa_Ps_Qu ($p = 0,0038$) (Figure 3.4-3).

3.4.1.2 Hauteur moyenne relative des chênes à l'échelle de la parcelle

La hauteur moyenne relative des chênes ($H_{\text{relative_parcelle}}$) décrit la structure verticale du peuplement. Cet indicateur prend en compte le rapport entre deux hauteurs moyennes de Lorey, celle des chênes uniquement ($H_{\text{moyenne_quercus}}$) et celle de l'ensemble des essences ($H_{\text{moyenne_parcelle}}$) (Tableau 2-4, Figure 3.4-2). Plus la hauteur moyenne des chênes (point rouge) est faible par rapport à celle du peuplement (colonne), plus la valeur de $H_{\text{relative_parcelle}}$ est faible.

À l'exception des parcelles feuillues (Qu et Fa_Qu), les hauteurs moyennes des chênes ($H_{moyenne_quercus}$) sont inférieures aux hauteurs moyennes de Lorey de l'ensemble des essences ($H_{moyenne_parcelle}$). Les hauteurs moyennes relatives ($H_{relative_parcelle}$) ne diffèrent pas significativement entre les deux blocs. Les écarts types montrent la dispersion des hauteurs observées dans une parcelle.

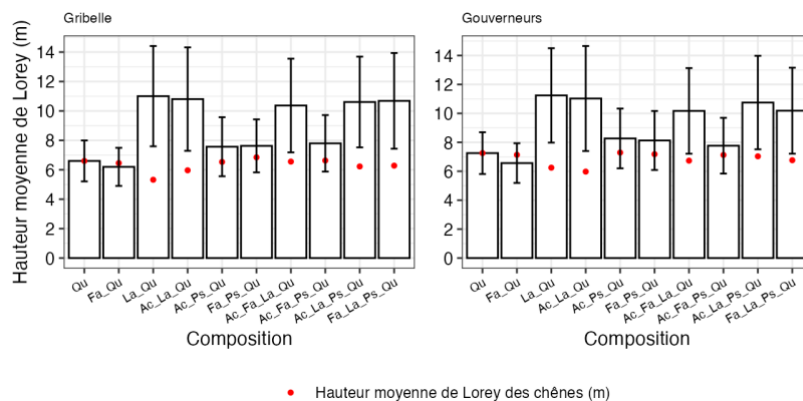


Figure 3.4-2 : Moyennes et écarts types des hauteurs moyennes de Lorey, à l'échelle de la parcelle ($H_{moyenne_parcelle}$), selon les compositions et les blocs (Gribelle et Gouverneurs).

La colonne présente la hauteur moyenne de Lorey de la parcelle, toutes essences confondues ($H_{moyenne_parcelle}$). Le point rouge matérialise la hauteur moyenne de Lorey des chênes uniquement ($H_{moyenne_quercus}$). L'indicateur $H_{relative_parcelle}$ correspond au rapport entre $H_{moyenne_quercus}$ et $H_{moyenne_parcelle}$.

La variable catégorielle de la composition est significative ($p < 0,0001$). Selon le test post-hoc, seule la composition Fa_Qu ne diffère pas significativement de la monoculture de chêne pour la valeur de $H_{relative_parcelle}$ (Figure 3.4-3). La hauteur relative à l'échelle de la parcelle ($H_{relative_parcelle}$) est significativement plus élevée à Gouverneurs ($p = 0,0119$).

3.4.1.3 Effets de la composition sur la concurrence globale

La monoculture de chêne (Qu) se situe systématiquement à l'extrême des proportions de surface terrière ($\%G_{relative_quercus}$, $\%G_{relative_resineux}$, $\%G_{relative_intol}$), par construction. La surface terrière totale de la parcelle ($G_{parcelle}$) y est également parmi les plus faibles (Figure 3.4-3).

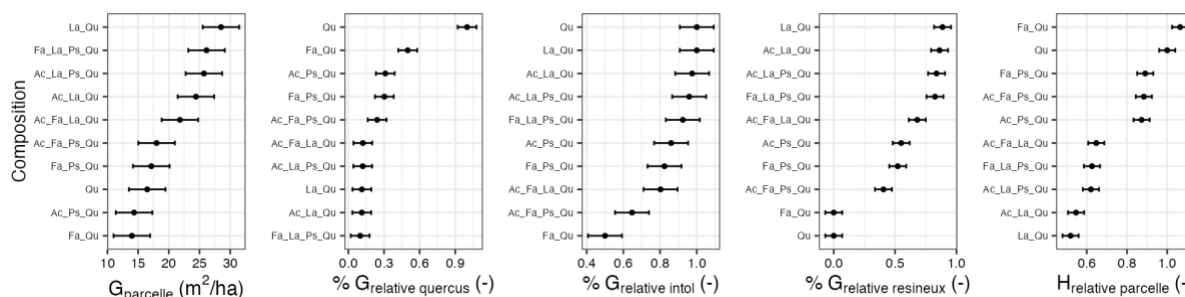


Figure 3.4-3 : Moyennes ajustées (en ordre décroissant) avec intervalle de confiance de 95% des cinq indicateurs de concurrence globale ($G_{parcelle}$, $\%G_{relative_quercus}$, $\%G_{relative_intol}$, $\%G_{relative_resineux}$, $H_{relative_parcelle}$), à l'échelle de la parcelle, selon les compositions (l'effet du bloc étant contrôlé).

Pour la hauteur moyenne relative à l'échelle de la parcelle ($H_{relative_parcelle}$), des écarts nets apparaissent entre les compositions contenant du mélèze ($< 0,7$), celles contenant du douglas (< 1) et les compositions exclusivement feuillues. Dans ces dernières (Qu et Fa_Qu), la hauteur moyenne relative à l'échelle de la parcelle est la plus élevée, avec des valeurs proches de 1.

3.4.2 Relations entre les indicateurs de concurrence globale

La relation entre la surface terrière totale (G_{parcelle}) et la hauteur moyenne relative à l'échelle de la parcelle ($H_{\text{relative_parcelle}}$) est négative et significative ($p < 0,0001$ et $R^2 = 0,69$). La surface terrière totale de la parcelle diminue avec l'augmentation de la hauteur relative. Les parcelles de Gribelle présentent globalement des surfaces terrières totales plus faibles et des hauteurs moyennes relatives plus faibles que à celles de Gouverneurs.

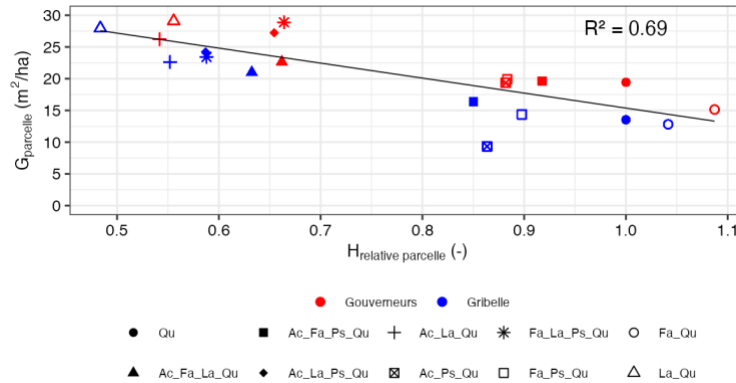


Figure 3.4-4 : Relation entre deux indicateurs de concurrence globale, la surface terrière totale (G_{parcelle}) et la hauteur moyenne relative des chênes à l'échelle de la parcelle ($H_{\text{relative_parcelle}}$).

Les différents indicateurs de composition et de structure globale sont globalement fortement corrélés entre eux. Les corrélations les plus élevées concernent notamment G_{parcelle} , $\%G_{\text{relative_resineux}}$ et $H_{\text{relative_parcelle}}$ (corrélation souvent $> 0,75$). En revanche, $\%G_{\text{relative_intol}}$ présente des corrélations plus faibles avec les autres variables (toujours $< 0,5$).

3.4.3 Relations entre le diamètre initial moyen et la concurrence globale

Les relations ne sont pas significatives pour la surface terrière totale (G_{parcelle}) et $\%G_{\text{relative_intol}}$ ($p = 0,31$ et $p = 0,79$). Les valeurs de R^2 s'élèvent respectivement à 0,05 et 0. La tendance non significative de la surface terrière totale (G_{parcelle}) est négative (Figure 3.4-5). La proportion des essences intolérantes à l'ombrage ($\%G_{\text{relative_intol}}$) ne semble avoir presque aucune influence sur le diamètre initial moyen des chênes cibles d'une parcelle.

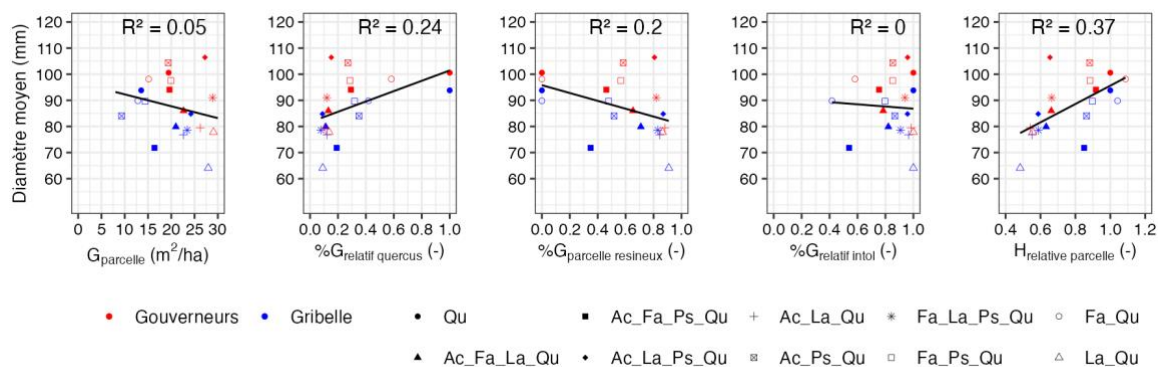


Figure 3.4-5 : Relation entre le diamètre moyen initial (hiver 2025-2026) des chênes cibles et les différents indicateurs de concurrence globale, selon les compositions et les blocs (Gouverneurs en rouge et Gribelle en bleu).

En revanche, la relation est significative pour la part de chênes ($\%G_{\text{relative_quercus}}$, $p = 0,0287$ et $R^2 = 0,24$) et la hauteur moyenne relative des chênes ($H_{\text{relative_parcelle}}$, $p = 0,00443$ et $R^2 = 0,37$). Dans les deux cas, la pente estimée est positive, montrant une grosseur initiale plus élevée dans les parcelles où les chênes contribuent davantage à la surface terrière et sont parmi les

essences les plus hautes. La relation impliquant la part de résineux (%G_{relative_resineux}) est à la limite de la signification ($p = 0,0508$ et $R^2 = 0,20$). Cette relation est négative, les chênes présentant des dimensions plus faibles dans les parcelles où les résineux représentent la majorité de la surface terrière.

3.5 Impacts de l'éclaircie sur la compétition locale

L'indice de compétition (NCI) varie significativement selon le statut des chênes cibles ($p = 0,00846$). Globalement, l'indice de compétition (NCI) diffère selon le statut d'éclaircie. En cohérence avec ce résultat, la médiane du NCI est systématiquement plus élevée pour les chênes témoins (C) que pour les chênes éclaircis (T) (Figure 3.5-1). Les comparaisons post-hoc montrent que cette différence entre chênes cibles témoins (C) et éclaircis (T) est significative dans la monoculture de chêne (Qu) ainsi que dans les mélanges La_Qu et Ac_Fa_La_Qu.

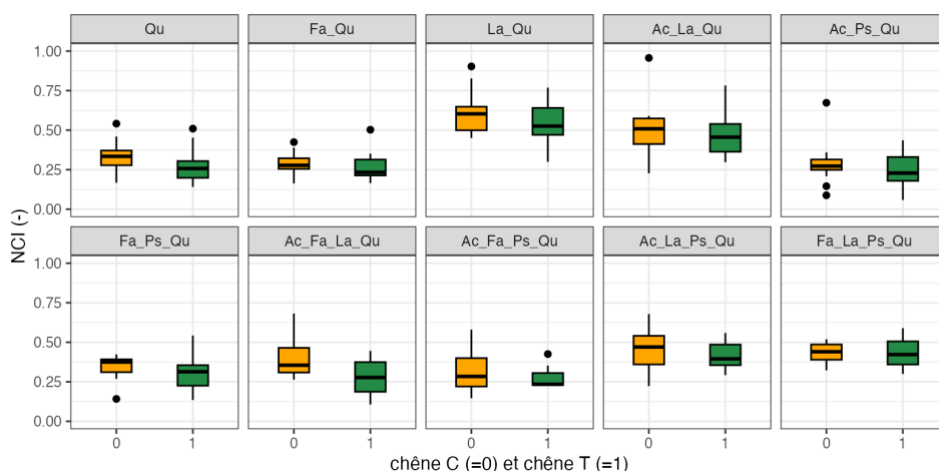


Figure 3.5-1 : Relation entre l'indice de compétition (NCI) et le statut de l'éclaircie (orange : chêne cible témoin (0) ; vert : chêne cible éclairci = 1).

L'éclaircissement relatif (ER) ainsi que la hauteur relative des chênes cibles par rapport à leur voisinage ($H_{relative_voisinage}$) tendent à être plus élevés pour les chênes cibles éclaircis, mais pas systématiquement (Figure annexe 16, Figure annexe 17). Globalement, ces deux indicateurs ne varient pas selon le statut des chênes cibles (p valeurs $> 0,05$).

Les chênes cibles éclaircis (T) ont été éclaircis selon différentes intensités locales (I_{g_local} , Figure 3.5-2). Cette intensité a un effet significatif sur les trois indicateurs de compétition locale, NCI ($p < 0,0001$, $R^2 = 0,22$), ER ($p = 0,0015$, $R^2 = 0,13$) et $H_{relative_voisinage}$ ($p < 0,0001$, $R^2 = 0,12$). Cet effet est observé toutes compositions confondues, l'interaction avec la variable catégorielle représentant la composition n'étant pas significative.

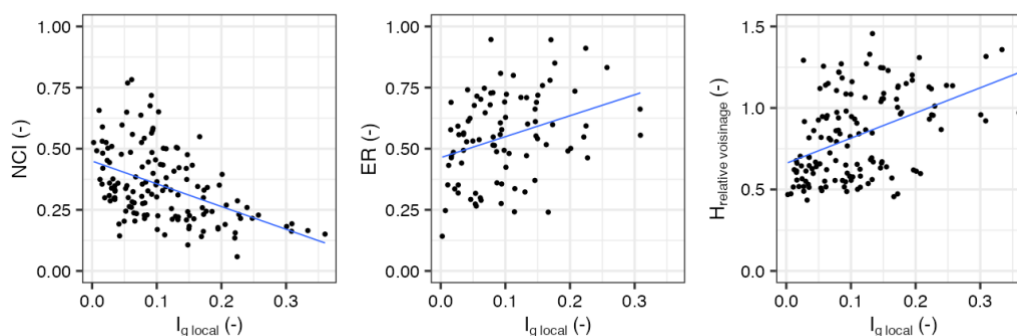


Figure 3.5-2 : Relations entre les indicateurs de compétition locale (NCI, ER, $H_{relative_voisinage}$) et de l'intensité locale de l'éclaircie (I_{g_local}) des chênes cibles éclaircis (T).

La relation est négative pour l'indice de compétition (NCI), et positive pour l'éclaircissement relatif (ER) et la hauteur relative du chêne cible par rapport au voisinage local ($H_{relative_voisinage}$). Ainsi, un chêne cible éclairci (T) plus intensément présente des valeurs d'indice de compétition (NCI) plus faibles. En revanche, l'éclaircissement relatif (ER) et la hauteur relative ($H_{relative_voisinage}$) augmentent avec l'intensité de l'éclaircie (I_{g_local}). Ainsi, la compétition actuelle (hiver 2025-2026) semble être liée à l'intensité locale de l'éclaircie conduite en 2024.

3.6 Modèles de croissance

Plusieurs variantes du modèle de référence sont présentées (M1 à M6). Deux approches ont été utilisées pour tenir compte de l'effet de l'éclaircie. Les trois premiers modèles (M1, M2 et M3) considèrent l'éclaircie comme une variable binaire, tandis que les derniers modèles (M4, M5 et M6) l'intègrent sous la forme de l'intensité de l'éclaircie à l'échelle locale (I_{g_local}). La première approche prend en compte à la fois les chênes cibles témoins (C) et éclaircis (T). La seconde approche ne considère que les chênes cibles éclaircis (T).

Pour chacune de ces deux approches, différentes variables représentatives de la composition ont été testées. Les indicateurs de concurrence globale retenus sont la surface terrière totale de la parcelle ($G_{parcelle}$) et la hauteur moyenne relative des chênes à l'échelle de la parcelle ($H_{relative_parcelle}$). La composition est également représentée par la variable catégorielle correspondant aux dix modalités de composition. Dans les modèles de la première approche (M1 à M3), l'indice de compétition (NCI) est la variable qui décrit le mieux la compétition locale et a donc été retenu. Dans les modèles de la seconde approche (M4 à M6), l'indice de compétition n'est pas conservé en raison de sa colinéarité avec l'intensité locale de l'éclaircie (I_{g_local}). Concernant l'effet de la taille initiale, la même variable est utilisée dans l'ensemble des modèles (M1 à M6). L'effet du bloc, visant à prendre en compte d'éventuelles différences entre les deux blocs, est conservé dans chaque modèle (M1-M6), même lorsque qu'il n'est significatif.

3.6.1 Modèles avec statut d'éclaircie binaire

Ce sous-chapitre se focalise sur l'évaluation des modèles M1, M2 et M3.

3.6.1.1 Représentation de la composition par les indicateurs de concurrence globale

Dans les modèles M1 et M2, l'effet de la composition est appréhendé respectivement à travers la surface terrière de la parcelle ($G_{parcelle}$) et la hauteur moyenne relative des chênes ($H_{relative_parcelle}$). Les R^2 marginaux sont respectivement de 0,44 et 0,41 (Tableau 3-1). Les deux modèles présentent des coefficients estimés similaires pour chacun des facteurs écologiques, à l'exception de l'indicateur de concurrence globale représentant la composition.

Tableau 3-1 : Estimations des coefficients (β) dans les modèles M1 et M2 et valeurs d'AIC et R^2 . Les p-valeurs (p) sont indiquées entre parenthèses.

	M1	M2
Intercept	+7,31 (p < 0,0001)	+6,70 (p < 0,0001)
Taille initiale (Diamètre initial _{relativisé_centré})	+5,48 (p < 0,0001)	+5,46 (p < 0,0001)
Compétition locale (NCI _{relativisé_centré})	-3,47 (p < 0,0001)	-3,48 (p < 0,0001)
Statut d'éclaircie (variable binaire)	+1,32 (p < 0,0001)	+1,32 (p < 0,0001)
Composition (M1 : $G_{parcelle_centrée}$) (M2 : $H_{relative_parcelle_centrée}$)	-0,302 (p = 0,000121)	+7,12 (p = 0,00196)
Statut d'éclaircie * Composition	+0,0663 (p = 0,163)	-1,30 (p = 0,335)
Bloc	+0,12 (p = 0,86)	+1,48 (p = 0,0562)

Tableau 3-1 - suite

AIC	1451	1444
R ² conditionnel	0,56	0,57
R ² marginal	0,44	0,41

L'intercept est proche de +7. Il correspond à l'accroissement attendu pour un chêne cible témoin (C), lorsque toutes les autres variables sont égales à zéro, c'est-à-dire à leur valeur moyenne puisqu'elles ont été centrées. La taille initiale a un effet positif sur l'accroissement, avec un coefficient proche de +5,5. À l'inverse, l'accroissement est négativement associé à la compétition locale ($NCI_{relativisé_centré}$), avec un coefficient estimé à -3,5. Le coefficient du statut d'éclaircie est estimé à +1,32 dans les deux modèles, ce qui correspond à la différence d'accroissement attendue entre les chênes cibles éclaircis (T) et témoins (C). L'interaction entre l'effet de l'éclaircie et la composition n'est pas significative dans les deux modèles (M1 et M2).

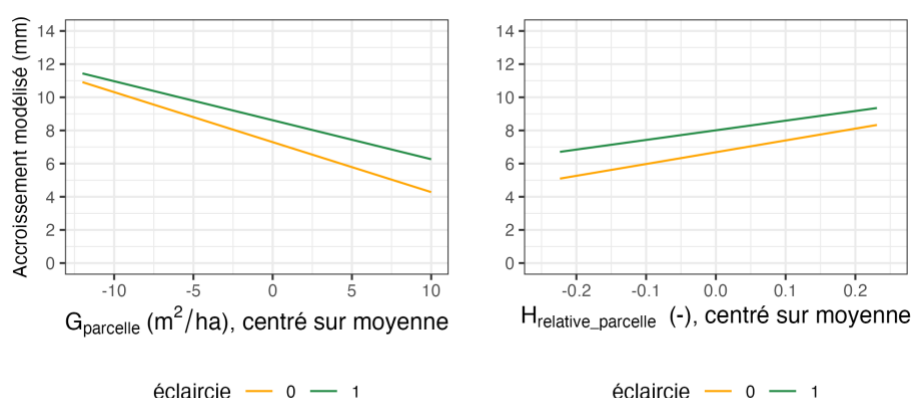


Figure 3.6-1 : Évolution de l'accroissement annuel en diamètre des chênes cibles témoin (C=0) et éclaircis (T=1), en fonction de la surface terrière totale de la parcelle ($G_{parcelle}$, modèle M1) et de la hauteur moyenne relative des chênes ($H_{relative_parcelle}$, modèle M2). Toutes les autres variables sont fixées à leur valeur moyenne.

La Figure 3.6-1 montre l'accroissement en fonction du statut des chênes cibles témoins (C) et éclaircis (T) et des indicateurs de concurrence globale. Selon les deux modèles, les chênes éclaircis (T) présentent un accroissement supérieur à celui des chênes témoins (C). Plus la surface terrière de la parcelle augmente, plus l'accroissement en diamètre diminue. À l'inverse, l'accroissement augmente avec la hauteur moyenne relative des chênes à l'échelle de la parcelle ($H_{relative_parcelle}$). Ces tendances correspondent aux coefficients estimés par les modèles (-0,302 et +7,11, Tableau 3-1).

Les droites de prédiction tendent à se rapprocher lorsque les indicateurs traduisent une concurrence globale plus faible, c'est-à-dire une surface terrière totale plus faible et une hauteur relative plus élevée. Toutefois, les interactions entre l'éclaircie et les indicateurs de concurrence globale ne sont significatives dans aucun des deux modèles (Tableau 3-1), ce qui indique que l'effet de l'éclaircie ne varie pas significativement selon le niveau de concurrence globale. Une tendance au rapprochement des droites peut néanmoins être observée visuellement.

