

Faculté des bioingénieurs

Simulation d'itinéraires sylvicoles innovants en vue de l'irrégularisation et la diversification des pessières ardennaises

Auteur : Florent Raguzzi

Promoteur(s) : Mathieu Jonard

Lecteur(s) : Frédéric André, Gauthier Ligot

Année académique 2020-2021

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

Merci à mon promoteur Mathieu Jonard pour sa guidance et sa très grande disponibilité.

Merci également au soutien technique salvateur fourni par Frédéric André, mais aussi Louis De Wergifosse, Anne Doat, Sébastien Lambot, Gauthier Ligot, Katherine Opello, François Plume, Christine Sanchez, Ulli Schumacker, André Thibaut, Raphaël Thunus, Thibaut Thyron et Hugues Titeux.

Je suis également reconnaissant envers tous les chercheurs qui ont consenti à me partager leurs données de mesures sur semis. Je salue leur esprit de partage scientifique, et leur souhaite de longues et fructueuses années de recherche.

Enfin, merci à