3.6.1.2 Représentation de la composition par une variable catégorielle

Dans le modèle M3, la composition des parcelles est représentée par une variable catégorielle décrivant les essences présentes. La variable comprend 10 modalités, la monoculture de chêne, comme référence, et neuf mélanges (Tableau 3-2). Le test anova (Tableau annexe 1) montre des effets globaux significatifs de l'éclaircie et de la composition (respectivement $p < 0,0001$ et $p = 0,027$). Leur interaction n'est cependant pas significative ($p = 0,275$). Le Tableau 3-2 montre l'interaction pour chaque composition.

Tableau 3-2 : Estimations des coefficients (β) dans le modèle M3 et valeurs d'AIC et R^2 . Les p-valeurs (p) sont indiquées entre parenthèses.

	M3
Intercept	+7,10 (p = 0,000139)
Taille initiale (Diamètre initial _{relativisé_centré})	+5,37 (p < 0,0001)
Compétition locale (NCI _{relativisé_centré})	-3,52 (p < 0,0001)
Statut d'éclaircie (variable binaire)	+0,45 (p = 0,422)
Bloc	+1,25 (p = 0,0804)
Fa_Qu	-0,038 (p = 0,979)
La_Qu	-4,511 (p = 0,011)
Ac_La_Qu	-3,130 (p = 0,059)
Ac_Ps_Qu	+1,434 (p = 0,350)
Fa_Ps_Qu	+1,334 (p = 0,383)
Ac_Fa_La_Qu	-0,583 (p=0,700)
Ac_Fa_Ps_Qu	+1,142 (p = 0,456)
Ac_La_Ps_Qu	+0,543 (p = 0,722)
Fa_La_Ps_Qu	-1,322 (p = 0,398)
Statut d'éclaircie : Fa_Qu	+2,041 (p = 0,034)
Statut d'éclaircie : La_Qu	+2,464 (p = 0,009)
Statut d'éclaircie : Ac_La_Qu	+1,053 (p = 0,345)
Statut d'éclaircie : Ac_Ps_Qu	+0,146 (p = 0,895)
Statut d'éclaircie : Fa_Ps_Qu	+0,432 (p = 0,690)
Statut d'éclaircie : Ac_Fa_La_Qu	+1,271 (p = 0,297)
Statut d'éclaircie : Ac_Fa_Ps_Qu	+0,929 (p = 0,462)
Statut d'éclaircie : Ac_La_Ps_Qu	+0,311 (p = 0,796)
Statut d'éclaircie : Fa_La_Ps_Qu	+0,037 (p = 0,976)
AIC	1423
R^2 conditionnel	0,59
R^2 marginal	0,47

Le modèle M3 montre des effets similaires à ceux des modèles M1 et M2. Le R^2 marginal (0,47) est dans le même ordre de grandeur. L'intercept, la taille initiale et la compétition du voisinage local présentent des effets estimés similaires à ceux décrites pour les modèles M1 et M2. La composition étant représentée par une variable catégorielle, son effet est estimé à travers neuf modalités comparées à la monoculture de chêne (Qu). L'effet de l'éclaircie peut donc être interprété pour chaque composition. Dans la monoculture, l'effet de l'éclaircie est positif mais n'est pas significatif (p = 0,422, Tableau 3-2). Des effets significatifs de l'éclaircie sont toutefois observés dans les mélanges Fa_Qu et La_Qu (Tableau 3-2, Figure 3.6-2).

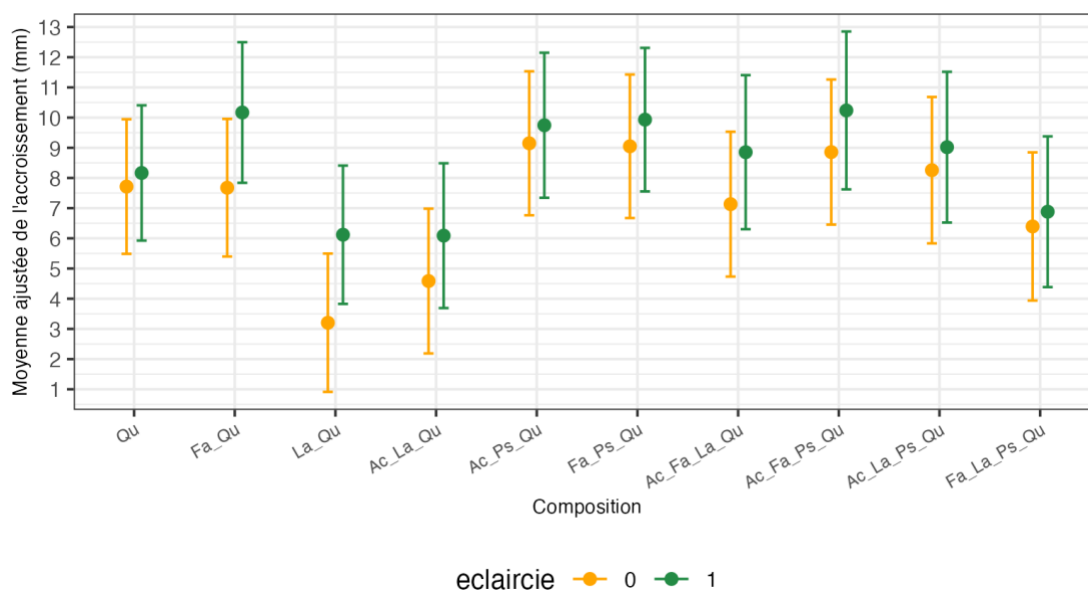


Figure 3.6-2 : Moyennes ajustées (dans M3) avec intervalle de confiance de 95 %, des accroissements annuels en diamètre de chênes cibles témoins ($C = 0$) et chênes cibles éclaircis ($T = 1$), selon les compositions. Toutes les autres variables sont fixées à leur valeur moyenne.

Les moyennes ajustées tiennent compte des autres facteurs écologiques contrôlés dans le modèle et montrent donc l'effet propre de l'éclaircie (Figure 3.6-2). Globalement, les chênes cibles éclaircis (T) présentent systématiquement des moyennes ajustées plus élevées que les chênes cibles témoins (C), ce qui indique un accroissement plus important chez les chênes cibles éclaircis. Les différences les plus marquées sont observées pour les mélanges Fa_Qu et La_Qu (Tableau 3-2, Figure 3.6-2).

Comme l'illustre la Figure 3.6-3, les valeurs prédites par le modèle sont globalement bien réparties le long de la bissectrice, indiquant une bonne concordance entre l'accroissement modélisé et mesuré.

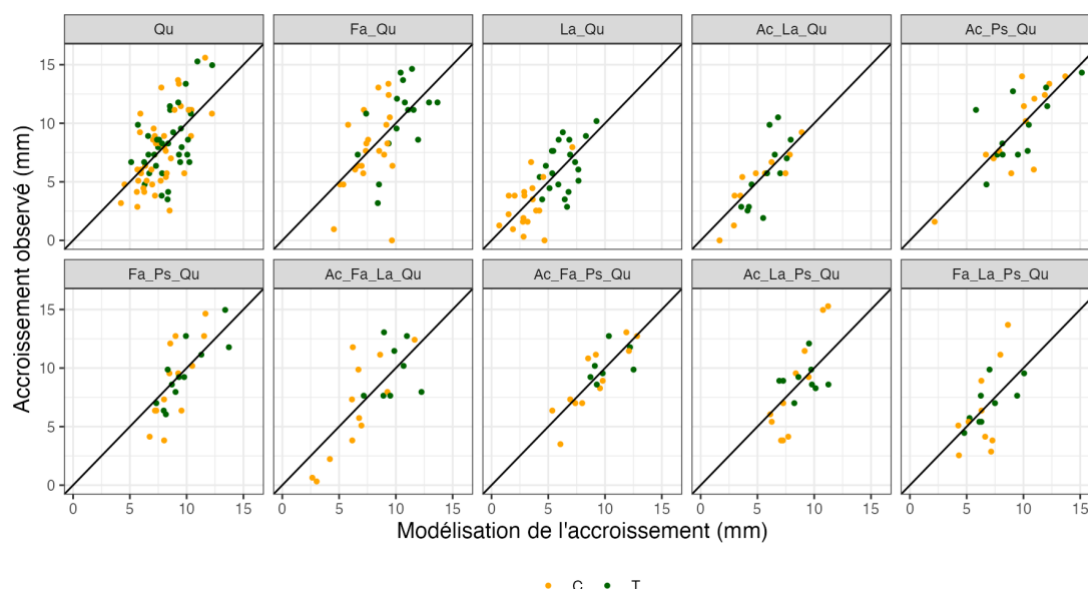


Figure 3.6-3 : Comparaison des accroissements modélisés par le modèle M3 et des accroissements mesurés sur le terrain, pour les chênes cibles témoins (C) et éclaircis (T), selon les compositions.

Les accroissements se situent dans des gammes différentes selon les compositions. Les accroissements en diamètre les plus élevés atteignent environ 15 mm dans la monoculture ainsi que dans les mélanges Fa_Qu, Ac_Ps_Qu, Fa_Ps_Qu et Ac_La_Ps_Qu. En cohérence

avec la Figure 3.6-2, les accroissements sont visiblement plus faibles dans les mélanges Ac_La_Qu et La_Qu, où les valeurs observées et prédites dépassent rarement 10 mm.

La Figure 3.6-3 distingue également les chênes cibles témoins (C) et éclaircis (T). Les deux groupes apparaissent visiblement séparés dans les compositions La_Qu et Fa_Qu. Dans ces deux cas, les chênes éclaircis (T) se situent davantage dans les gammes d'accroissement les plus élevées.

Les figures équivalentes pour les modèles M1 et M2 sont très similaires et conduisent à une interprétation identique. Elles sont présentées en annexe (Figure annexe 10, Figure annexe 11).

3.6.2 Modèles avec intensité locale de l'éclaircie

Ce sous chapitre se focalise sur les modèles M4, M5 et M6.

3.6.2.1 *Représentation de la composition par les indicateurs de concurrence globale*

Dans les modèles M4 et M5, l'effet de la composition est appréhendé respectivement à travers la surface terrière totale de la parcelle (G_{parcelle}) et la hauteur moyenne relative des chênes ($H_{\text{relative_parcelle}}$).

Les signes et les coefficients des variables communes sont globalement similaires à ceux observés dans les modèles M1 et M2 (Tableau 3-3). Les R^2 marginaux sont respectivement de 0,37 et 0,32, soit des valeurs plus faibles que celles obtenues pour les modèles M1, M2 et M3.

Tableau 3-3 : Estimations des coefficients (β) dans les modèles M4 et M5 et valeurs d'AIC et R^2 . Les p-valeurs (p) sont indiquées entre parenthèses.

	M4	M5
Intercept	+8,42 ($p < 0,0001$)	+7,89 ($p < 0,0001$)
Taille initiale (Diamètre initial _{relativisé_centré})	+4,50 ($p < 0,0001$)	+4,61 ($p < 0,0001$)
Intensité locale de l'éclaircie ($I_{g_local_centré}$)	+5,96 ($p = 0,0571$)	+6,27 ($p = 0,0673$)
Composition (M4 : $G_{\text{parcelle_centrée}}$) (M5 : $H_{\text{relative_parcelle_centrée}}$)	-0,180 ($p = 0,00842$)	+4,45 ($p = 0,0343$)
Intensité locale de l'éclaircie * Composition	-1,14 ($p = 0,055$)	+17,1 ($p = 0,306$)
Bloc	-0,0290 ($p = 0,965$)	+1,18 ($p = 0,112$)
AIC	651	644
R^2 conditionnel	0,47	0,48
R^2 marginal	0,37	0,32

Les intercepts des modèles M4 et M5 sont estimés respectivement à 8,42 et 7,89, et correspondent à l'accroissement attendu d'un chêne cible dans des conditions moyennes. La taille initiale présente un effet positif (respectivement 4,50 et 4,61) sur l'accroissement et cet effet est significatif dans les deux modèles. Les indicateurs de concurrence globale présentent également un effet significatif. Dans le modèle M4, la surface terrière totale de la parcelle ($G_{\text{parcelle_centrée}}$) est estimée à -0,180, tandis que dans le modèle M5, la hauteur moyenne relative des chênes ($H_{\text{relative_parcelle_centrée}}$) est estimée à +4,45. L'effet de l'intensité locale de l'éclaircie ($I_{g_local_centré}$) est proche du seuil de la significativité dans les deux modèles (Tableau 3-3). Cet effet est estimé respectivement à +5,96 et +6,27 dans les modèles M4 et M5. L'interaction entre l'intensité de l'éclaircie et la concurrence globale est à la limite de la significativité pour la surface terrière totale de la parcelle ($G_{\text{parcelle_centrée}}$; $p = 0,055$, Tableau

3-3), mais n'est pas significative pour la hauteur moyenne relative des chênes ($H_{relative_parcelle_centrée}$; $p = 0,306$, Tableau 3-3). Les résultats de ces modèles ne mettent donc pas en évidence de variation significative de l'effet de l'intensité de l'éclaircie selon la surface terrière de la parcelle ni selon la hauteur relative des chênes.

La Figure 3.6-4 montre les droites de prédiction du modèle M4 pour différentes valeurs de surface terrière totale de la parcelle ($G_{parcelle_centrée}$), correspondant aux différentes compositions. La pente de ces droites dépend des coefficients estimés par le modèle M4 ($5,96 - 1,14 \times G_{parcelle_centrée}$, Tableau 3-3). Plus la surface terrière totale centrée est élevée, plus la pente décrivant l'accroissement selon l'intensité de l'éclaircie ($I_{g_local_centré}$) s'aplatit. Pour les compositions présentant les surfaces terrières les plus élevées, la pente devient même négative.

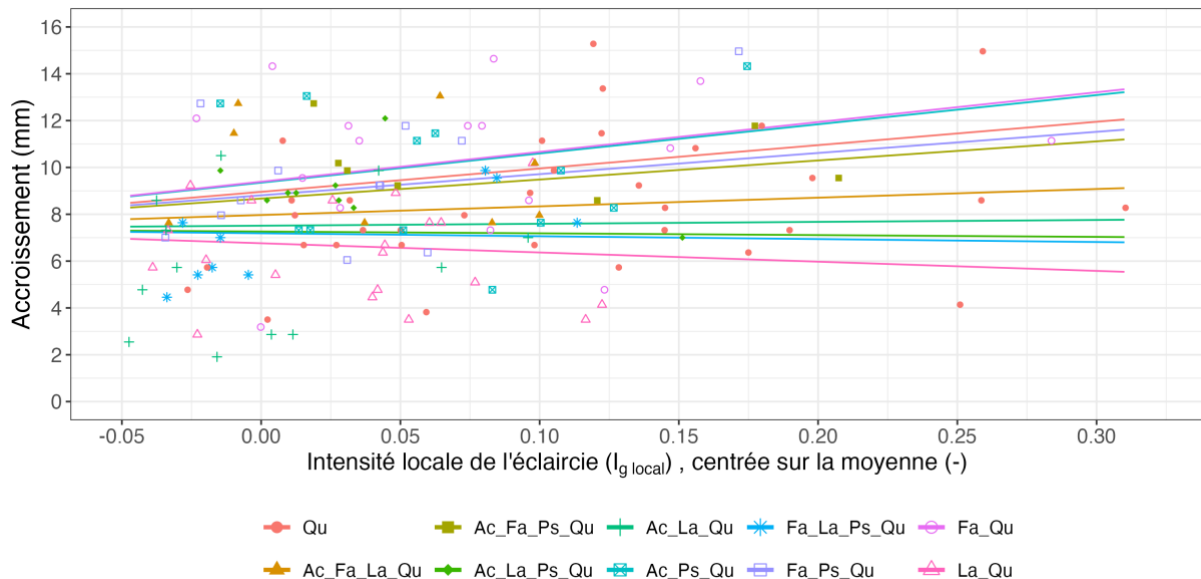


Figure 3.6-4 : Évolution de l'accroissement annuel en diamètre des chênes éclaircis en fonction de l'intensité locale de l'éclaircie centrée sur la moyenne, selon le modèle M4. Chaque droite représente l'évolution prédite d'une des 10 compositions, en fixant la surface terrière ($G_{parcelle_centrée}$) au niveau correspondant.

L'ordre des droites, du haut vers le bas : Fa_Qu ; Ac_Ps_Qu ; Qu ; Fa_Ps_Qu ; Ac_Fa_Ps_Qu ; Ac_Fa_La_Qu ; Ac_La_Qu ; Ac_La_Ps_Qu ; Fa_La_Ps_Qu ; La_Qu.

La composition Fa_Qu présente la pente positive la plus élevée. La monoculture de chêne, elle aussi caractérisée par une faible valeur de $G_{parcelle_centrée}$, figure également parmi les compositions présentant les pentes les plus fortes. Les compositions associées à des pentes plus élevées montrent donc une augmentation plus importante de l'accroissement prédit lorsque l'intensité de l'éclaircie augmente. Pour les compositions comme La_Qu, Fa_La_Ps_Qu et Ac_La_Ps_Qu, cette pente est négative, indiquant une diminution de l'accroissement prédit lorsque l'intensité de l'éclaircie augmente. En Ac_La_Qu, la pente est quasi nulle, indiquant une faible variation de l'accroissement prédit selon l'intensité de l'éclaircie. La Figure 3.6-4 montre ainsi que les compositions caractérisées par une faible surface terrière ($G_{parcelle_centrée}$) présentent des accroissements prédits plus élevés (intercepts plus élevés) et des pentes généralement plus positives que les compositions à surface terrière plus élevée.

La Figure 3.6-5 illustre la performance du modèle M4 en comparant les accroissements observés et prédits. Les accroissements sont les plus faibles dans les mélanges La_Qu et Ac_La_Qu, avec des valeurs mesurées et prédites dépassant rarement 10 mm. Dans d'autres parcelles, comme la monoculture ou Fa_Qu, Ac_Ps_Qu ou Fa_Ps_Qu, les accroissements mesurés dépassent souvent 10 mm.

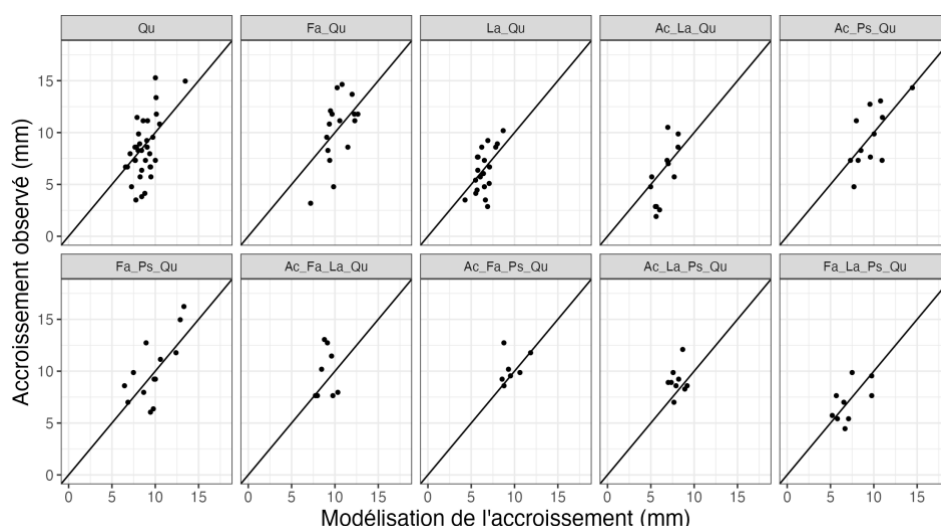


Figure 3.6-5 : Comparaison des accroissements modélisés par le modèle M4 et des accroissements mesurés sur le terrain pour les chênes cibles éclaircis (T), selon les compositions.

La Figure 3.6-5 indique également le nombre d'observations disponibles par composition. Ce nombre est parfois limité à sept ou huit chênes cibles éclaircis (T) par composition. De manière générale, les points suivent la bissectrice, bien que la concordance entre les valeurs observées et prédites soit moins marquée que pour les modèles M1, M2 et M3. Les figures correspondantes pour les modèles M5 et M6 sont présentées en annexe (Figure annexe 12, Figure annexe 13). Elles conduisent à une interprétation similaire.

La Figure 3.6-6 montre les droites de prédiction du modèle M5 pour différentes valeurs de hauteur moyenne relative des chênes à l'échelle de la parcelle ($H_{relative_parcelle_centrée}$), correspondant aux différentes compositions. La pente de ces droites dépend des coefficients estimés par le modèle M5 ($6,27 + 17,1 \times H_{relative_parcelle_centrée}$, Tableau 3-3). Toutes les pentes sont positives, ce qui indique une augmentation de l'accroissement prédit lorsque l'intensité de l'éclaircie augmente, quelle que soit la concurrence globale de la composition.

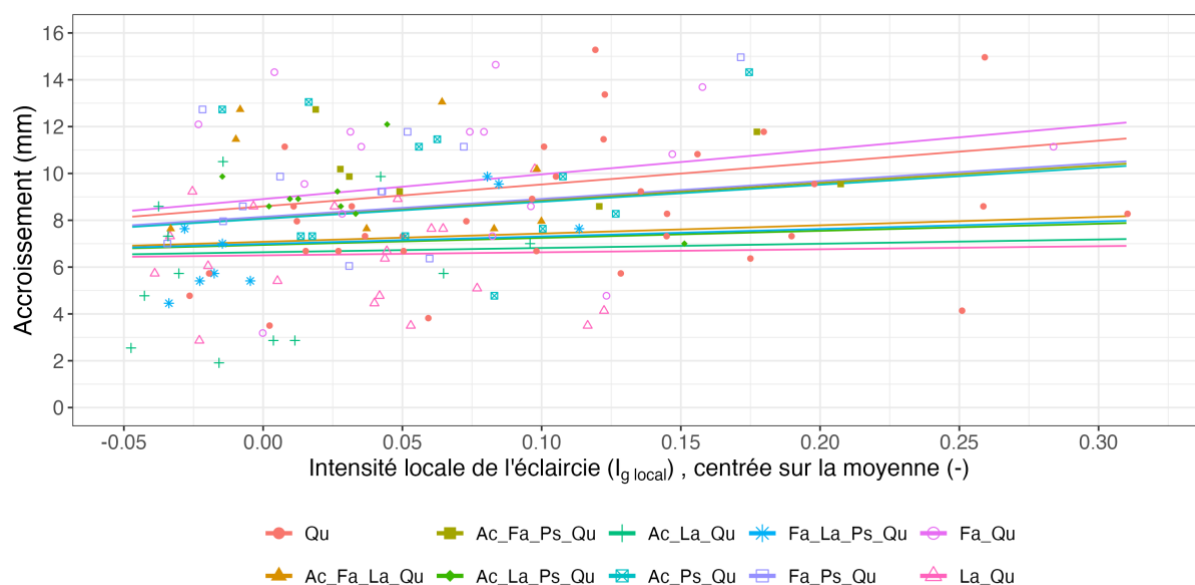


Figure 3.6-6 : Évolution de l'accroissement annuel en diamètre des chênes éclaircis en fonction de l'intensité locale de l'éclaircie centrée sur la moyenne, selon le modèle M5. Chaque droite représente l'évolution prédite d'une des 10 compositions, en fixant la hauteur moyenne relative des chênes ($H_{relative_parcelle_centrée}$) au niveau correspondant.

L'ordre des droites, du haut vers le bas : Fa_Qu ; Qu ; Fa_Ps_Qu ; Ac_Fa_Ps_Qu ; Ac_Ps_Qu ; Ac_Fa_La_Qu ; Fa_La_Ps_Qu ; Ac_La_Ps_Qu ; Ac_La_Qu ; La_Qu.

Les compositions Fa_Qu et Qu, qui présentent les valeurs les plus élevées de $H_{relative_parcelle_centrée}$, sont également celles pour lesquelles les pentes estimées sont les plus positives. Inversement, les compositions présentant des valeurs plus faibles de $H_{relative_parcelle_centrée}$ sont associées à des pentes plus faibles. Toutefois, l'interaction entre l'intensité de l'éclaircie et $H_{relative_parcelle_centrée}$ n'étant pas significative (Tableau 3-3), ces différences doivent être considérées comme des tendances visuelles. Les résultats indiquent globalement que l'effet de l'éclaircie ne varie pas significativement selon $H_{relative_parcelle_centrée}$.

3.6.2.2 Représentation de la composition par une variable catégorielle

Le modèle M6 présente un R^2 marginal (0,41) plus élevé que ceux des modèles M4 et M5 (t 3 4). Selon le test anova, la variable catégorielle de composition présente un effet significatif sur l'accroissement ($p = 0,0365$). Bien qu'un effet positif et significatif de l'intensité de l'éclaircie soit observé dans la composition de référence, c'est-à-dire la monoculture de chêne (Tableau 3-4), le test anova indique que l'effet global de l'intensité de l'éclaircie ($I_{g_local_centré}$) n'est pas significatif ($p = 0,430$, Tableau annexe 2). L'interaction entre l'intensité de l'éclaircie et la composition n'est globalement pas significative ($p = 0,554$), ce qui indique que cet effet ne varie pas significativement selon les compositions.

Tableau 3-4 : Estimations des coefficients (β) dans le modèle M6 et valeurs d'AIC et R^2 . Les p -valeurs (p) sont indiquées entre parenthèses.

	M6
Intercept	+6,48 ($p < 0,0001$)
Taille initiale (diamètre initialrelativisé_centré)	+4,10 ($p = 0,000138$)
Intensité locale de l'éclaircie ($I_{g_local_centré}$)	+14,0 ($p = 0,00466$)
Bloc	+1,16 ($p = 0,0778$)
Fa_Qu	+2,87 ($p = 0,0553$)
La_Qu	-0,532 ($p = 0,682$)
Ac_La_Qu	-0,923 ($p = 0,483$)
Ac_Ps_Qu	+2,66 ($p = 0,0968$)
Fa_Ps_Qu	+2,32 ($p = 0,110$)
Ac_Fa_La_Qu	+2,83 ($p=0,0840$)
Ac_Fa_Ps_Qu	+3,54 ($p = 0,0534$)
Ac_La_Ps_Qu	+2,75 ($p = 0,0780$)
Fa_La_Ps_Qu	-0,52 ($p = 0,707$)
Intensité locale de l'éclaircie : Fa_Qu	-8,99 ($p = 0,335$)
Intensité locale de l'éclaircie : La_Qu	-19,0 ($p = 0,121$)
Intensité locale de l'éclaircie : Ac_La_Qu	-11,3 ($p = 0,484$)
Intensité locale de l'éclaircie : Ac_Ps_Qu	-11,3 ($p = 0,415$)
Intensité locale de l'éclaircie : Fa_Ps_Qu	+3,20 ($p = 0,792$)
Intensité locale de l'éclaircie : Ac_Fa_La_Qu	-19,4 ($p = 0,302$)
Intensité locale de l'éclaircie : Ac_Fa_Ps_Qu	-15,1 ($p = 0,252$)
Intensité locale de l'éclaircie : Ac_La_Ps_Qu	-31,6 ($p = 0,0983$)
Intensité locale de l'éclaircie : Fa_La_Ps_Qu	+6,97 ($p = 0,653$)
AIC	585
R^2 conditionnel	0,48
R^2 marginal	0,41

Les estimations des variables restantes sont similaires à celles obtenues pour les modèles M4 et M5 (Tableau 3-3, Tableau 3-4). L'intercept de +6,48 correspond à l'accroissement attendu des chênes cibles dans la composition de référence, la monoculture de chêne (Qu). Les coefficients des autres compositions indiquent leur différence d'accroissement par rapport à cette composition de référence (Qu). En cohérence avec les autres modèles de croissance, la taille initiale est significative ($p = 0,000138$) et présente un effet positif (+4,10) (Tableau 3-4). Dans le modèle M6, le coefficient de l'intensité de l'éclaircie est significatif et estimé à +14,0 pour la composition de référence.

L'interaction n'étant pas significative ($p = 0,554$), les différences de pente entre les compositions ne sont pas significatives (Figure 3.6-7). Les pentes les plus positives sont observées pour les compositions Qu, Fa_Ps_Qu et Fa_La_Ps_Qu. Pour une intensité d'éclaircie moyenne, les compositions présentant les accroissements prédits les plus élevés sont Fa_Qu, Ac_Ps_Qu et Fa_Ps_Qu. (Figure 3.6-7, Figure annexe 13). L'éclaircie et l'interaction n'étant pas significatifs, ces résultats doivent être interprétés prudemment.

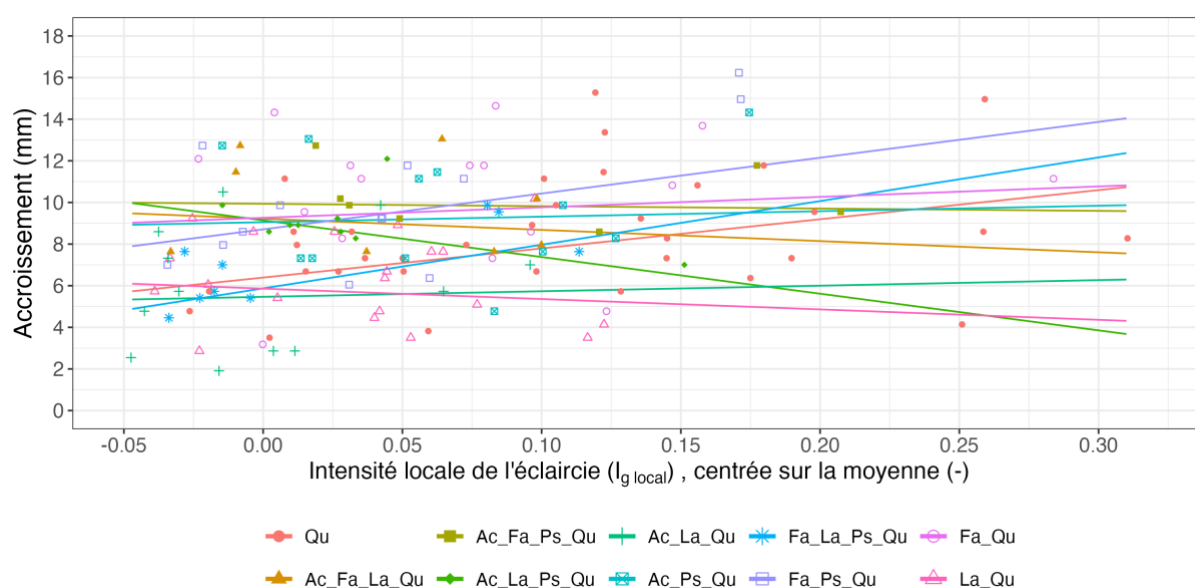


Figure 3.6-7 : Évolution de l'accroissement annuel en diamètre des chênes éclaircis en fonction de l'intensité locale de l'éclaircie centrée sur la moyenne, selon le modèle M6. Chaque droite représente l'évolution prédite, en fixant un niveau parmi 10 modalités de la variable catégorielle de la composition.

4 Discussion

4.1 Effets de la composition sur les déterminants de la croissance des chênes cibles

4.1.1 Effets de la sélection et de la composition sur la taille initiale des chênes cibles

Cette sélection, réalisée parmi les plus gros chênes de chaque parcelle (Figure 3.1-1), correspond aux pratiques sylvicoles classiques appliquées aux arbres cibles (Allegrini & Depierre, 2006). La comparabilité initiale des chênes cibles témoins (C) et éclaircis (T) suggère que les différences d'accroissement observées par la suite ne résultent pas d'un biais lié à la taille initiale des chênes cibles.

La taille initiale des arbres peut être interprétée comme un reflet de l'accès passé aux ressources, à espèce, âge et site fixés (Bhandari et al., 2021 ; Canham et al., 2004). À FORBIO, l'âge étant identique pour les chênes cibles, leur diamètre initial peut ainsi refléter une partie de la compétition cumulée depuis la plantation. Les compositions où les chênes présentent les plus faibles diamètres initiaux (La_Qu et Ac_La_Qu, Figure 3.1-2, Figure 3.1-3) se caractérisent également par les plus fortes surfaces terrières totales et proportions de résineux (Figure 3.4-1, Figure 3.4-5), les hauteurs moyennes relatives des chênes plus faibles ($H_{relative_parcelle}$, Figure 3.4-3) et des niveaux de compétition locale plus élevés (Figure 3.3-4, Figure annexe 7, Figure annexe 8, Figure annexe 9). La plus faible taille initiale des chênes cibles dans ces mélanges semble donc associée à une compétition plus forte, liée à la présence de résineux et surtout le mélèze. Cette observation est cohérente avec Canham et al. (2006), qui montrent qu'une compétition plus élevée conduit à des tailles plus faibles à âge égal.

4.1.2 Effets de la composition sur l'éclaircie locale (à l'échelle des chênes cibles) et globale (à l'échelle du peuplement)

4.1.2.1 Nature d'éclaircie selon les compositions

Le fait que la composition ait un effet significatif sur le caractère libérateur de l'éclaircie vis-à-vis de la compétition pour la lumière ($Nature_{locale}$ et $Nature_{parcelle}$) est probablement lié aux différences de structure verticale entre les compositions, et donc à la présence d'essences à forte croissance juvénile, comme le mélèze (Wallonie environnement SPW, n.d.). Cela est suggéré par le fait que les différences de nature de l'éclaircie ($Nature_{locale}$ et $Nature_{parcelle}$) sont surtout observables entre la monoculture de chêne et le mélange La_Qu (Figure 3.2-1, Figure 3.2-5 et Figure 3.2-4). Les mélèzes, qui y représentent théoriquement la moitié des tiges, contribuent majoritairement à la surface terrière totale (Figure 3.4-1). De plus, leur dominance verticale est également suggérée par la Figure 3.4-2. Les compétiteurs enlevés autour des chênes cibles étaient donc probablement plus gros et plus hauts que ces derniers. Il est donc probable que l'enlèvement de ces arbres ait davantage libéré l'accès à la lumière pour les chênes cibles (Bauhus et al., 2017). En outre, le mélèze est très sensible à la compétition latérale (Wallonie environnement SPW, n.d.). En mélange, sa croissance pourrait donc être favorisée par une moindre compétition latérale entre congénères. Cette dynamique pourrait renforcer sa dominance dans le peuplement et contribuer à expliquer les valeurs significativement plus élevées de $Nature_{locale}$ et de $Nature_{parcelle}$ observées dans le mélange La_Qu. Les arbres retirés lors de l'éclaircie sont alors susceptibles d'être plus hauts et plus gros que les chênes cibles, ce qui accentue le caractère libérateur de l'intervention. L'effet du mélèze est le plus prononcé dans La_Qu, mais il reste bien visible dans la majorité des compositions contenant cette essence.

En cohérence, pour les indicateurs à l'échelle locale et globale ($Nature_{locale}$ et $Nature_{parcelle}$), une compétition davantage levée par le haut est observée dans les parcelles présentant une surface terrière totale ($G_{parcelle}$) et une proportion de résineux ($\%G_{relative_resineux}$) élevées (Figure annexe 1, Figure annexe 4). À l'inverse, lorsque la hauteur moyenne relative des chênes ($H_{relative_parcelle}$) augmente, les chênes cibles sont moins dominés par les compétiteurs voisins et le caractère libérateur vis-à-vis de la compétition par le haut diminue. Le caractère libérateur de l'éclaircie ($Nature_{locale}$ et $Nature_{parcelle}$) dépend donc au moins en partie de la composition et de la structure du peuplement. Sur le plan écologique, cela est cohérent, car le besoin de l'éclaircie, tel que choisi par les gestionnaires sur le terrain, dépend inévitablement de l'environnement immédiat de l'arbre cible (Bauhus et al., 2017).

4.1.2.2 Surface terrière retirée selon les compositions

Les quantités plus importantes de matériel retiré (Figure 3.2-2, Figure 3.2-6) dans les mélanges contenant du mélèze, et particulièrement dans La_Qu, sont cohérentes avec la forte dominance du mélèze dans ces peuplements (Figure 3.3-4, Figure 3.4-3). Sa forte croissance juvénile lui permet d'occuper rapidement l'espace disponible, et cette croissance peut être renforcée en mélange par une moindre compétition latérale entre congénères. Sa position dominante dans le couvert augmente alors la probabilité que les arbres supprimés lors de l'éclaircie soient de diamètres élevés. L'éclaircie retire ainsi davantage de surface terrière, tant à l'échelle du voisinage du chêne cible ($g_{enlevée_voisinage_local}$) qu'à celle de la parcelle ($g_{enlevée_parcelle}$).

Les relations observées avec les indicateurs de concurrence globale vont dans le même sens (Figure annexe 2). Les quantités de matériel retiré augmentent, aux deux échelles, avec une concurrence globale croissante. Ces résultats suggèrent que l'intensité absolue de l'éclaircie dépend en partie de la structure et de la composition du peuplement, qui conditionnent le besoin individuel d'intervention autour des chênes cibles.

4.1.2.3 Intensité d'éclaircie selon les compositions

Contrairement aux indicateurs d'éclaircies décrivant la nature et de la quantité enlevée en absolu, l'intensité locale (I_{g_local}) et globale ($I_{g_parcelle}$) présentent des tendances opposées (Figure annexe 3, Figure annexe 6).

La tendance générale montre une diminution de l'intensité de l'éclaircie (I_{g_local}) lorsque la concurrence globale augmente (Figure 3.2-3, Figure 3.2-4, Figure annexe 3). Cela peut être expliqué par le fait que la définition du voisinage local tient compte des effets compétitifs différents des essences voisines. Dans les compositions Qu et Fa_Qu, le rayon limite est de 3,5 m, alors que dans les autres mélanges, contenant des résineux, ce rayon est augmenté à 5 m pour le douglas et 6,5 m pour le mélèze. Les gestionnaires ayant systématiquement retiré au maximum deux compétiteurs par chêne cible, une même intervention représente donc une réduction proportionnellement plus faible de la compétition locale initiale dans les mélanges contenant des résineux, où la concurrence initiale ($G_{parcelle}$) est plus élevée (Figure 3.4-1). Ce résultat est cohérent avec une observation faite par Ulbricht et al. (2026).

L'intensité de l'éclaircie à l'échelle de la parcelle ($I_{g_parcelle}$) présente une tendance inverse. Elle augmente avec la concurrence globale (Figure 3.2-7, Figure 3.2-8, Figure annexe 6). L'intensité de l'éclaircie ($I_{g_parcelle}$) est donc plus forte dans les compositions caractérisées par une concurrence globale élevée, ce qui suggère que les gestionnaires ont adapté leurs interventions aux besoins d'éclaircie du peuplement.

Les tendances opposées de l'intensité de l'éclaircie aux deux échelles suggèrent que les relations observées pour I_{g_local} sont en grande partie déterminées par les modalités de définition du voisinage local plutôt que par une différence réelle d'intensité d'intervention entre compositions.

4.1.3 Effets de la composition sur la compétition locale et l'accès aux ressources

Les résultats montrent que les mélanges contenant du mélèze présentent systématiquement les niveaux de compétition les plus élevés. Cette observation est cohérente avec les interprétations précédentes concernant la taille initiale des chênes et les caractéristiques de l'éclaircie.

Cette tendance se traduit de manière cohérente dans les trois indicateurs de compétition locale. L'indice de compétition (NCI), dont les valeurs sont du même ordre de grandeur que celles rapportées par Canham et al. (2006), est le plus élevé dans les compositions contenant du mélèze, alors qu'il est parmi les plus faibles en monoculture de chêne (Qu) (Figure 3.3-1). De même, l'éclairement relatif (ER), dont la gamme est comparable à celle observée par Canham et al. (2004), diminue dans les mélanges avec mélèze, traduisant un accès plus limité à la lumière (Figure 3.3-2). Enfin, la hauteur relative des chênes cibles par rapport au voisinage local ($H_{\text{relative_voisinage}}$) confirme cette tendance (Figure 3.3-3). Les chênes cibles sont en moyenne codominants, voire dominants, en monoculture et en Fa_Qu, tandis qu'ils sont davantage dominés dans les mélanges contenant des résineux, en particulier le mélèze.

Les relations avec les indicateurs de concurrence globale confirment cette interprétation. L'indice de compétition (NCI) augmente avec la surface terrière totale, la part de résineux et la part d'essences intolérantes à l'ombrage, tandis qu'il diminue lorsque la hauteur moyenne relative des chênes à l'échelle de la parcelle ($H_{\text{relative_parcelle}}$) augmente (Figure annexe 7). À l'inverse, l'éclairement relatif (ER) et la hauteur relative des chênes cibles par rapport au voisinage local ($H_{\text{relative_voisinage}}$) diminuent dans les contextes de concurrence globale élevée (Figure annexe 8, Figure annexe 9). Ces tendances indiquent que les chênes cibles disposent d'un meilleur accès aux ressources, en particulier à la lumière, dans les compositions où les chênes sont globalement moins dominés et plus abondants (Bhandari et al., 2021 ; Boivin, 2010 ; Coomes & Allen, 2007).

Les relations entre les trois indicateurs de compétition locale confirment leur cohérence écologique (Figure 3.3-4, Figure 3.3-5). L'indice de compétition (NCI) tend à diminuer avec l'éclairement relatif (ER), suggérant qu'une compétition locale plus élevée est associée à un accès plus limité à la lumière. Cette tendance est cohérente avec les principes décrits par Canham et al. (2004). En concordance, les chênes cibles codominants ou dominants par rapport à leur voisinage disposent d'un meilleur accès à la lumière, tandis que les chênes dominés présentent des valeurs d'ER plus faibles. Enfin, la relation négative entre NCI et $H_{\text{relative_voisinage}}$ indique que les chênes cibles les plus dominés sont également ceux qui sont soumis à une compétition locale plus élevée. Ces trois relations montrent donc que les indicateurs décrivent des dimensions complémentaires d'un même gradient de compétition locale.

La composition modifie toutefois l'intensité de ces relations (Figure 3.3-5). En monoculture de chêne, les relations sont généralement moins marquées, traduisant une compétition locale plus homogène. À l'inverse, dans les mélanges contenant des résineux, en particulier le mélèze ou le douglas, les relations sont plus fortes, reflétées par des pentes marquées. Cela suggère que l'identité et la structure verticale des essences voisines modifient la manière dont la compétition locale impacte l'accès aux ressources. Une même valeur de NCI ou une même position sociale peut ainsi avoir des conséquences différentes sur la croissance selon la composition du peuplement.

4.1.4 Effets de la composition sur la concurrence globale

Les interprétations précédentes ont déjà montré l'importance de l'identité des essences dans les compositions. Le mélèze joue en particulier un rôle central dans la structure des peuplements et ainsi dans le caractère compétitif. Ainsi, sa présence et, plus généralement,

l'identité des essences présentes dans la parcelle influencent les surfaces terrières totales des compositions ainsi que les contributions relatives des essences.

La surface terrière totale (G_{parcelle}) de la monoculture (Qu) est parmi les plus petites (avec 17 m²/ha, Figure 3.4-1). Cette valeur est cohérente avec les gammes données par des référentiels pour cet âge (Sardin, 2008). La différence par rapport aux autres parcelles s'explique par les essences partenaires présentes, notamment le mélèze, et par leurs vitesses de croissance. (Canham et al., 2006). Le simple nombre d'essences présentes semble jouer un moindre rôle. Les mélèzes, en monoculture, peuvent atteindre des surfaces terrières supérieures à 30 m²/ha en 15 ans (Hainry & Colombet, 2010). Il est ainsi plausible de retrouver une surface terrière totale proche de 30 m²/ha dans le mélange La_Qu où les mélèzes représentent plus de 85 % de la surface terrière totale.

La Figure 3.4-1 montre également la contribution des différentes essences à la surface terrière totale. La part de chêne est très faible dans La_Qu ($\%G_{\text{relative_quercus}} < 15 \%$), alors qu'elle est plus élevée dans Fa_Qu ou Ac_Ps_Qu (Figure 3.4-3). Cela confirme que la contribution du chêne varie fortement selon les essences associées, mais pas nécessairement du nombre d'essences associées. Une faible part de chêne traduit une concurrence globale plus importante exercée par les essences partenaires. L'indicateur $\%G_{\text{relative_quercus}}$ constitue donc un bon indicateur de la concurrence globale subie par les chênes.

La part de résineux ($\%G_{\text{relative_resineux}}$) reflète la présence et l'importance des résineux dans les parcelles. Elle dépasse souvent la proportion théorique basée sur les effectifs initiaux. Ainsi, elle est supérieure à 50 % dans La_Qu et dépasse également la proportion attendue dans Ac_La_Qu et Ac_Ps_Qu. Cette surreprésentation traduit la forte contribution des résineux, notamment du mélèze et du douglas, à la surface terrière totale. Cela peut s'expliquer par leur croissance juvénile rapide qui peut être renforcée en mélange avec des essences à croissance moins importante. Dans ces conditions, la concurrence globale est plus élevée et la contribution des résineux constitue donc un bon indicateur de la concurrence globale à l'échelle de la parcelle.

La part d'essences intolérantes à l'ombrage ($\%G_{\text{relative_intol}}$) intègre à la fois les résineux et les chênes, ce qui explique ses valeurs élevées dans plusieurs parcelles (Figure 3.4-3). A priori, une forte proportion pourrait indiquer une concurrence globale plus faible, car ces essences présentent souvent des houppiers moins opaques (McNeil et al., 2023) (Tableau 2-2). En réalité, le chêne est, parmi les essences intolérantes à l'ombrage, celle qui présente la vitesse de croissance juvénile la plus faible, et il est par conséquent largement dominé verticalement.

Selon des principes décrits par Canham et al. (2006), l'indicateur de hauteur moyenne relative ($H_{\text{relative_parcelle}}$) reflète la structure verticale et ainsi l'accès aux ressources. Les chênes sont globalement dominés à l'échelle du peuplement lorsque la composition comporte des essences à croissance juvénile plus importante, notamment le mélèze (Figure 3.4-2, Figure 3.4-3). À l'inverse, l'indicateur ($H_{\text{relative_parcelle}}$) augmente dans les compositions sans mélèze, où les chênes présentent des hauteurs plus proches de la moyenne du peuplement (Figure 3.4-2, Figure 3.4-3). En Fa_Qu, les valeurs supérieures à 1 indiquent même une dominance des chênes sur les hêtres, selon ce critère. Le hêtre présentant une forte tolérance à l'ombrage, son potentiel compétitif est probablement plus important.

La relation entre la surface terrière totale (G_{parcelle}) et la hauteur moyenne relative des chênes ($H_{\text{relative_parcelle}}$) confirme qu'une surface terrière totale élevée est généralement associée à une hauteur moyenne relative des chênes plus faible (Figure 3.4-4). Cela traduit une situation où les chênes sont davantage dominés dans les peuplements les plus denses. À l'inverse, dans les compositions comme Qu et Fa_Qu, la surface terrière totale est plus faible et les chênes occupent une position sociale plus favorable. Cette relation est écologiquement cohérente avec les principes décrits par Canham et al. (2006). Les fortes corrélations observées entre la plupart des indicateurs montrent que ces variables décrivent globalement un même gradient

de concurrence globale. Cela confirme leur intérêt pour caractériser l'environnement de croissance des chênes cibles.

4.2 Impacts de l'éclaircie sur la compétition locale

L'éclaircie par arbre cible a pour objectif de réduire localement la compétition (Bauhus et al., 2017). Il est donc attendu que la compétition locale mesurée en hiver 2025-2026 soit liée au statut d'éclaircie (chêne cible éclairci ou non). Les résultats ne le montrent toutefois que partiellement, seul l'indice de compétition (NCI) étant significativement affecté. Si l'indice de compétition (NCI) diffère significativement selon le statut d'éclaircie, cela s'explique probablement par le fait que l'arbre coupé était l'un des plus gros et l'un des plus proches, ce qui réduit davantage l'indice de compétition (NCI). La différence non significative selon le statut d'éclaircie pour l'éclaircissement relatif et la hauteur relative du chêne cible ($H_{\text{relative_voisinage}}$) peut s'expliquer par plusieurs aspects complémentaires. En effet, la situation initiale avant éclaircie pouvait différer entre les chênes cibles témoins (C) et éclaircis (T). De plus, le nombre limité d'arbres retirés a pu être insuffisant pour modifier notablement les deux indicateurs, lesquels reflètent avant tout la compétition propre à la parcelle. Enfin, l'éclaircie a pu être pratiquée de manière variable d'un chêne cible à l'autre, au sein d'une même composition. Les résultats de la Figure 3.5-1 montrent un indice de compétition (NCI) plus élevé pour les chênes cibles témoins (C), ce qui est cohérent avec le fait que l'éclaircie réduit la compétition locale (Bhandari et al., 2021). L'effet du statut d'éclaircie est globalement significatif, mais il n'est significatif, à l'échelle des compositions, que dans la monoculture (Qu) et dans Ac_Fa_La_Qu. En Qu, cela peut s'expliquer par le faible rayon du voisinage compétitif (3,5 m), rendant l'indice de compétition (NCI) plus sensible à l'éclaircie. En Ac_Fa_La_Qu, cela pourrait être lié à l'enlèvement de mélèzes de grande taille. L'effet semble également présent dans les autres compositions, mais de manière moins prononcée.

La Figure 3.5-2 montre des relations cohérentes avec l'effet attendu de l'intensité de l'éclaircie. L'indice de compétition (NCI) diminue, tandis que l'éclaircissement relatif (ER) et la hauteur relative des chênes cibles ($H_{\text{relative_voisinage}}$) augmentent avec l'intensité (I_{g_local}). Cette interprétation doit rester prudente, car les faibles valeurs d'intensité (I_{g_local}) sont souvent associées à des peuplements de concurrence globale plus élevée, où la compétition locale est déjà plus forte (Figure annexe 3). Les relations observées peuvent donc refléter à la fois l'effet de l'intensité d'éclaircie et l'effet de la structure globale du peuplement. Ainsi, une intensité d'éclaircie plus élevée, selon l'indicateur I_{g_local} , n'implique pas nécessairement une situation post-éclaircie plus favorable en termes d'accès aux ressources. Le fait que cette relation existe bien dans toutes les compositions, sans différer significativement de celle observée en monoculture, suggère un effet de réduction de la compétition relativement comparable entre les compositions. Cette tendance doit toutefois, là encore, être interprétée avec prudence pour les mêmes raisons.

4.3 Modèles de croissance

4.3.1 Facteurs déterminants de la croissance individuelle

Les coefficients estimés présentent tous des signes écologiquement plausibles et comparables entre les modèles (Tableau 3-1, Tableau 3-2, Tableau 3-3, Tableau 3-4). Ils dépendent cependant légèrement dans l'interprétation et sont passés en revue dans les sous-chapitres suivants.

4.3.1.1 Croissance des chênes cibles dans les conditions moyennes

De manière cohérente avec les attentes, l'intercept estimé par les modèles (M1, M2 et M3, Tableau 3-1, Tableau 3-2) est positif et proche de 7 mm ($\approx$ 2 cm de circonférence). Cet accroissement paraît plausible dans l'ordre de grandeur (Sardin, 2008 ; Schröder et al., 2006). Pour les deux premiers modèles (M1 et M2), la valeur estimée de l'intercept représente l'accroissement attendu d'un chêne cible témoin (C) dans des conditions moyennes, les

variables continues ayant été centrées sur leur moyenne. Il correspond donc à un chêne cible moyen en termes de taille initiale, de compétition locale et de concurrence globale. En ce qui concerne le modèle M3, le coefficient estimé de l'intercept doit être interprété différemment, en fonction de la modalité de la variable catégorielle. La valeur estimée de l'intercept correspond à l'accroissement d'un chêne cible témoin (C) dans la composition de référence (Qu). Dans les trois modèles, le bloc ne joue pas de rôle significatif, ce qui peut s'expliquer par des conditions édaphiques similaires (Bhandari et al., 2021) (Tableau 2-1).

Les modèles M4, M5 et M6, qui prennent en compte différemment l'effet de l'éclaircie, présentent des intercepts comparables en valeur absolue, mais généralement un peu supérieurs, d'environ un centimètre (Tableau 3-3, Tableau 3-4). Cela est cohérent avec le fait qu'ici, l'intercept correspond à la croissance d'un chêne cible éclairci avec une intensité locale moyenne, alors que dans les modèles M1, M2 et M3, l'intercept correspond à la croissance attendue d'un chêne cible témoin (C).

4.3.1.2 Effet de la taille initiale sur l'accroissement des chênes cibles

L'effet estimé de la taille initiale, représentée par le diamètre en hiver 2024-2025, est également positif dans les trois modèles (M1, M2 et M3). Cela est cohérent avec les résultats rapportés dans la littérature (Acquah & Marshall, 2020 ; Bhandari et al., 2021 ; Canham et al., 2006 ; Coates et al., 2009 ; Collado et al., 2023 ; Lhotka & Loewenstein, 2011 ; Stadt et al., 2007 ; Z. Zhang et al., 2016). Selon ces références, cet effet positif peut s'expliquer par le fait qu'un arbre initialement plus gros dispose de davantage de moyens pour accéder aux ressources, notamment grâce à un système racinaire plus développé ou à un houppier plus important. Dans les trois modèles (M1, M2 et M3), le coefficient estimé est d'environ +5,50 (Tableau 3-1, Tableau 3-2). Sur le plan écologique, cet effet positif indique que les chênes initialement plus gros tendent à mieux valoriser les ressources disponibles. Plus précisément, toutes les autres variables étant fixées, une augmentation d'une unité du diamètre initial relatif centré est associée à un accroissement supérieur d'environ 5,5 mm. Selon la modélisation, ces résultats suggèrent qu'il est pertinent de privilégier, parmi les chênes cibles potentiels, les individus les plus gros, car ceux-ci présentent un accroissement plus élevé au sein de l'échantillon étudié. Cette approche, appliquée à FORBIO (Figure 3.1-1), semble donc pertinente pour favoriser la croissance en diamètre des arbres cibles.

Les modèles M4, M5 et M6 estiment un effet plus faible, en valeur absolue, avec un coefficient d'environ +4,50 dans les trois modèles. Cela peut s'expliquer par le fait que ces derniers modèles (M4, M5 et M6) ne considèrent que les chênes cibles éclaircis (T). L'effet de la taille initiale sur l'accroissement y serait donc moins marqué. Ces modèles excluent également l'indice de compétition (NCI), ce qui peut contribuer à expliquer les différences d'estimation.

4.3.1.3 Effet de la compétition locale sur l'accroissement des chênes cibles

L'effet du voisinage compétitif local est estimé négatif dans chacun des trois modèles (M1, M2 et M3). Écologiquement, cela est cohérent. Plus un chêne cible est exposé à un voisinage plus dense ou plus haut, moins il a accès aux ressources, notamment à la lumière. Les ressources limitées sont alors réparties entre davantage d'individus, et chaque individu n'y a pas le même accès (Deschênes, 2016). Les recherches d'Acquah & Marshall (2020), Canham et al. (2006), Deschênes (2016) et Coates et al. (2009) ont également mis en évidence des effets négatifs pour ce facteur écologique. Dans les trois modèles (M1, M2 et M3), une augmentation d'une unité de compétition locale relative et centrée chez un chêne cible réduit l'accroissement en diamètre d'environ 3,5 mm, toute autre variable étant fixée (Tableau 3-1, Tableau 3-2).

4.3.1.4 Effet de la concurrence globale sur l'accroissement des chênes cibles

En cohérence avec la section précédente, l'effet de la composition, évalué par les indicateurs de concurrence globale (M1 et M2) ou par la variable catégorielle de la composition (M3), indique une moindre croissance dans des compositions de concurrence globale élevée.

En ce qui concerne la surface terrière totale (G_{parcelle}), l'effet estimé est négatif dans les deux modèles (M1 : -0,302 ; M4 : -0,18). Cette variable ayant seulement été centrée, l'interprétation de la pente ne change pas par rapport à une variable non centrée. Une différence d'une unité dans la variable centrée correspond toujours à une différence de 1 m²/ha. Dans le modèle M1, l'effet estimé concerne les chênes cibles témoins (C), car la variable est en interaction avec l'éclaircie. À titre d'illustration, une différence de 10 m²/ha de surface terrière totale est associée à une diminution prédite d'environ 3 mm d'accroissement, toutes choses égales par ailleurs. Ainsi, un chêne cible témoin (C) situé dans une composition moins dense, comme la monoculture de chêne (Qu, environ 17 m²/ha), présenterait un accroissement prédit supérieur à celui d'un chêne cible situé dans une composition plus dense, comme Fa_La_Ps_Qu avec près de 27 m²/ha. Cela indique une moindre croissance pour une surface terrière totale plus élevée (Figure 3.6-1). Dans le modèle M4, le coefficient de G_{parcelle} correspond à l'effet de la surface terrière totale chez les chênes cibles éclaircis (T), pour une intensité locale d'éclaircie moyenne, puisque I_{g_local} est centrée. Le coefficient moins négatif indique un effet moins pénalisant de la surface terrière totale.

La hauteur moyenne relative des chênes ($H_{\text{relative_parcelle}}$) est estimée positivement dans les deux modèles (M2 : +7,12 ; M5 : +4,45). L'interprétation des coefficients est similaire à celle de la surface terrière totale décrite précédemment. À titre d'illustration, selon le modèle M2, pour une augmentation de 0,1 en $H_{\text{relative_parcelle}}$, le chêne cible témoin (C) est associé à un accroissement supérieur de 0,712 mm. C'est écologiquement cohérent avec l'estimation du modèle M1, car une hauteur moyenne relative des chênes ($H_{\text{relative_parcelle}}$) élevée est associée à une faible concurrence globale. Comme pour la surface terrière totale, le modèle M5 ne considérant pas les chênes cibles témoins (C), estime un coefficient plus faible en valeur absolue.

Sur le plan écologique, cette diminution de l'accroissement avec la concurrence globale est cohérente. Elle rejoint les résultats d'Ulbricht et al. (2026), qui observent une croissance plus faible dans les mélanges à forte concurrence, ainsi que Canham et al. (2006), qui soulignent l'importance du contexte compétitif pour l'accroissement des arbres cibles.

Finalement, les tests anova des modèles M3 et M6 indiquent que l'effet global de la variable catégorielle est significatif. Cela met en évidence un effet de la composition sur l'accroissement, ce qui est cohérent avec le fait que les indicateurs de concurrence globale étaient également significatifs. Dans les deux modèles, l'effet de la composition peut être observé pour chaque mélange, par comparaison avec la monoculture de chêne. Le modèle M3 (Tableau 3-2) montre que l'effet global de la composition est surtout observable dans les mélanges La_Qu et Ac_La_Qu, dans lesquels l'accroissement est beaucoup plus faible qu'en monoculture (-4,50 et -3,13, respectivement). Cette différence n'est cependant significative que pour le mélange La_Qu. D'un point de vue écologique, cela est cohérent, car c'est ce mélange qui présente la concurrence globale la plus forte pour le chêne. Dans le cas du modèle M6 (Tableau 3-4), l'accroissement modélisé dans les mélanges est souvent plus élevé qu'en monoculture, mais jamais de manière significative, ce qui indique que l'accroissement reste comparable.

4.3.2 Réponse des chênes cibles à l'éclaircie selon leur statut (M1, M2 et M3)

Les résultats des trois modèles M1, M2 et M3 montrent que les principales variables explicatives restent significatives, ce qui suggère qu'elles apportent chacune une information spécifique à la prédiction de l'accroissement. La relativisation de la taille initiale et de la compétition du voisinage local semble donc avoir permis de mieux distinguer leurs effets de ceux liés à la composition. Même si l'indice de compétition (NCI), est au moins en partie lié au statut d'éclaircie (Figure 3.5-1), cette relation semble avoir été atténuée par la relativisation. Le centrage, quant à lui, ne modifie pas cette relation. Ainsi, l'indice de compétition relativisé et

centré ainsi que le statut d'éclaircie peuvent tous deux rester significatifs dans la prédiction de l'accroissement.

4.3.2.1 L'effet de l'éclaircie sur l'accroissement des chênes cibles

La différence d'accroissement entre les chênes cibles éclaircis et les témoins, estimée à 1,32 mm (M1 et M2, Tableau 3-1) lorsque les variables continues sont fixées à leur moyenne, est d'un ordre de grandeur plausible (Ulbricht et al., 2026). La Figure 3.6-1 visualise cette différence en montrant une droite modélisée pour les chênes cibles témoins (C) inférieure à celle des chênes cibles éclaircis (T).

Le modèle M3 montre un effet positif de l'éclaircie en monoculture de chêne (+0,45 mm), mais celui-ci n'est pas significatif. Les contrastes estimés montrent une tendance positive de l'éclaircie dans toutes les compositions, avec un accroissement généralement supérieur chez les chênes cibles éclaircis (T) que chez les témoins (C), bien que l'ampleur de cet effet varie selon la composition (Tableau 3-2).

Les résultats des trois modèles (M1, M2 et M3) sont cohérents avec l'objectif de l'éclaircie, qui est de favoriser l'accroissement du chêne cible (Bauhus et al., 2017). Cet effet positif peut s'expliquer écologiquement par le fait que les chênes éclaircis ont bénéficié d'accès accru aux ressources (Ulbricht et al., 2026).

4.3.2.2 L'effet de la composition sur la réponse des chênes cibles à l'éclaircie

Si les modèles M1 et M2 montrent que l'éclaircie favorise globalement l'accroissement, son effet ne varie pas significativement selon la surface terrière totale (G_{parcelle}) ni selon la hauteur moyenne relative des chênes ($H_{\text{relative_parcelle}}$) (Tableau 3-1). Cela suggère que le bénéfice de l'éclaircie est statistiquement similaire quel que soit le niveau de concurrence globale de la parcelle. En d'autres termes, toutes les autres variables étant fixées à leur moyenne, la différence d'accroissement entre un chêne cible éclairci (T) et un témoin (C) reste statistiquement similaire le long des gradients de surface terrière totale et de hauteur moyenne relative des chênes.

Cependant, une tendance non significative apparaît sur la Figure 3.6-1, avec une interaction négative dans le modèle M1 et positive dans le modèle M2. Cette tendance est visualisée par l'écart entre les droites. Pour un niveau donné de concurrence globale, le bénéfice lié à l'éclaircie semble plus important dans les contextes où la concurrence globale est élevée. En concordance avec cette observation, les résultats de la Figure annexe 10 et de la Figure annexe 11 montrent des nuages de points visiblement plus séparés entre les chênes éclaircis (T) et les témoins (C) dans le mélange La_Qu, caractérisé par une forte concurrence globale. Le coefficient de l'interaction (éclaircie : La_Qu, Tableau 3-2) indique également un effet significatif local pour cette composition. En monoculture, ces nuages de points apparaissent visiblement moins séparés.

Or, dans la présente recherche, cette tendance ne peut pas être démontrée avec certitude. Selon les mécanismes décrits par Bhandari et al. (2021) et Canham et al. (2006), elle reste toutefois plausible sur le plan écologique. Ulbricht et al. (2026) attendaient également un effet de la composition sur la réponse à l'éclaircie. Il est donc écologiquement envisageable que la réponse à l'éclaircie dépende de la composition. Si la présente recherche ne permet pas de mettre en évidence cet effet, cela pourrait s'expliquer pour les raisons suivantes.

Premièrement, l'éclaircie ne prélève pas la même quantité de matériel selon les compositions. Les compositions à concurrence globale élevée, telles que les compositions à forte proportion de résineux, présentent une réduction plus importante du matériel sur pied que les compositions à faible concurrence globale, à l'échelle locale comme à l'échelle de la parcelle (Figure 3.2-2, Figure 3.2-6, Figure annexe 2, Figure annexe 5). Cela peut rendre plus difficile l'identification d'une interaction nette entre la composition et l'effet de l'éclaircie. En effet, l'éclaircie et la concurrence globale ont chacune un effet significatif sur l'accroissement, mais

leur interaction n'est pas significative. Il est donc difficile de déterminer si une éventuelle variation de la réponse à l'éclaircie selon la composition est liée à la composition elle-même ou aux différences d'intensité d'éclaircie entre parcelles. Une éclaircie appliquée de manière plus homogène entre les parcelles aurait permis de mieux isoler l'effet propre de la composition sur la réponse à l'éclaircie.

Une autre explication vient d'une conséquence de la concurrence cumulée. Les chênes cibles dominés depuis leur très jeune âge ont vu leur croissance en diamètre réduite (Figure 3.4-5). Par conséquent, les chênes dans ces situations n'ont très probablement pas pu développer de houppiers étendus (Pretzsch et al., 2021). Une fois les ressources libérées par l'éclaircie, l'arbre ne serait pas en mesure d'en profiter pleinement, car les capacités physiologiques permettant de valoriser les ressources libérées, notamment la capacité photosynthétique du houppier, restent limitées (Brockhoff et al., 2017 ; Gessler et al., 2026). Pour compléter cette approche, une autre variable réponse pourrait être utilisée dans les modèles de croissance, à savoir l'accroissement relatif en diamètre. Dans ce cas, l'accroissement est rapporté à la grosseur initiale de l'arbre. Cette variable réponse intègre donc la taille initiale, qui est elle-même liée à la concurrence cumulée. Dans le cas de la variable réponse absolue, l'effet de la taille est une variable explicative. En effet, les modèles actuels contrôlent l'effet de la taille initiale sur l'accroissement absolu, mais ils ne testent pas directement si la réponse à l'éclaircie est proportionnellement plus forte chez les arbres initialement moins gros ou plus contraints. Un accroissement relatif permettrait donc davantage d'évaluer le bénéfice de l'éclaircie par rapport au potentiel initial de croissance ou à la taille initiale de l'arbre.

Le modèle M3 permet des interprétations supplémentaires. L'effet de l'éclaircie sur l'accroissement varie selon la composition mais n'est pas systématiquement significatif. Par exemple, il n'est pas significatif dans la monoculture de chêne (Qu) (Tableau 3-2). Bien que l'interaction entre le statut d'éclaircie et la composition ne soit globalement pas significative, l'effet positif de l'éclaircie sur l'accroissement est significativement plus élevé dans Fa_Qu et La_Qu que dans la composition de référence, la monoculture de chêne (Qu) (Tableau 3-2, Figure 3.6-2). En concordance, la Figure 3.6-3 montre des nuages de points de chênes cibles témoins (C) et éclaircis (T) assez séparés dans La_Qu et Fa_Qu, avec les chênes éclaircis (T) dans les gammes d'accroissement les plus élevées.

Le mélange La_Qu est celui présentant la plus forte concurrence globale (Figure 3.4-3). Le fait d'y retrouver une différence entre chênes cibles éclaircis et témoins plus élevée qu'en monoculture est cohérent avec les modèles M1 et M2, qui montraient une tendance (non significative) vers un plus grand bénéfice de l'éclaircie dans les contextes de forte concurrence. D'un point de vue écologique c'est plausible, car les chênes sont les plus dominés dans ce mélange (Bhandari et al., 2021 ; Canham et al., 2006 ; Ulbricht et al., 2026).

Le fait que l'effet soit également plus visible (Figure 3.6-2) et significatif en Fa_Qu (Tableau 3-2) est plutôt inattendu, puisqu'il s'agit d'un mélange à relativement faible concurrence globale (Figure annexe 7, Figure annexe 8, Figure annexe 9, Figure 3.3-4), au moins sur la base des indicateurs utilisés. Une explication possible est que l'éclairement relatif (ER) du mélange Fa_Qu, même s'il n'est pas parmi les plus faibles, est très sensible aux variations de l'indice de compétition (NCI) (Figure 3.3-5), notamment celles induites par l'éclaircie. Cette figure montre en effet une augmentation plus marquée de l'éclairement relatif (ER) pour une variation donnée de l'indice de compétition (NCI) dans Fa_Qu par rapport aux autres mélanges. Cela pourrait être lié à l'opacité des houppiers de hêtre (Tableau 2-2) (Wallonie environnement SPW, n.d.). Ainsi, même si la hauteur moyenne relative des chênes ($H_{relative_parcelle}$) est élevée dans Fa_Qu (Figure 3.4-2, Figure 3.4-3), l'enlèvement de hêtres pourrait fortement augmenter l'accès à la lumière en ensoleillant davantage les parties inférieures du houppier des chênes cibles.

Dans ce contexte, le modèle M3 apporte un éclairage complémentaire par rapport aux deux modèles précédents (M1 et M2). En effet, il suggère que l'effet de l'éclaircie ne dépend pas

globalement de la composition, mais bien de compositions spécifiques particulières, en l'occurrence La_Qu et Fa_Qu, impactant plus particulièrement l'accès des chênes à la lumière.

L'effet de l'éclaircie apparaît plus marqué pour deux compositions particulières présentant une richesse spécifique de deux essences. Cela pourrait conduire à la conclusion que la richesse joue un rôle important. Or, l'explication semble également liée aux traits écologiques du mélèze et du hêtre. Dans les deux cas, La_Qu et Fa_Qu, ce serait l'accès réduit à la lumière qui expliquerait que l'effet de l'éclaircie y soit plus marqué. Toutefois, un effet de la richesse n'est pas totalement à écarter. Le fait qu'il n'y ait qu'une seule essence partenaire renforce sans doute l'effet de cette essence sur le chêne. En d'autres termes, si la présence d'une essence particulière influence fortement l'accès à la lumière, son effet sera d'autant plus marqué, et donc plus facile à détecter, dans un mélange où elle représente une grande proportion. C'est notamment le cas dans un mélange à deux essences, où l'essence partenaire constitue théoriquement une part importante du voisinage du chêne cible.

4.3.2.3 Cohérence des modèles et l'effet de la composition sur l'accroissement

L'AIC du modèle M3 est plus faible que celui des modèles M1 et M2, indiquant un meilleur ajustement global. Les R^2 marginal et conditionnel sont du même ordre de grandeur, avec environ 45 % de variance expliquée par les effets fixes et 55 % par l'ensemble du modèle. La différence entre ces deux valeurs montre qu'une part non négligeable de la variance est liée à la structure hiérarchique des données. De manière générale, ces ordres de grandeur sont élevés dans un contexte écologique. Les résultats de la Figure 3.6-3, de la Figure annexe 10 et de la Figure annexe 11 permettent de visualiser la performance de ces modèles. De manière générale, les valeurs prédites suivent correctement la bissectrice, ce qui indique une bonne cohérence entre les accroissements observés et prédits.

Les différences d'accroissement entre compositions visibles sur ces figures sont cohérentes avec les résultats de la Figure 3.6-1 ainsi que de la Figure 3.6-2. Les compositions caractérisées par une concurrence globale plus élevée présentent globalement des accroissements plus faibles. Cela est écologiquement plausible, moins de ressources étant disponibles (Canham et al., 2006 ; Deschênes, 2016). Ainsi, les variations de croissance entre compositions semblent bien prises en compte par les modèles, en lien avec les indicateurs de concurrence locale et globale.

4.3.3 Réponse des chênes cibles éclaircis à l'intensité locale de l'éclaircie (M4, M5, M6)

Contrairement aux modèles précédents, les modèles M4, M5 et M6 excluent le facteur de voisinage local. Même relativisé et centré, celui-ci reste trop fortement corrélé à l'intensité locale de l'éclaircie ($I_{g_local_centré}$), ce qui aurait fait perdre sa significativité à cette dernière. Cela est cohérent avec le résultat de la Figure 3.5-2, qui suggère au moins une tendance entre l'intensité de l'éclaircie et l'indice de compétition locale (NCI).

La Figure annexe 3 montre néanmoins une relation entre l'intensité locale de l'éclaircie (I_{g_local}) et les indicateurs de concurrence globale. Toutefois, dans les modèles M4 et M5, l'intensité de l'éclaircie sous sa forme centrée ainsi que les indicateurs de concurrence globale restent significatifs, ce qui justifie leur utilisation conjointe. Ces variables décrivent ainsi deux niveaux écologiques différents, à savoir l'intensité locale de l'intervention autour du chêne cible et le contexte global de concurrence de la parcelle.

4.3.3.1 Effet de l'intensité locale de l'éclaircie sur l'accroissement des chênes cibles éclaircis

Les modèles M4 et M5 estiment un coefficient positif pour l'intensité locale de l'éclaircie ($I_{g_local_centré}$), respectivement de +5,96 et +6,27, avec une significativité proche du seuil statistique de 0,05, suggérant seulement une tendance positive de l'effet de l'éclaircie (Figure

3.6-4, Figure 3.6-6). Un chêne cible, dans des conditions de taille initiale et de concurrence globale moyennes, aurait ainsi environ 6 mm d'accroissement de plus pour une augmentation d'une unité de l'intensité d'éclaircie.

Le modèle M6 estime un effet global non significatif de l'intensité de l'éclaircie, mais un effet positif et significatif de l'intensité de l'éclaircie en monoculture de chêne (Qu), estimé à +14, ce qui indique que la croissance est plus élevée pour des chênes cibles plus fortement éclaircis (Figure 3.6-7). À titre illustratif, un chêne cible en monoculture (Qu) présentant une intensité locale de l'éclaircie ($I_{g_local_centré}$) supérieure de 0,1 présenterait environ 1,4 mm d'accroissement de plus selon l'estimation du modèle. À certaines exceptions près, l'effet de l'intensité locale de l'éclaircie reste positif dans plusieurs compositions (Tableau 3-4).

Les tendances observées dans les trois modèles (M4, M5 et M6) sont cohérentes avec l'objectif de l'éclaircie, qui est de favoriser le développement du chêne cible (Bauhus et al., 2017). L'intensité locale de l'éclaircie tend à favoriser l'accroissement en diamètre, ce qui peut s'expliquer, sur le plan écologique, par l'accès accru aux ressources (Ulbricht et al., 2026).

Plusieurs raisons peuvent expliquer pourquoi l'effet de l'éclaircie ne favorise pas significativement l'accroissement. Le nombre d'observations est faible dans certaines compositions (Figure 3.6-3). De plus, l'éclaircie étant limitée à un maximum de deux arbres voisins, et parfois à un seul, la quantité de ressources libérées a probablement été insuffisante dans certains cas pour entraîner une réponse nette du chêne cible.

4.3.3.2 Effet de la composition sur la réponse des chênes cibles à l'intensité locale de l'éclaircie

Pour rappel, les modèles M4 et M5 évaluent l'effet de la composition à partir de deux indicateurs de concurrence globale. Aucun des deux modèles n'estime significativement l'interaction entre l'éclaircie et la composition. Cela n'empêche pas les chênes cibles de présenter un accroissement plus élevé lorsque l'intensité locale de l'éclaircie augmente. Toutefois, pour une intensité locale donnée, les chênes cibles éclaircis des différentes compositions semblent réagir de manière similaire à la réduction de compétition. À titre d'illustration, les pentes de la Figure 3.6-4 et de la Figure 3.6-6 montrent des différences selon l'estimation des coefficients par les modèles. Or, statistiquement, rien ne permet de démontrer que ces pentes diffèrent significativement de celle observée pour la monoculture de chêne (Qu). Cela suggère un bénéfice similaire d'une intensité locale de l'éclaircie donnée, quelle que soit la composition.

Seule l'interaction de l'éclaircie avec la surface terrière totale présente une p-valeur proche du seuil statistique de 0,05. Cela indique uniquement une tendance, sans permettre de conclure à un effet significatif. Cette tendance suggère une réponse plus positive à une augmentation donnée de l'intensité locale de l'éclaircie, dans les compositions à surface terrière totale plus faible, et donc à concurrence globale plus faible, comme Fa_Qu, Ac_Ps_Qu et la monoculture de chêne (Qu) (Figure 3.6-4). La tendance est illustrée par des pentes positives plus élevées pour ces compositions. Sur le plan écologique, il aurait toutefois été plus attendu que le bénéfice de l'éclaircie soit plus important dans les contextes de concurrence globale élevée (Breda et al., 1995 ; Ulbricht et al., 2026). Cette interaction étant non significative, cette tendance ne doit pas être surinterprétée.

Le modèle M6 permet d'évaluer l'effet de la composition à partir de la variable catégorielle de composition. Ce modèle ne permet pas non plus de détecter une variation significative de l'effet de l'éclaircie entre les compositions. Même si les effets estimés de l'éclaircie diffèrent entre les compositions et la monoculture de chêne, ces différences ne sont pas significatives (Tableau 3-4). À titre d'illustration, la Figure 3.6-7 montre des pentes différentes selon les compositions, mais ces différences de pente ne sont pas démontrées statistiquement.

Les modèles intégrant l'éclaircie sous forme d'intensité locale (M4, M5 et M6) montrent de manière cohérente absence d'interaction significative entre l'intensité locale de l'éclaircie et la composition. Comme pour les modèles M1 et M2, un rôle significatif de la composition pouvait pourtant être attendu, étant donné que les compositions étudiées à FORBIO regroupent des essences aux traits écologiques contrastés (Tableau 2-2) et présentent des niveaux de concurrence globale différents (Figure 3.4-3).

4.3.3.3 Facteurs limitant l'interprétation de l'interaction entre l'intensité d'éclaircie et la composition

Les raisons pour lesquelles il est difficile de détecter un effet de la composition sur la réponse à l'éclaircie sont en partie similaires à celles décrites pour les modèles M1, M2 et M3, mais elles sont ici renforcées par l'utilisation de l'intensité locale de l'éclaircie comme variable continue et centrée à l'échelle de tout le jeu de données.

D'abord, l'éclaircie n'a pas été réalisée de manière équivalente selon les compositions. La relation entre l'intensité locale (I_{g_local}) et les indicateurs de concurrence globale (Figure annexe 3) montre que l'intensité locale de l'éclaircie n'est pas totalement indépendante du contexte de composition. À l'échelle de l'ensemble des parcelles, I_{g_local} tend à diminuer lorsque la concurrence globale augmente. Toutefois, cette tendance globale ne signifie pas nécessairement que la même relation existe au sein de chaque composition ou de chaque parcelle prise séparément. Cette distinction est importante, car l'intensité locale de l'éclaircie (I_{g_local}) a été centrée à l'échelle globale du jeu de données. Cela rend plus complexe l'interprétation de l'interaction entre cet indicateur de l'éclaircie et la composition. Même si ce centrage est pertinent pour interpréter les coefficients autour d'une intensité moyenne d'éclaircie à l'échelle de l'ensemble du jeu de données, il ne distingue pas la variation intra-composition de la variation inter-composition. Autrement dit, une valeur élevée de $I_{g_local_centré}$ peut traduire à la fois une éclaircie plus forte que la moyenne au sein d'une même composition, mais aussi des différences moyennes d'intensité entre compositions. Il devient donc plus difficile d'isoler clairement l'effet propre de la composition sur la réponse à l'intensité de l'éclaircie. Un centrage à l'échelle de la parcelle aurait facilité l'interprétation des variations locales d'intensité, mais aurait aussi supprimé une partie des différences moyennes d'intensité d'éclaircie entre parcelles et compositions.

La détection d'une interaction significative est également rendue difficile par le fait que l'intensité locale de l'éclaircie (I_{g_local}) est calculée à partir du matériel initialement présent sur pied dans le voisinage local du chêne cible, lequel diffère selon l'identité des voisins compétiteurs. Ainsi, la valeur de l'indicateur dépend directement de la structure initiale du voisinage et de la manière dont un voisin est défini comme compétiteur. Une légère différence dans la définition du voisinage local compétitif pourrait avoir un impact important sur la détection de l'effet. En effet, Canham et al. (2006) ont testé différents rayons de voisinage et ont montré qu'à partir d'un certain rayon, l'effet estimé ne changeait plus fortement. Dans la présente recherche, une telle analyse de sensibilité n'a pas été réalisée. Il est donc possible que certains voisins n'aient pas été considérés comme compétiteurs dans le calcul de l'indicateur, alors qu'ils exerçaient encore une influence biologique sur le chêne cible.

De plus, seuls les arbres coupés pour le chêne cible considéré ont été pris en compte. Or, il ne peut pas être exclu que, dans les mélanges, un chêne cible ait également profité de l'éclaircie réalisée autour d'un arbre cible voisin appartenant à une autre essence. Cet effet est cependant considéré comme faible, étant donné que les arbres cibles respectent généralement une distance minimale et que les compétiteurs coupés sont généralement les voisins les plus proches du chêne cible. Cette situation est d'autant moins probable lorsque l'essence voisine présente une croissance plus rapide, car cette dernière nécessite alors moins d'éclaircie. Le chêne est souvent parmi les essences les plus dominées. L'effet, s'il se manifestait, serait probablement limité à quelques compositions très spécifiques.

Finalement, le nombre limité d'observations dans certaines compositions réduit la puissance statistique nécessaire pour détecter des effets significatifs (Figure 3.6-3).

4.3.3.4 Cohérence des modèles et l'effet de la composition sur l'accroissement

Les AIC des modèles M4, M5 et M6 sont de 651, 644 et 585 respectivement. Les R^2 marginaux et conditionnels restent du même ordre de grandeur (0,32–0,41 et 0,47–0,48 respectivement), indiquant que les modèles expliquent une part importante de la variance de l'accroissement. La différence entre R^2 marginal et conditionnel montre qu'une partie non négligeable de cette variance est expliquée par la structure hiérarchique des données. La Figure 3.6-5 ainsi que celles présentées en annexe (Figure annexe 12, Figure annexe 13) représentent visuellement la performance des modèles. De manière générale, les modèles prédisent correctement l'accroissement, la relation entre les valeurs observées et prédites étant proche de la bissectrice.

Les accroissements les plus importants sont rencontrés pour des compositions de faible surface terrière totale (G_{parcelle}) et de hauteurs moyennes relatives de chênes élevées ($H_{\text{relative_parcelle}}$) (Figure 3.6-4, Figure 3.6-6). Cela est cohérent avec la figure 3.6.5 et les figures annexes 12 et 13, qui confirment des accroissements observés et modélisés plus élevés dans les compositions à concurrence globale plus faible. En effet, l'accroissement est négativement influencé par la concurrence globale (Ulbricht et al., 2026), comme le montrent également les résultats des modèles M4 et M5.

4.4 Implications et recommandations sylvicoles

Les interprétations des modèles M1 à M3 suggèrent que, de manière générale, l'éclaircie favorise la croissance en grosseur des chênes cibles. L'effet positif de l'éclaircie a pu être quantifié dans la monoculture ainsi que dans tous les mélanges. Les résultats de la présente recherche conduisent donc à recommander l'éclaircie par approche arbre cible comme moyen de maintenir les chênes cibles dans le mélange. Cette recommandation est soutenue de manière générale par la littérature (Bauhus et al., 2017 ; Pretzsch et al., 2021).

La différence d'accroissement entre un chêne cible témoin (C) et un chêne cible éclairci (T) tend à augmenter lorsque la concurrence globale est plus élevée, mais cette tendance reste à interpréter avec prudence, car les interactions sont généralement non significatives. Elle suggère néanmoins que la composition pourrait influencer la réponse à l'éclaircie, notamment via la présence d'essences à croissance juvénile rapide et à forte compétitivité, comme le suggèrent les différences significatives observées dans les mélanges avec le mélèze ou le hêtre (La_Qu et Fa_Qu). L'identité des essences partenaires et leurs traits écologiques semblent ainsi jouer un rôle important, ce qui est cohérent avec Brockerhoff et al. (2017), qui soulignent que les interactions en mélange dépendent davantage de l'identité des voisins que du simple nombre d'essences. Dans les compositions à forte concurrence globale, telles que La_Qu ou Ac_La_Qu, les chênes cibles présentent généralement un accroissement absolu plus faible. La différence d'accroissement entre chêne cible éclairci et témoin, voire le bénéfice de l'éclaircie, pourrait donc paraître plus important uniquement s'il est exprimé de manière relative, c'est-à-dire rapporté à l'accroissement des témoins. En revanche, si l'objectif est de maximiser l'accroissement absolu et de réduire la durée du cycle sylvicole, les compositions à concurrence globale plus faible semblent plus favorables, car l'accroissement absolu y reste plus élevé, même si le gain relatif entre chêne cible éclairci et témoin peut y être plus faible.

À l'échelle des compositions, l'intensité locale de l'éclaircie tend au moins à réduire la compétition locale. Cela est cohérent avec la tendance positive, bien que non significative, entre l'intensité locale de l'éclaircie et l'accroissement suggérée par les modèles M4 et M5. Cela permet de conclure prudemment qu'une intensité locale plus élevée pourrait favoriser l'accroissement. Toutefois, la présente recherche ne permet pas de démontrer que cette réponse dépend de la composition. Il n'est donc pas possible de déterminer si, pour atteindre

un accroissement donné, l'intensité locale de l'éclaircie nécessaire diffère de celle observée en monoculture.

Cependant, les modèles M4 et M5 indiquent que les accroissements absolus sont les plus élevés dans les compositions à faible concurrence globale, parmi lesquelles se trouve la monoculture. Les situations de concurrence plus faible, qu'elles soient intraspécifiques ou liées à des essences relativement peu compétitives, semblent donc favoriser l'accroissement et donc, indirectement, le maintien du chêne cible. À l'inverse, le mélange avec des essences plus compétitives et à croissance rapide tend à réduire l'accroissement du chêne, en lien avec une taille initiale plus faible et un accroissement plus limité. Si le mélange est souhaité, une séparation spatiale initiale plus importante devrait être préconisée pour retarder la compétition interspécifique (Bauhus et al., 2017; Pretzsch et al., 2021).

En vue d'atteindre des accroissements radiaux élevés, il est tout de même important de sélectionner les chênes cibles avant la première éclaircie parmi les chênes les plus gros et ainsi les plus vitaux, la grosseur étant positivement liée à la taille du houppier (Pretzsch et al., 2021). Sinon, l'arbre risquerait de perdre en capacité de réaction à la réduction de la compétition induite par l'éclaircie.

5 Conclusions et perspectives

Le changement climatique exerce une pression croissante sur les écosystèmes forestiers, particulièrement en Europe centrale. Dans ce contexte, les forêts doivent continuer à assurer leurs fonctions écologiques et économiques, notamment le stockage de carbone, la production de bois ainsi que le maintien de nombreux services écosystémiques. La forêt wallonne, encore souvent composée de peuplements peu adaptés aux conditions climatiques futures, nécessite ainsi des stratégies sylvicoles permettant de réduire la vulnérabilité des peuplements face aux changements globaux. Les peuplements mélangés apparaissent alors comme une stratégie sylvicole prometteuse pour améliorer la résilience des forêts face aux sécheresses, pathogènes et autres perturbations. Cependant, les connaissances concernant leur installation et leur conduite, notamment en termes d'éclaircie, restent encore limitées. Ce manque de connaissances constitue actuellement un frein important à l'implémentation de peuplements mélangés, pourtant considérés comme essentiels dans le cadre d'une sylviculture adaptée au changement climatique.

Dans les peuplements mélangés, l'éclaircie joue un rôle important pour maintenir les chênes cibles face à la compétition interspécifique, particulièrement dans le jeune âge où le chêne sessile peut être rapidement dominé par des essences plus compétitives. Cette intervention vise ainsi à maintenir une position sociale favorable des chênes et à favoriser leur croissance en vue de la production future de bois. Ce mémoire avait pour objectif de mieux comprendre la réponse à du chêne sessile l'éclaircie, une essence qui est supposée gagner de l'importance stratégique dans la sylviculture future. Cette analyse est réalisée dans différentes compositions forestières du dispositif FORBIO à Gedinne, notamment la monoculture et des mélanges avec d'autres essences rencontrées en Wallonie, dont l'érable sycomore, le hêtre commun, le mélèze hybride ainsi que le douglas. Plus spécifiquement, ce travail visait à quantifier la réponse en croissance des chênes cibles à l'éclaircie et à identifier les facteurs expliquant les variations de cette réponse selon la composition des peuplements.

Avant d'intégrer les variables traduisant les différents « moteurs » de la croissance individuelle des chênes dans les modèles, la présente recherche a pu les quantifier dans les différentes compositions. Comme attendu, la composition influence généralement les différents facteurs. Ainsi, il a pu être montré que la taille initiale, l'éclaircie, la compétition locale et la concurrence globale sont tous liés à la composition considérée. La taille initiale s'est avérée plus faible dans les compositions à concurrence globale élevée. Alors que la nature et la quantité absolue de la surface terrière enlevée par l'éclaircie augmentent avec l'augmentation de la concurrence, l'intensité locale a montré une relation inverse, cependant liée à la construction mathématique de l'indicateur. Même si l'impact de l'éclaircie sur la compétition locale n'a pas toujours pu être démontré, les résultats suggèrent que l'intensité locale a au moins en partie pu réduire la compétition locale, donnant ainsi un accès accru aux chênes cibles. Les indicateurs de compétition locale sont bien liés à la composition, tout comme les indicateurs de concurrence globale. Les résultats montrent ainsi clairement que la composition des peuplements influence fortement les déterminants de la croissance des chênes cibles.

Plus que la richesse spécifique elle-même, c'est surtout l'identité des essences partenaires qui semble déterminer le niveau de compétition locale et globale. L'effet de la composition est donc lié à la présence d'essences spécifiques. Dans le cas du dispositif FORBIO à Gedinne, ce sont les mélanges contenant du mélèze qui présentent les niveaux de compétition les plus élevés, avec des chênes plus dominés, de plus faibles dimensions initiales et un accès à la lumière réduit. De manière générale, le trait écologique le plus décisif semble être la vitesse de croissance juvénile, qui influence la structure verticale du peuplement. À l'inverse, les compositions à faible concurrence globale comme la monoculture de chêne permettent aux chênes de conserver une position sociale plus favorable.

Les hypothèses concernant les déterminants de la croissance individuelle du chêne cible ont pu globalement être confirmées. Comme attendu, la taille initiale a favorisé l'accroissement en

grosesseur des chênes cibles. En revanche, l'effet de la compétition locale influence négativement l'accroissement individuel.

Le facteur clé étudié dans la présente recherche, l'éclaircie, a un effet positif sur l'accroissement, ce qui confirme l'intérêt de cette intervention sylvicole pour favoriser la survie et donc le maintien de l'arbre cible en monoculture comme en mélange. Les chênes cibles éclaircis présentent globalement une croissance supérieure aux témoins, et une augmentation de l'intensité locale de l'éclaircie tend également à favoriser l'accroissement.

L'effet de la composition sur la réponse à l'éclaircie n'a toutefois pas pu être démontré de manière générale. Seuls les modèles prédisant la différence d'accroissement entre chênes cibles témoins et éclaircis ont suggéré une différence plus élevée dans certaines compositions qu'en monoculture de chêne. Ceci est probablement lié à des différences d'accès à la lumière et de position sociale de ces chênes, par rapport aux individus d'une monoculture. Les chênes cibles des mélanges comportant des espèces plus compétitives semblent ainsi avoir un besoin particulier en éclaircie. Les accroissements absolus les plus élevés restent observés dans les compositions à plus faible concurrence globale, parmi lesquelles se trouve la monoculture. Cela suggère que, même si le bénéfice relatif par rapport au chêne témoin peut être plus visible dans des contextes très compétitifs, les meilleures conditions pour maximiser l'accroissement absolu des chênes cibles restent des situations de concurrence globale modérée ou faible.

En ce qui concerne l'intensité locale de l'éclaircie, l'absence d'interaction significative avec la composition s'explique probablement par la construction de certains indicateurs, ainsi que par le nombre limité d'observations dans certaines compositions, en particulier les mélanges à quatre espèces. Ces résultats, de manière générale, doivent donc être interprétés à la lumière de certaines limites méthodologiques, qui ouvrent plusieurs perspectives pour de futurs suivis.

Tout d'abord, le peuplement Fa_Qu a été généralement considéré comme composition de faible compétition locale et de faible concurrence globale sur la base des indicateurs utilisés. Or, cela est en partie lié à la construction mathématique des indicateurs, qui prennent davantage la grosseur et la hauteur en compte. L'effet compétitif est cependant probablement plus élevé, comme l'éclaircissement relatif le montre en partie. Comme l'estimation du modèle M3 a pu le suggérer, la différence entre l'accroissement d'un chêne cible éclairci et témoin dans Fa_Qu diffère significativement de celui dans la monoculture. Ainsi, les indicateurs utilisés sous-estiment probablement l'effet compétitif du hêtre. De manière générale, cela conduit au constat que tous les coefficients estimés par les modèles dépendent des indicateurs considérés. Une détection de certains effets écologiques peut ainsi être rendue plus complexe, si la construction mathématique de l'indicateur l'influence. Une étape ultérieure, en dehors du cadre de cette recherche, pourrait en effet identifier d'autres indicateurs qui reflètent mieux les différents effets écologiques.

En outre, un autre effet de l'éclaircie n'a pas été abordé dans la présente recherche. Si l'éclaircie libère le chêne cible de la compétition locale, elle ouvre également l'écran des voisins, exposant l'arbre cible à des risques potentiellement accrus vis-à-vis de la sécheresse. Cette recherche ne s'est pas focalisée sur cet aspect alors que c'est un facteur non négligeable pour la santé de l'arbre. Une analyse de l'accroissement en hauteur par rapport à l'accroissement en grosseur pourrait fournir des informations sur l'allocation de la croissance, ainsi que sur son risque potentiel de souffrir d'un manque d'eau (Gessler et al., 2026).

Dans une optique de production de bois de chêne, où l'objectif est de réduire la durée du cycle sylvicole, les accroissements absolus plus élevés observés dans les mélanges à faible concurrence globale suggèrent une production plus rapide dans ces contextes. En revanche, si l'objectif est de produire du bois de qualité, des mélanges à concurrence globale plus élevée pourraient favoriser la formation de billes moins branchues (Philippart et al., 2023). Cette question dépasse le cadre de la présente recherche, mais elle constitue une piste importante

à approfondir, notamment dans un contexte de changements futurs où les objectifs de production, de qualité du bois et de résilience devront être conciliés.

Enfin, les résultats ne portent que sur une seule saison de croissance, deux ans après l'éclaircie considérée. La première saison post-éclaircie manque dans l'analyse et aurait pu apporter des résultats complémentaires. Parallèlement, les relations observées entre composition, compétition et croissance sont susceptibles d'évoluer à long terme, à l'échelle du cycle sylvicole (Bauhus et al., 2017). Les analyses de la présente recherche restent néanmoins importantes, car cette phase juvénile est déterminante pour le maintien et le développement futur des chênes cibles. Il est ainsi envisageable de suivre à long terme l'évolution de la croissance des chênes cibles. Cela permettra notamment de prendre en compte la dynamique de réponse, et de déterminer si certaines réponses à l'éclaircie apparaissent avec retard, après un temps de récupération des chênes cibles.

6 Références bibliographiques

- Acquah, S. B., & Marshall, P. L. (2020). Assessing differences in competitive effects among tree species in central British Columbia, Canada. *Forests*, 11(2), 167. <https://doi.org/10.3390/f11020167>
- Aldea, J., Bravo, F., Bravo-Oviedo, A., Ruiz-Peinado, R., Rodríguez, F., & Del Río, M. (2017). Thinning enhances the species-specific radial increment response to drought in Mediterranean pine-oak stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 237–238, 371–383. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.02.009>
- Allegrini, C., & Depierre, A. (2006). La sélection des arbres d'avenir (Édition 2006; p. 20). ONF et Centre régional de la propriété forestière de Franche-Comté. https://bourgognefranche-comte.cnpf.fr/sites/socle/files/cnpf-old/arbres_avenir_2006.pdf
- Apogee. (n.d.). MQ-200X Quantum separate sensor with handheld meter. Apogee Instruments, Inc. Retrieved 30 April 2026, from <https://www.apogeeinstruments.com/mq-200x-quantum-separate-sensor-with-handheld-meter/>
- Balleux, P. (1990). Le chêne hier, aujourd'hui et demain. *Forêt Wallonne*, (9), 14–22.
- Baudry, O., Charmetant, C., Collet, C., & Ponette, Q. (2013). Mesurer l'ouverture du couvert et estimer la disponibilité en lumière en forêt feuillue au moyen du densiomètre convexe. *Forêt Nature*, (126), 17–28.
- Baudry, O., Charmetant, C., & Ponette, Q. (2010). Le climat lumineux en forêt et quelques outils d'estimation. *Forêt Nature*, (107), 42–54.
- Bauhus, J., Forrester, D. I., Pretzsch, H., Felton, A., Pyttel, P., & Benneter, A. (2017). Silvicultural options for mixed-species stands. In *Mixed-Species Forests: Ecology and Management* (pp. 433–501). Scopus. https://doi.org/10.1007/978-3-662-54553-9_9
- Bhandari, S. K., Veneklaas, E. J., McCaw, L., Mazanec, R., & Renton, M. (2021). Investigating the effect of neighbour competition on individual tree growth in thinned and unthinned eucalypt forests. *Forest Ecology and Management*, 499, 119637. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119637>
- Boivin, F. (2010). Est-ce que la position et l'espèce des voisins comptent? : Une comparaison d'indices de compétition dans des peuplements âgés de huit à quinze ans de la forêt boréale mixte [Mémoire]. Université du Québec à Montréal. 64 p.
- Breda, N., Granier, A., & Aussenac, G. (1995). Effects of thinning on soil and tree water relations, transpiration and growth in an oak forest (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). *Tree Physiology*, 15(5), 295–306. <https://doi.org/10.1093/treephys/15.5.295>
- Brockerhoff, E. G., Barbaro, L., Castagneyrol, B., Forrester, D. I., Gardiner, B., González-Olabarria, J. R., Lyver, P. O., Meurisse, N., Oxbrough, A., Taki, H., Thompson, I. D., Van Der Plas, F., & Jactel, H. (2017). Forest biodiversity, ecosystem functioning and the provision of ecosystem services. *Biodiversity and Conservation*, 26(13), 3005–3035. <https://doi.org/10.1007/s10531-017-1453-2>
- Buechling, A., Martin, P. H., & Canham, C. D. (2017). Climate and competition effects on tree growth in Rocky Mountain forests. *Journal of Ecology*, 105(6), 1636–1647. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12782>

Burschel, P., & Huss, J. (1997). Grundriß des Waldbaus-ein Leitfaden für Studium und Praxis. Parey.

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*, 34(4), 778–787. Scopus. <https://doi.org/10.1139/x03-232>

Canham, C. D., Papaik, M. J., Uriarte, M., McWilliams, W. H., Jenkins, J. C., & Twery, M. J. (2006). Neighborhood analyses of canopy tree competition along environmental gradients in New England forests. *Ecological Applications*, 16(2), 540–554. Scopus. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2006\)016%5B0540:NAOCTC%5D2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2006)016%5B0540:NAOCTC%5D2.0.CO;2)

CCNUCC. (n.d.). L'Accord de Paris | CCNUCC. L'Accord de Paris. Retrieved 17 February 2026, from <https://unfccc.int/fr/a-propos-des-ndcs/l-accord-de-paris>

Černý, J., Špulák, O., Kománek, M., Žižková, E., & Sýkora, P. (2024). Sessile oak (*Quercus petraea* [Matt.] Liebl.) and its adaptation strategies in the context of global climate change: A review. *Central European Forestry Journal*, 70(2), 77–94. <https://doi.org/10.2478/forj-2024-0012>

Coates, K. D., Canham, C. D., & LePage, P. T. (2009). Above- versus below-ground competitive effects and responses of a guild of temperate tree species. *Journal of Ecology*, 97(1), 118–130. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2008.01458.x>

Collado, E., Piqué, M., Coello, J., de-Dios-García, J., Fuentes, C., & Coll, L. (2023). Close-to-nature management effects on tree growth and soil moisture in Mediterranean mixed forests. *Forest Ecology and Management*, 549, 121457. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121457>

Coomes, D. A., & Allen, R. B. (2007). Effects of size, competition and altitude on tree growth. *Journal of Ecology*, 95(5), 1084–1097. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2007.01280.x>

Courbaud, B., De Coligny, F., & Cordonnier, T. (2003). Simulating radiation distribution in a heterogeneous Norway spruce forest on a slope. *Agricultural and Forest Meteorology*, 116(1–2), 1–18. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00254-X](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00254-X)

Del Río, M., Aldea, J., Ruiz-Peinado, R., Bielak, K., Bravo, F., Jourdan, M., Ordoñez, C., Pach, M., Uhl, E., & Pretzsch, H. (2025). Heavy crop tree thinning can enhance net overyielding in Scots pine-sessile oak mixed stands by reducing pine tree mortality. *Forest Ecology and Management*, 598, 123245. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.123245>

Deschênes, A. B. (2016). Modélisation de la croissance et de la qualité du bois de l'épinette blanche (*Picea glauca*) à l'échelle individuelle en fonction de la compétition inter- et intra-spécifique [Mémoire]. Université du Québec à Rimouski. 93 p.

Dhôte, J.-F., & Hercé, É. de. (1994). Un modèle hyperbolique pour l'ajustement de faisceaux de courbes hauteur-diamètre. *Canadian Journal of Forest Research*, 24(9), 1782–1790. <https://doi.org/10.1139/x94-230>

Engel, M., Vospernik, S., Toigo, M., Morin, X., Tomao, A., Trotta, C., Steckel, M., Barbat, A., Nothdurft, A., Pretzsch, H., Del Río, M., Skrzyszewski, J., Ponette, Q., Löf, M., Jansons, Å., & Brazaitis, G. (2021). Simulating the effects of thinning and species mixing on stands of oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl./*Quercus robur* L.) and pine (*Pinus sylvestris* L.) across Europe. *Ecological Modelling*, 442, 109406. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109406>

Forêt Nature. (2024). Formations programme DNF 2024-2025. 26 p. <https://foretnature.be/wp-content/uploads/2025/01/programmeFOR24-25-DNF-v6b.pdf>

Forrester, D. I., Tachauer, I. H. H., Annighoefer, P., Barbeito, I., Pretzsch, H., Ruiz-Peinado, R., Stark, H., Vacchiano, G., Zlatanov, T., Chakraborty, T., Saha, S., & Sileshi, G. W. (2017). Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate. *Forest Ecology and Management*, 396, 160–175. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.04.011>

Fukumoto, K., Nishizono, T., Kitahara, F., & Hosoda, K. (2020). Evaluation of individual distance-independent diameter growth models for Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) trees under multiple thinning treatments. *Forests*, 11(3), 344. <https://doi.org/10.3390/f11030344>

Gebhardt, T. (2017). *Picea abies* and climate change – does increasing thinning intensity prevent drought stress? [Doctoral Thesis, Georg-August-University Göttingen]. <https://doi.org/10.53846/goediss-6515>

Gessler, A., Grünzweig, J. M., Bigio, L., Hartmann, H., McDowell, N., Krumm, F., Bose, A. K., Rigling, A., Bugmann, H., Vitali, V., Schneider, P., Lever, J. J., Schweier, J., Kempel, A., Zimmermann, N. E., Brun, P., Bauhus, J., Wilhelm, M., & Bottero, A. (2026). Shaping future forests: How can ecophysiology support climate-smart forest management? *New Phytologist*, 250(5), 2778–2813. <https://doi.org/10.1111/nph.71007>

Grossiord, C. (2020). Having the right neighbors: How tree species diversity modulates drought impacts on forests. *New Phytologist*, 228(1), 42–49. <https://doi.org/10.1111/nph.15667>

Haglöf Sweden. (2021, February 25). Vertex 5 | Haglöf Sweden AB. <https://haglofsweden.com/project/vertex-5/>

Hainry, D., & Colombet, M. (2010). Bilan des introductions et perspectives d'utilisation des mélèzes d'Europe, du Japon et hybride en Bretagne. CRPF de Bretagne. https://bretagne-paysdelaloire.cnpf.fr/sites/bretagne-paysdelaloire/files/2022-01/synthese_melezes_1.pdf

Hartmann, H., Battisti, A., Brockerhoff, E. G., Belka, M., Hurling, R., Jactel, H., Oliva, J., Rousselet, J., Terhonen, E., Ylioja, T., Melin, M., Olson, Å., De Prins, F., Zhang, K., Åslund, M. S., Davydenko, K., Menkis, A., Elfstrand, M., Zúbrik, M., ... Fischer, R. (2025). European forests are under increasing pressure from global change-driven invasions and accelerating epidemics by insects and diseases. *Journal of Cultivated Plants*, 77(02), 6–24. <https://doi.org/10.5073/JFK.2025.02.02>

Huth, F., Tischer, A., Nikolova, P., Feldhaar, H., Wehnert, A., Hülsmann, L., Bauhus, J., Heer, K., Vogt, J., Ammer, C., Berger, U., Bernhardt-Römermann, M., Böhme, M., Bugmann, H., Buse, J., Demant, L., Dörfler, I., Ewald, J., Feldmann, E., ... Schuldt, B. (2025). Ecological assessment of forest management approaches to develop resilient forests in the face of global change in Central Europe. *Basic and Applied Ecology*, 86, 66–100. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2025.05.001>

IPCC. (n.d.). AR6 synthesis report: Summary for policymakers headline statements. Retrieved 17 February 2026, from <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/resources/spm-headline-statements/>

Lavorel, S. (2025). Ecosystem transformation by climate change and its consequences for humans. *Comptes Rendus. Géoscience*, 357(G1), 489–501. <https://doi.org/10.5802/crgeos.303>

Lhotka, J. M. (2017). Examining growth relationships in *Quercus* stands: An application of individual-tree models developed from long-term thinning experiments. *Forest Ecology and Management*, 385, 65–77. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.11.029>

- Lhotka, J. M., & Loewenstein, E. F. (2011). An individual-tree diameter growth model for managed uneven-aged oak-shortleaf pine stands in the Ozark Highlands of Missouri, USA. *Forest Ecology and Management*, 261(3), 770–778. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.12.008>
- Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Garcia-Gonzalo, J., Seidl, R., Delzon, S., Corona, P., Kolström, M., Lexer, M. J., & Marchetti, M. (2010). Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 698–709. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.023>
- McNeil, B. E., Fahey, R. T., King, C. J., Erazo, D. A., Heimerl, T. Z., & Elmore, A. J. (2023). Tree crown economics. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 21(1), 40–48. <https://doi.org/10.1002/fee.2588>
- Messier, C., Bauhus, J., Doyon, F., Maure, F., Sousa-Silva, R., Nolet, P., Mina, M., Aquilué, N., Fortin, M.-J., & Puettmann, K. (2019). The functional complex network approach to foster forest resilience to global changes. *Forest Ecosystems*, 6(1), 21. <https://doi.org/10.1186/s40663-019-0166-2>
- Messier, C., Bauhus, J., Sousa-Silva, R., Auge, H., Baeten, L., Barsoum, N., Bruelheide, H., Caldwell, B., Cavender-Bares, J., Dhiedt, E., Eisenhauer, N., Ganade, G., Gravel, D., Guillemot, J., Hall, J. S., Hector, A., Hérault, B., Jactel, H., Koricheva, J., ... Zemp, D. C. (2022). For the sake of resilience and multifunctionality, let's diversify planted forests! *Conservation Letters*, 15(1), e12829. <https://doi.org/10.1111/conl.12829>
- Mohr, J. S., Bastit, F., Grünig, M., Knoke, T., Rammer, W., Senf, C., Thom, D., & Seidl, R. (2025). Rising cost of disturbances for forestry in Europe under climate change. *Nature Climate Change*, 15(10), 1078–1083. <https://doi.org/10.1038/s41558-025-02408-9>
- Nailis, B., Dandoy, J.-C., Colson, V., & Lacaille, B. (2024). PANORABOIS 2024 (p. 112). Filière Bois Wallonie.
- Nicolescu, V.-N., Vor, T., Brus, R., Đodan, M., Perić, S., Podrázský, V., Andrašev, S., Tsavkov, E., Ayan, S., Yücedağ, C., Trajkov, P., Kolevska, D. D., Buzatu-Goanță, C., Pástor, M., Mačejovský, V., Modranský, J., Klisz, M., Gil, W., Lavnyy, V., ... Bartlett, D. (2025). Management of sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.), a major forest species in Europe. *Journal of Forestry Research*, 36(1), 78. <https://doi.org/10.1007/s11676-025-01868-1>
- Philippart, M., Ponette, Q., Jonard, M., André, F., & Timal, G. (2023). Effet du mélange d'essences sur les propriétés architecturales du chêne sessile en jeune plantation [Mémoire]. Université catholique de Louvain. 140 p.
- 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(5), 1267–1294. <https://doi.org/10.1007/s10342-021-01388-7>
- Prevosto, B. (2005). Les indices de compétition en foresterie: Exemples d'utilisation, intérêts et limites. *Revue Forestière Française*, (5), 413. <https://doi.org/10.4267/2042/5062>
- Rieder, J. S., Link, R. M., Köthe, K., Seidel, D., Ullmann, T., Žmegač, A., Zang, C., & Schuldt, B. (2024). TreeCompR: Tree competition indices for inventory data and 3D point clouds. *Methods in Ecology and Evolution*, 15(12), 2198–2208. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.14414>

- Roberts, S. D., & Harrington, C. A. (2008). Individual tree growth response to variable-density thinning in coastal Pacific Northwest forests. *Forest Ecology and Management*, 255(7), 2771–2781. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.01.043>
- Rondeux, J. (2021). La mesure des arbres et des peuplements forestiers. Uliège Library. 738 p.
- Saha, S., Kuehne, C., & Bauhus, J. (2014). Intra- and interspecific competition differently influence growth and stem quality of young oaks (*Quercus robur* L. and *Quercus petraea* (Mattuschka) Liebl.). *Annals of Forest Science*, 71(3), 381–393. <https://doi.org/10.1007/s13595-013-0345-1>
- Sardin, T. (2008). Chênaies continentales. Office national des forêts (ONF), Fontainebleau. 456 p.
- Schröder, J., Röhle, H., Eisenhauer, D.-R., & Brand, S. (2006). Zum Jugendwachstum der Eiche unter Kiefernschirm in Sachsen. *Forstarchiv*, 77, 195–202.
- Société Royale Forestière de Belgique. (n.d.). La carte interactive forêt mosaïque. Forêt Mosaïques - Carte interactive. Retrieved 20 February 2026, from <https://mosaïque.srfb.be/>
- Spiecker, H. (2021). Production of valuable oak wood in Europe. *Annals of Forest Research*, 64(1), 5–12. <https://doi.org/10.15287/afr.2021.2207>
- SPW ARNE, EDIWALL, & DEMNA. (2021). L'environnement wallon en 10 infographies (p. 158) [Brochure]. SPW, EDIWALL.
- Stadt, K. J., Huston, C., Coates, K. D., Feng, Z., Dale, M. R. T., & Lieffers, V. J. (2007). Evaluation of competition and light estimation indices for predicting diameter growth in mature boreal mixed forests. *Annals of Forest Science*, 64(5), 477–490. <https://doi.org/10.1051/forest:2007025>
- Stimm, K., Heym, M., Nagel, R.-V., Uhl, E., & Pretzsch, H. (2022). Long-term productivity of monospecific and mixed oak (*Quercus petraea* [Matt.] Liebl. and *Quercus robur* L.) stands in Germany: Growth dynamics and the effect of stand structure. *Forests*, 13(5), 724. <https://doi.org/10.3390/f13050724>
- Titeux, H., Jonard, M., Bay, É., Laurent, C., Mertens, P., & Ponette, Q. (2018). L'évolution de la santé des forêts wallonnes. *Forêt Nature*, (147), 48–60.
- Ulbricht, M., Uhl, E., Biber, P., Hilmers, T., & Pretzsch, H. (2026). Heavy thinning from above affects growth and coarse root-stem allometry of mature Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) in monospecific and mixed-species stands. *Trees*, 40(1), 6. <https://doi.org/10.1007/s00468-025-02704-z>
- Van Der Plas, F., Manning, P., Allan, E., Scherer-Lorenzen, M., Verheyen, K., Wirth, C., Zavala, M. A., Hector, A., Ampoorter, E., Baeten, L., Barbaro, L., Bauhus, J., Benavides, R., Benneter, A., Berthold, F., Bonal, D., Bouriaud, O., Bruelheide, H., Bussotti, F., ... Fischer, M. (2016). Jack-of-all-trades effects drive biodiversity–ecosystem multifunctionality relationships in European forests. *Nature Communications*, 7(1), 11109. <https://doi.org/10.1038/ncomms11109>
- Van Gameren, V., & Zaccai, E. (2015). Private forest owners facing climate change in Wallonia: Adaptive capacity and practices. *Environmental Science & Policy*, 52, 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.05.004>

Von Oheimb, G., Lang, A. C., Bruelheide, H., Forrester, D. I., Wäsche, I., Yu, M., & Härdtle, W. (2011). Individual-tree radial growth in a subtropical broad-leaved forest: The role of local neighbourhood competition. *Forest Ecology and Management*, 261(3), 499–507. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.10.035>

Wallonie environnement SPW. (n.d.). Fichier écologique des essences. Retrieved 17 February 2026, from <https://www.fichierecologique.be/#/>

Yue, Q., Geng, Y., Von Gadow, K., Fan, C., Zhang, C., & Zhao, X. (2022). Effects of neighborhood interaction on tree growth in a temperate forest following selection harvesting. *Ecological Indicators*, 136, 108663. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108663>

Zeng, X., Li, J., Peng, Q., Gong, C., Ran, H., Xie, T., Liao, T., Zhou, T., Huang, D., Song, Q., Liu, J., & Yang, Q. (2024). Differences in response of tree species at different succession stages to neighborhood competition. *Forests*, 15(3), 435. <https://doi.org/10.3390/f15030435>

Zhang, S., Landuyt, D., Verheyen, K., & De Frenne, P. (2022). Tree species mixing can amplify microclimate offsets in young forest plantations. *Journal of Applied Ecology*, 59(6), 1428–1439. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14158>

Zhang, Z., Papaik, M. J., Wang, X., Hao, Z., Ye, J., Lin, F., & Yuan, Z. (2016). The effect of tree size, neighborhood competition and environment on tree growth in an old-growth temperate forest. *Journal of Plant Ecology*, rtw126. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtw126>

Zhao, D., Borders, B., Wilson, M., & Rathbun, S. L. (2006). Modeling neighborhood effects on the growth and survival of individual trees in a natural temperate species-rich forest. *Ecological Modelling*, 196(1–2), 90–102. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.02.002>

7 Annexes

7.1 Relations entre les indicateurs de l'éclaircie et les indicateurs de la concurrence globale de la composition

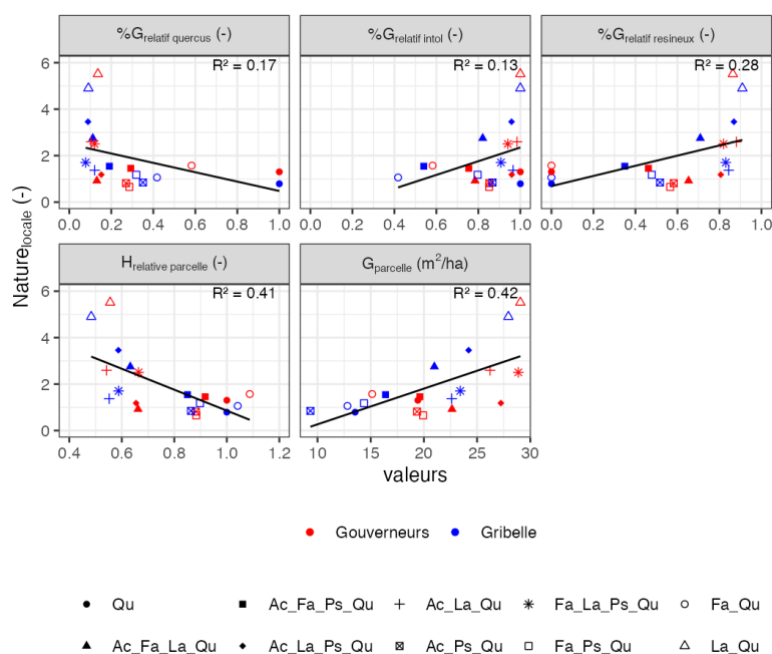


Figure annexe 1 : Relation entre la nature de l'éclaircie à l'échelle locale ($Nature_{locale}$) et les indicateurs de concurrence globale, pour le bloc de Gouverneurs (rouge) et de Gribelle (bleu).

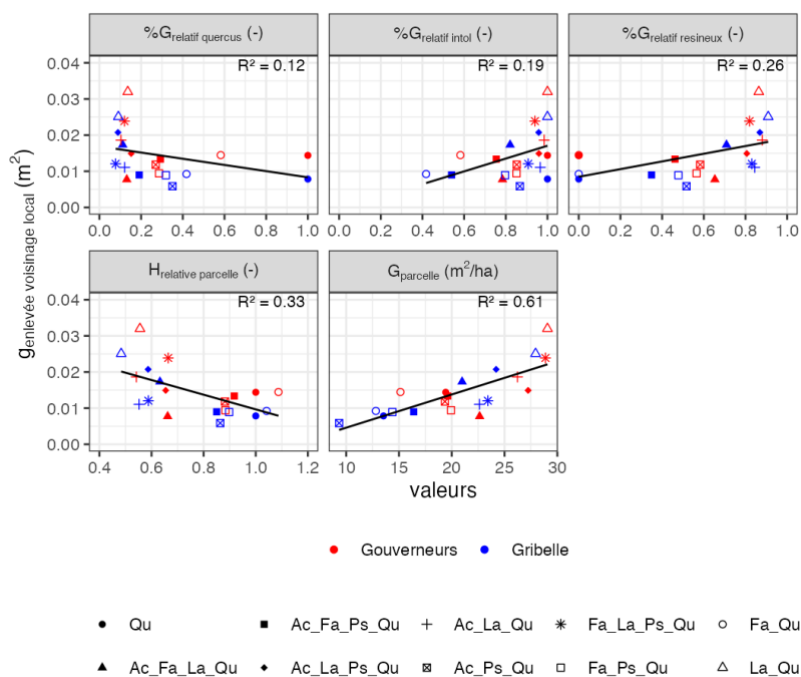


Figure annexe 2 : Relation entre la surface terrière enlevée par l'éclaircie à l'échelle locale ($g_{enlevée\ voisinage\ local}$), et les indicateurs de concurrence globale, pour le bloc de Gouverneurs (rouge) et de Gribelle (bleu).

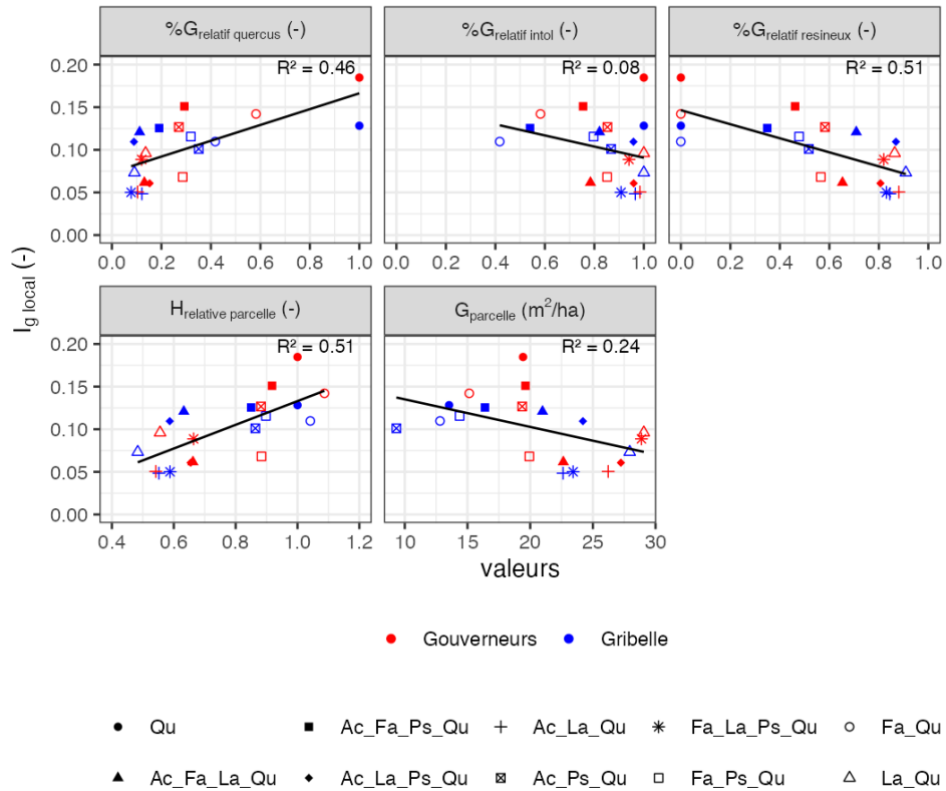


Figure annexe 3 : Relation entre l'intensité locale de l'éclaircie (lg_{local}), et les indicateurs de concurrence globale, pour le bloc de Gouverneurs (rouge) et de Gribelle (bleu).

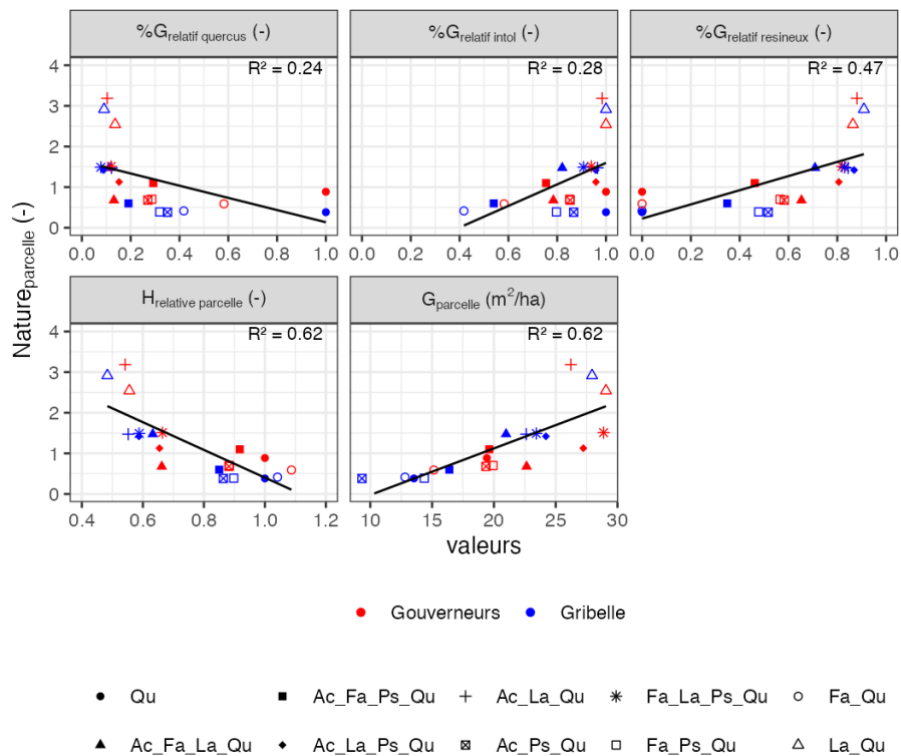


Figure annexe 4 : Relation entre la nature de l'éclaircie à l'échelle de la parcelle ($Nature_{parcelle}$) et les indicateurs de concurrence globale, pour le bloc de Gouverneurs (rouge) et de Gribelle (bleu).

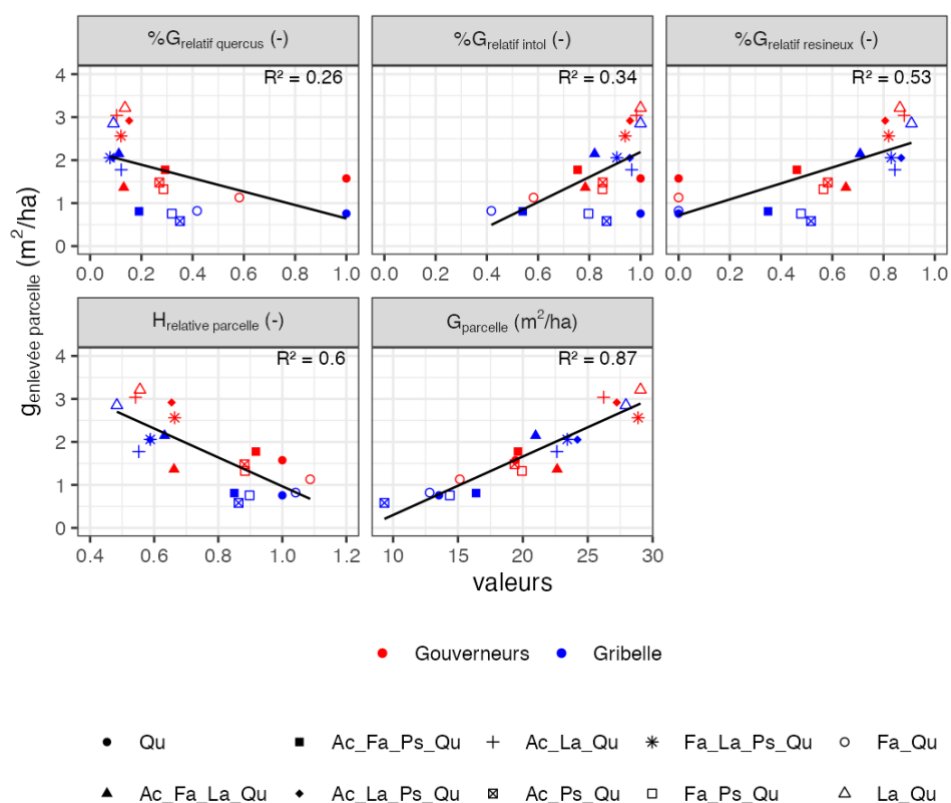


Figure annexe 5 : Relation entre la surface terrière enlevée par l'éclaircie à l'échelle de la parcelle (G_{terrain}), et les indicateurs de concurrence globale, pour le bloc de Gouverneurs (rouge) et de Gribelle (bleu).

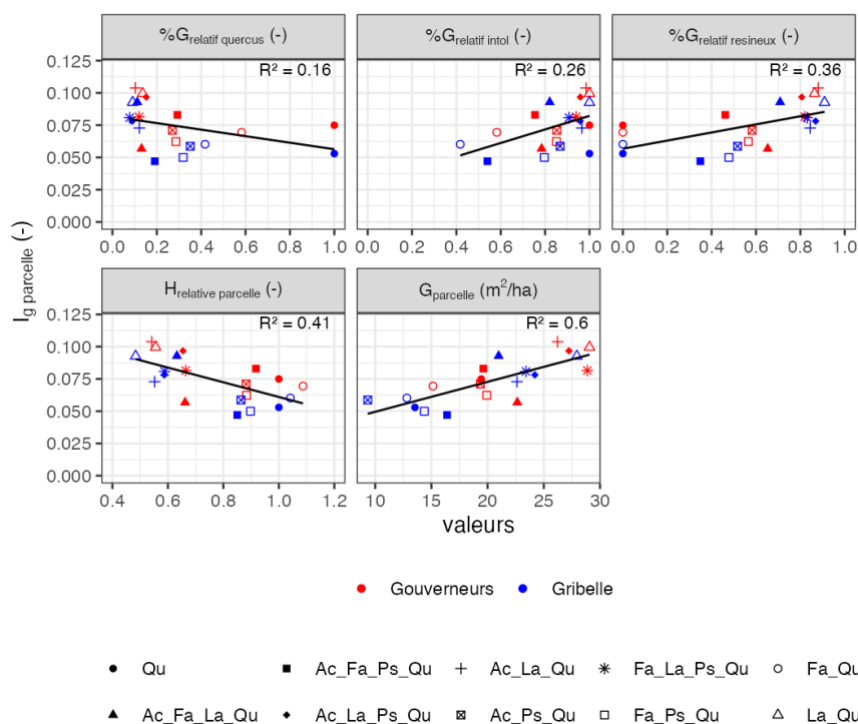


Figure annexe 6 : Relation entre l'intensité globale de l'éclaircie à l'échelle de la parcelle (I_g), et les indicateurs de concurrence globale, pour le bloc de Gouverneurs (rouge) et de Gribelle (bleu).

7.2 Relations entre la compétition locale et la concurrence globale de la composition

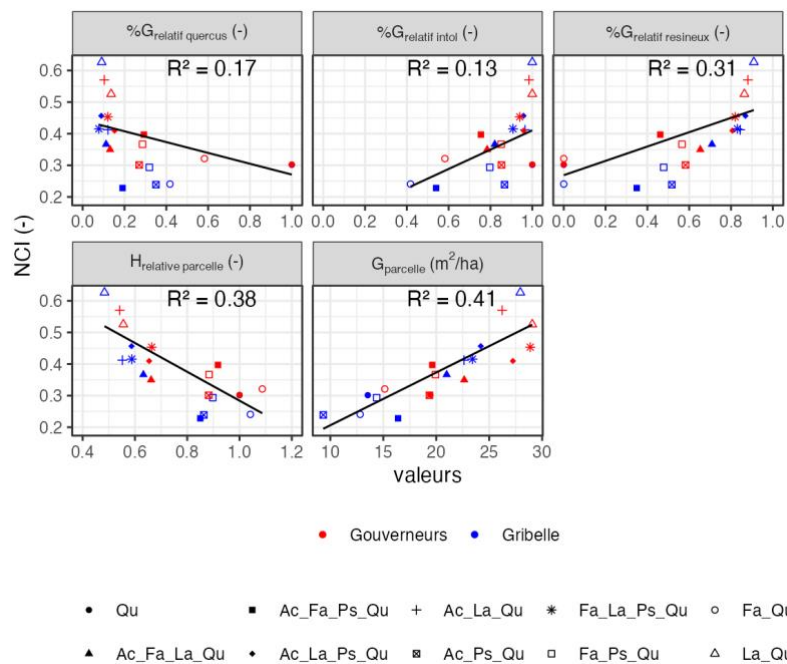


Figure annexe 7 : Relation entre l'indice de compétition du voisinage local (NCI) et les indicateurs de concurrence globale, pour le bloc de Gouverneurs (rouge) et de Gribelle (bleu).

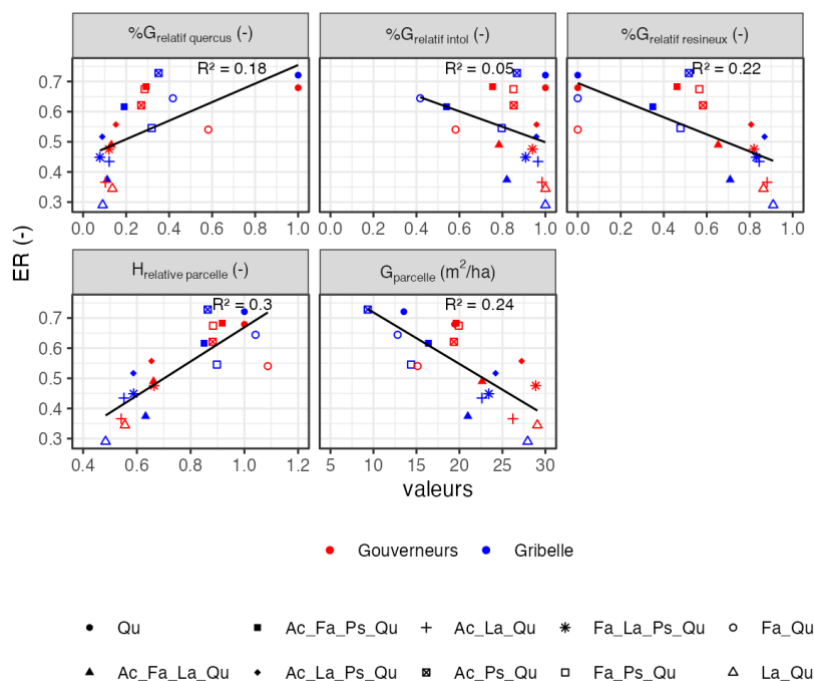


Figure annexe 8 : Relation entre l'éclairement relatif des houppiers des chênes cibles (ER) et les indicateurs de concurrence globale, pour le bloc de Gouverneurs (rouge) et de Gribelle (bleu).

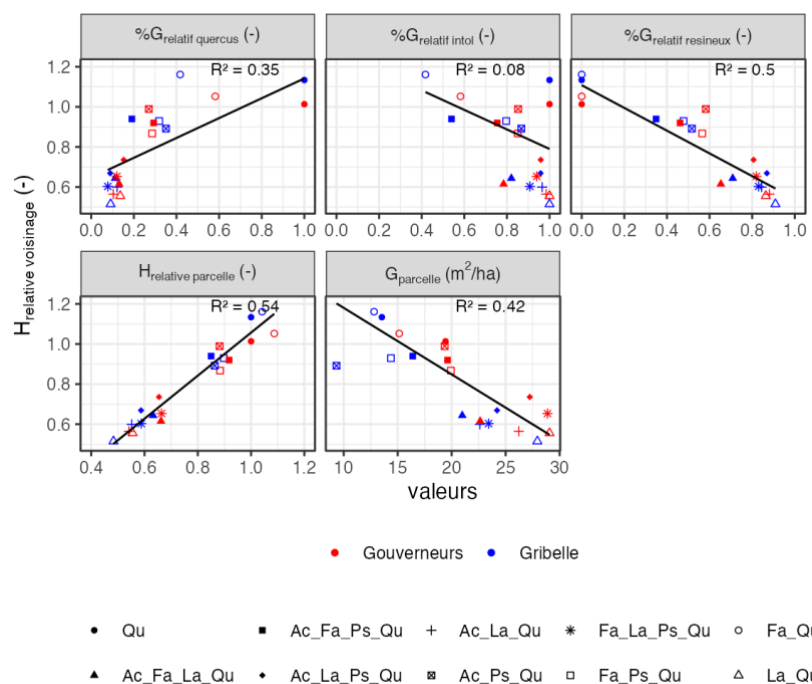


Figure annexe 9 : Relation entre la hauteur relative des chênes cibles par rapport au voisinage local ($H_{relative_voisinage}$), et les indicateurs de concurrence globale, pour le bloc de Gouverneurs (rouge) et de Gribelle (bleu).

7.3 Modèles de croissances

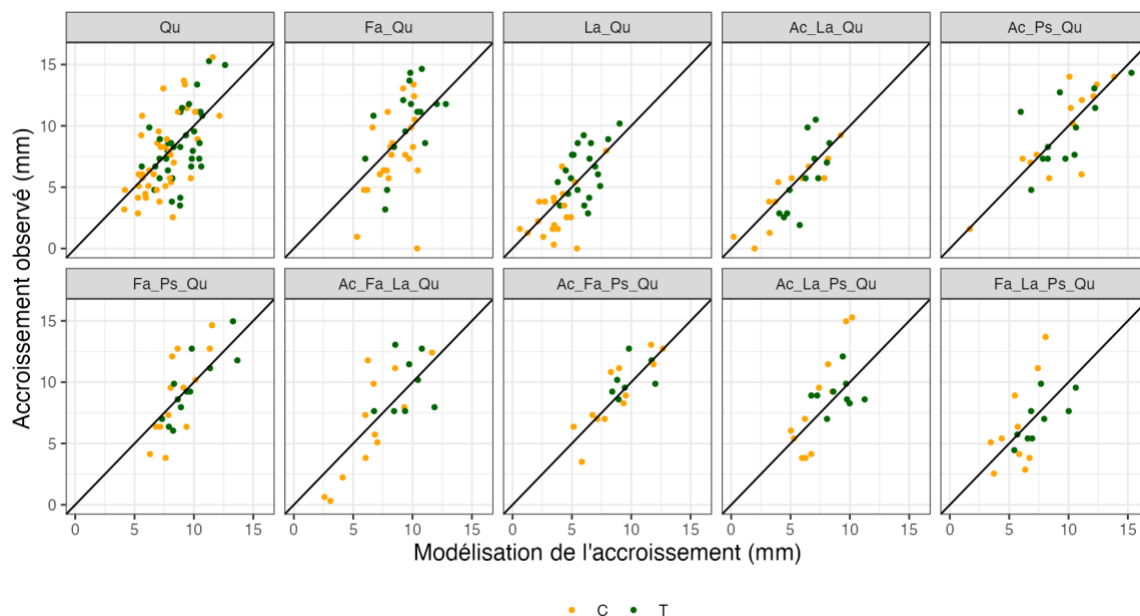


Figure annexe 10 : Comparaison des accroissements modélisés par le modèle M1 et des accroissements mesurés sur le terrain, pour les chênes cibles témoins (C) et éclaircis (T), selon les compositions.

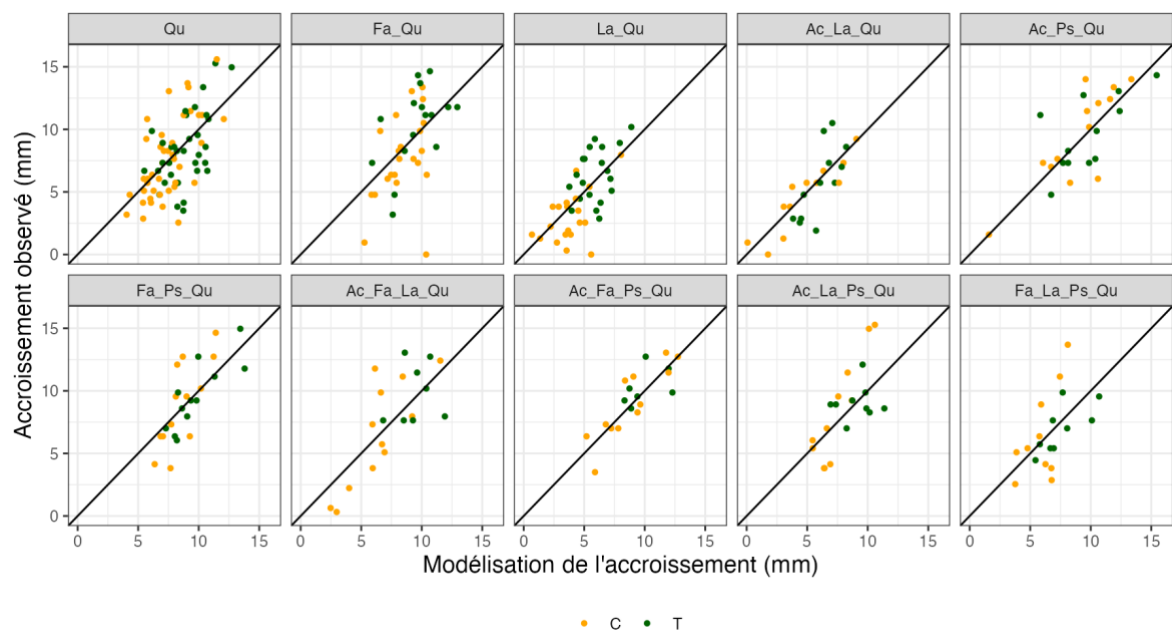


Figure annexe 11 : Comparaison des accroissements modélisés par le modèle M2 et des accroissements mesurés sur le terrain, pour les chênes cibles témoins (C) et éclaircis (T), selon les compositions.

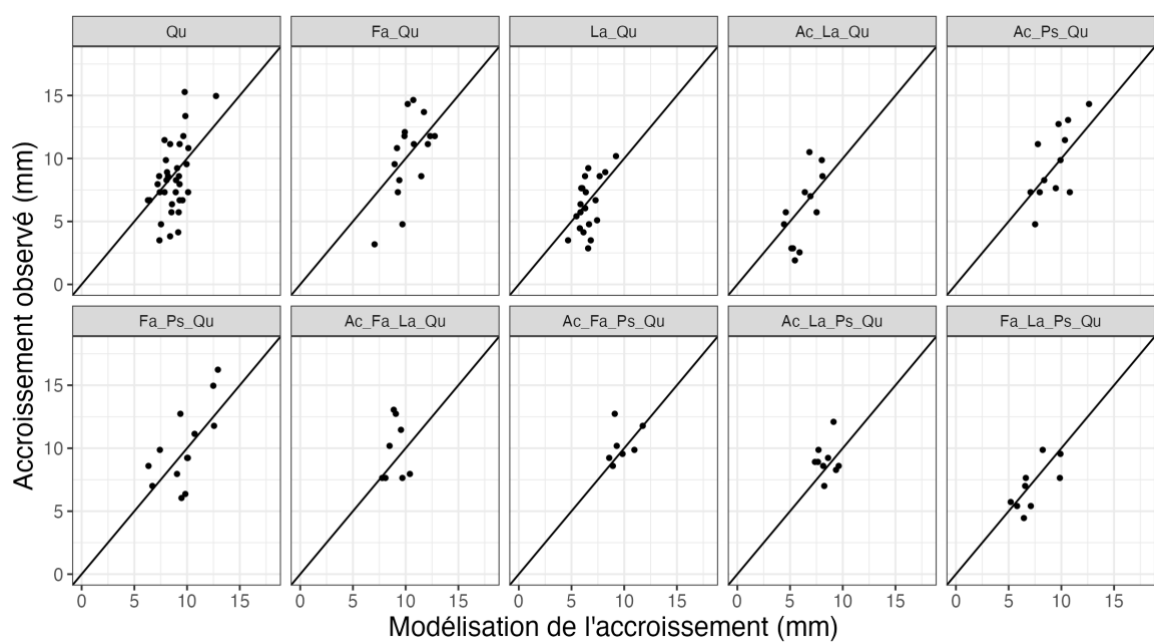


Figure annexe 12 : Comparaison des accroissement modélisés par le modèle M5 et des accroissements mesurés sur le terrain pour les chênes cibles éclaircis (T), selon les compositions.

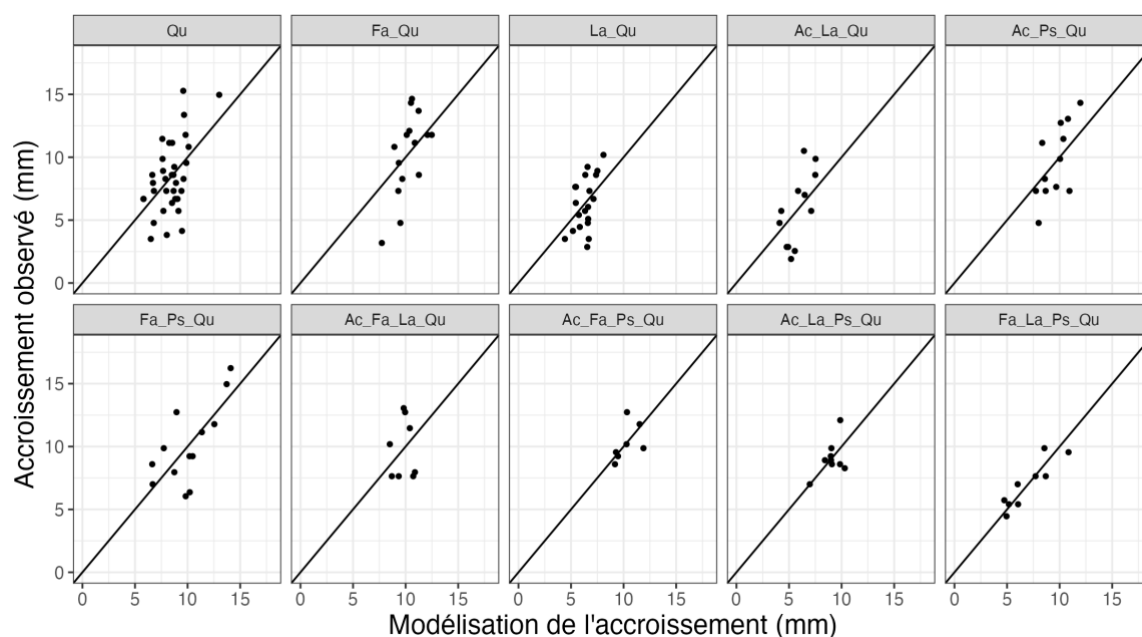


Figure annexe 13 : Comparaison des accroissements modélisés par le modèle M6 et des accroissements mesurés sur le terrain pour les chênes cibles éclaircis (T), selon les compositions.

Tableau annexe 1 : Résultats du test anova pour le modèle M3

	p-valeur
Taille initiale (diamètre initial relativisé et centré)	1,615e-15
Statut d'éclaircie	2,721e-05
Variable catégorielle de la composition	0,02704
Compétition locale	3,816e-11
Bloc	0,08042
Statut d'éclaircie : Composition	0,27524

Tableau annexe 2 : Résultats du test anova pour le modèle M6

	p-valeur
Taille initiale (diamètre initial relativisé et centré)	0,0001382
Intensité locale de l'éclaircie ($I_{g \text{ local centré}}$)	0,4295991
Variable catégorielle de la composition	0,0365207
Bloc	0,0777372
Intensité locale de l'éclaircie : Composition	0,5542593

7.4 Localisation de FORBIO à Gedinne

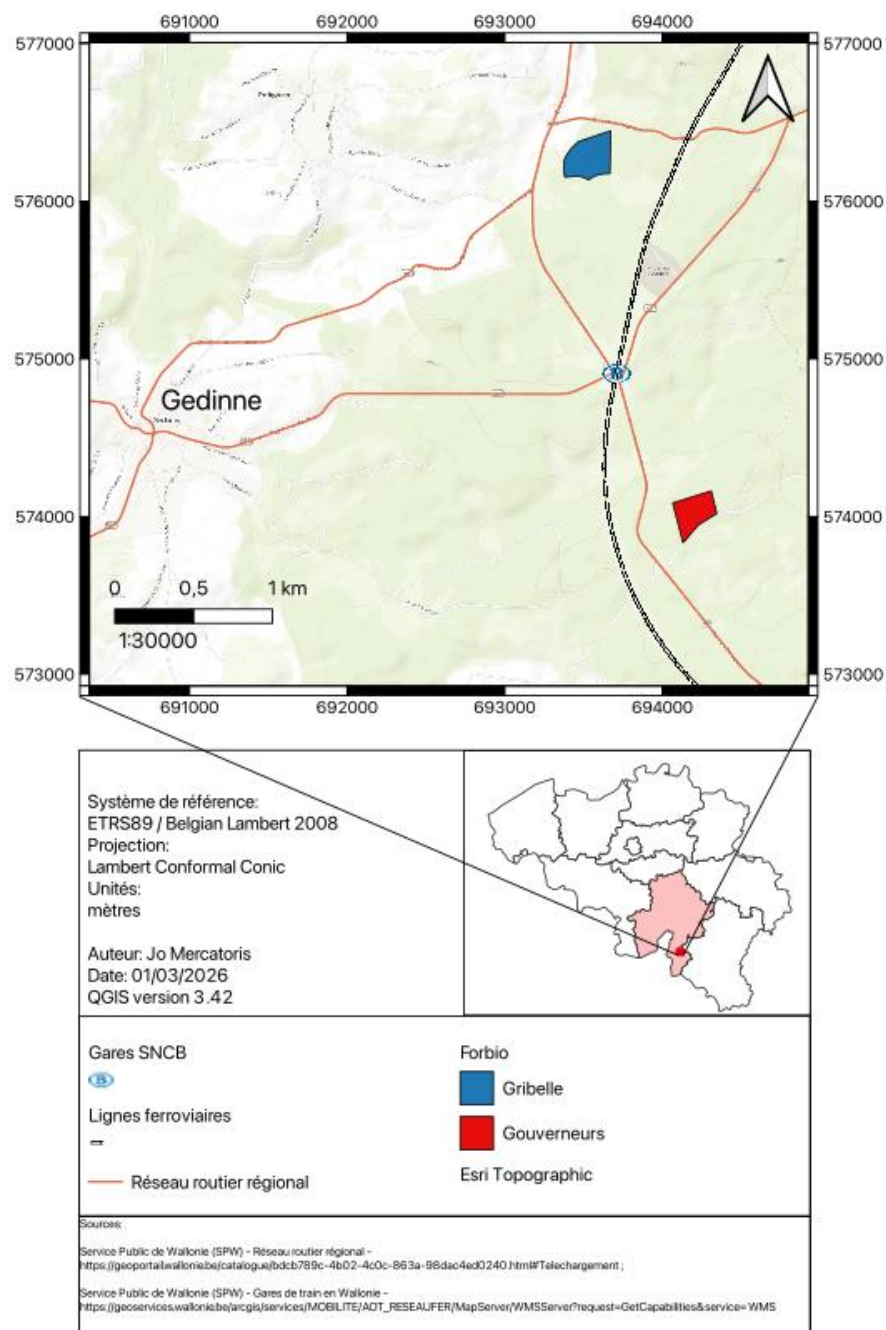


Figure annexe 14 : Localisation géographique des deux blocs de FORBIO-Gedinne

7.5 Prise de mesure de l'éclairement en champs libre

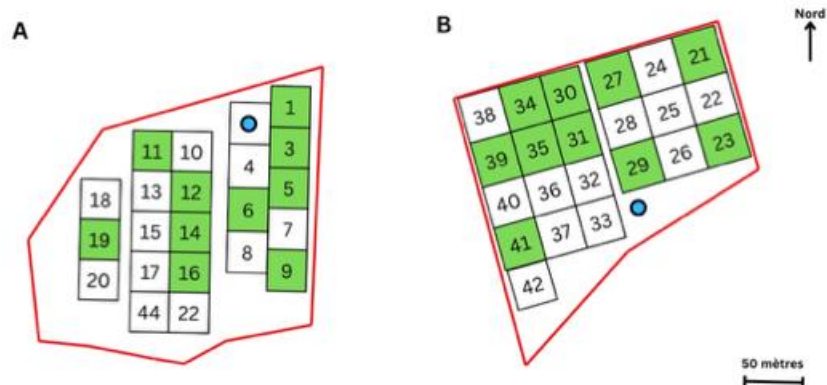


Figure annexe 15 : Endroit (point bleu) de l'emplacement du capteur pour la mesure de l'éclairement en dehors du couvert forestier, au site de Gribelle (A) et Gouverneurs (B).

Au site de Gribelle la mesure de l'éclairement a pu être réalisée dans une parcelle échouée à plusieurs reprises. Au site de Gouverneurs, le capteur était placé à l'extérieur de parcelles.

7.6 Impacts du statut d'éclaircie sur les indicateurs de compétition locale

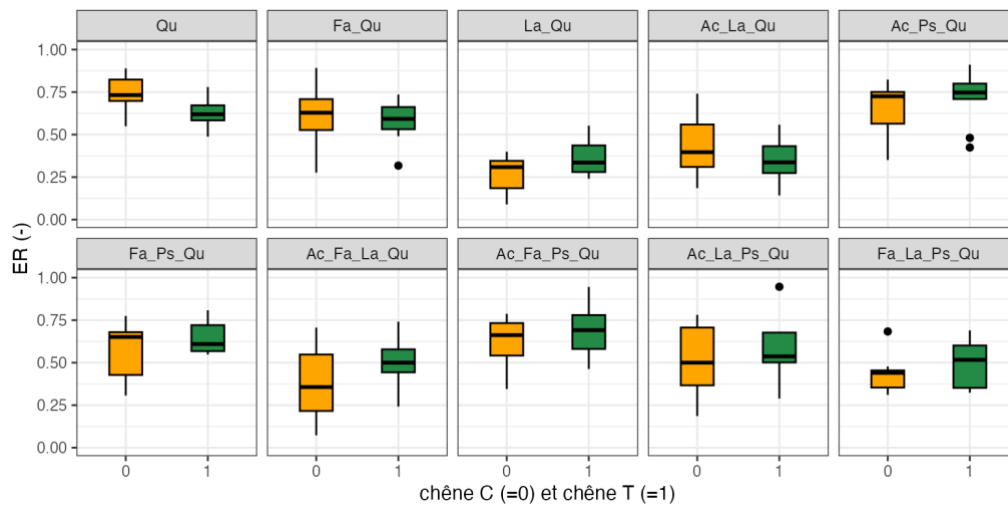


Figure annexe 16 : Relation entre l'éclairement relatif (ER) et le statut d'éclaircie (orange : chêne cible témoin (C) = 0 et vert : chêne cible éclairci (T) = 1).

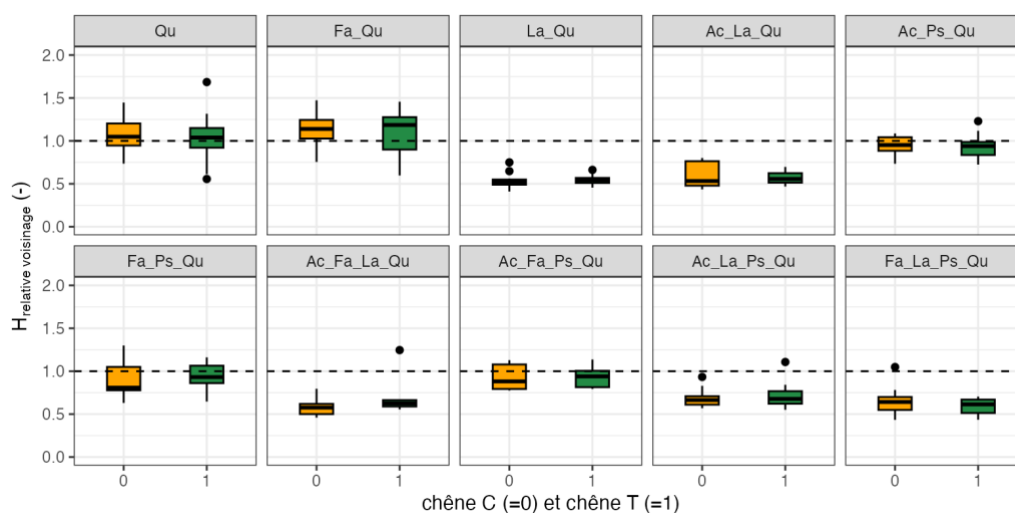


Figure annexe 17 : Relation entre la hauteur relative des chênes cibles ($H_{relative_voisinage}$) et le statut d'éclaircie (orange : chêne cible témoin (C) = 0 et vert : chêne cible éclairci (T) = 1).

7.7 Relation allométrique entre la hauteur totale et le diamètre à 1,30 m de hauteur

Tableau annexe 3 : Paramètres et informations par rapport aux relations allométriques modélisées

Essence	a	b	R ² (de la relation non logarithmique)	Nombre d'observations	CF
Chêne	65,2	0,517	0,71	1862	1,013
Hêtre	59,5	0,516	0,69	2700	1,014
Érable	48,9	0,609	0,84	1306	1,018
Douglas	42,5	0,626	0,76	1717	1,012
Mélèze	141	0,413	0,54	1882	1,010

7.8 Détails de l'inventaire des grosseurs

Le choix du mètre ruban présente plusieurs avantages (Rondeux, 2021). Le ruban est simple d'utilisation, ne nécessite aucune vérification technique et donne une mesure nette. La mesure répétée d'une même tige donne un résultat avec une dispersion quasi nulle. De plus, la mesure de la circonférence est moins ambiguë qu'une mesure au compas forestier, car elle correspond à une infinité de diamètres. La circonférence tient également compte d'une forme non circulaire de l'arbre. Dans le cas de cette recherche, où les accroissements sont supposés être de l'ordre d'une dizaine de millimètres, la mesure de circonférence est donc plus adaptée et donne des accroissements plus précis. Rondeux indique que, dans le but de transformer la grosseur en diamètre, la mesure à la hauteur de 130 centimètres est préférable à celle de 150 centimètres. Enfin, Rondeux recommande la mesure de la circonférence lorsque le but est de déterminer la surface terrière d'un nombre limité d'arbres, comme c'est le cas dans le voisinage limité autour d'un chêne cible.

Il existe des cas particuliers (Rondeux, 2021). Lorsque l'arbre a plusieurs tiges à 130 centimètres au-dessus du sol, codominantes en hauteur, la circonférence de chacune des tiges est mesurée. Une moyenne quadratique est alors utilisée pour calculer une circonférence équivalente. Il est également important de définir des conventions adaptées aux conditions de terrain et à la morphologie des arbres. Sur pente, la mesure s'effectue systématiquement du côté amont, tandis qu'en cas de tronc penché ou tortueux, la mesure de circonférence est prise en oblique suivant l'axe principal de l'arbre. Enfin, en présence d'une écorce irrégulière ou de défauts à hauteur d'homme, on choisit un niveau moyen représentatif ou on réalise deux mesures de part et d'autre pour en retenir la moyenne. La mousse éventuellement présente sur l'écorce est enlevée avant la prise de mesure afin de bien mesurer la grosseur réelle du tronc.

Réponse du chêne sessile (*Quercus petraea*) à l'éclaircie dans de jeunes plantations pures et mélangées

Jo Mercatoris

En Wallonie, où de nombreux peuplements sont monospécifiques, les peuplements mélangés – en particulier avec le chêne sessile (*Quercus petraea*) – apparaissent comme une stratégie prometteuse pour renforcer la résilience forestière dans un futur incertain. Or, dans les jeunes plantations mélangées, le chêne sessile risque d'être rapidement dominé par des essences plus compétitives à croissance plus rapide. Dans ce contexte, l'éclaircie par approche « arbre cible » semble être une approche prometteuse pour maintenir le chêne dans un mélange. Cependant, les recommandations d'éclaircie issues des monocultures ne sont pas directement transposables aux peuplements mélangés, où les interactions interspécifiques modifient fortement les relations compétitives. Il existe ainsi un besoin de recherche auquel ce mémoire vise à contribuer, en quantifiant la réponse du chêne sessile à l'éclaircie et en comparant cette réponse entre la monoculture et des peuplements mélangés.

La recherche s'appuie sur le dispositif FORBIO à Gedinne, où une éclaircie par arbre cible a été appliquée durant l'hiver 2023-2024. Dans cette étude, nous avons retenu les dix compositions comprenant du chêne, soit la monoculture, deux mélanges à deux espèces, trois mélanges à trois espèces et quatre mélanges à quatre espèces. Les essences associées sont le hêtre commun, l'érable sycomore, le douglas ainsi que le mélèze hybride.

La réponse des chênes cibles, éclaircis et témoins, durant la période de croissance de 2025 a été analysée à l'aide de modèles statistiques mixtes visant à prédire l'accroissement absolu en diamètre. L'effet de l'éclaircie a été évalué en tenant compte d'autres déterminants écologiques de la croissance, comme la taille initiale des arbres, la compétition locale ou encore la concurrence globale à l'échelle du peuplement. Six modèles de croissance ont été utilisés, selon deux approches. L'éclaircie y a été intégrée soit comme une variable binaire distinguant les chênes éclaircis des témoins, soit comme une intensité locale d'éclaircie. Pour chacune de ces deux approches, deux modèles intègrent un indicateur continu de concurrence globale, tandis qu'un troisième modèle considère la composition comme variable catégorielle, avec la monoculture de chêne comme référence.

Les résultats de la première approche montrent une différence d'accroissement positive et significative entre les chênes cibles éclaircis et les chênes témoins. Dans les compositions à concurrence globale plus élevée, où l'accès à la lumière est plus difficile, notamment dans les mélanges contenant du mélèze, cette différence tend à être plus marquée. Cette tendance suggère que l'éclaircie pourrait être particulièrement utile dans ces contextes compétitifs, même si l'effet de la composition sur la réponse à l'éclaircie n'est pas démontré de manière générale. Les résultats de la seconde approche montrent seulement une tendance non significative suggérant que l'intensité locale de l'éclaircie favoriserait l'accroissement en diamètre du chêne cible. L'effet de l'éclaircie ne dépend globalement pas significativement de la composition, mais les accroissements restent plus faibles dans les compositions à forte concurrence globale.

En conclusion, l'éclaircie par arbre cible est une méthode adaptée pour favoriser la croissance et donc le maintien du chêne sessile en mélange. Si l'objectif est d'obtenir l'accroissement absolu le plus élevé afin de réduire la durée du cycle sylvicole, les compositions à faible concurrence globale, comme la monoculture de chêne ou certains mélanges moins compétitifs, semblent les plus favorables.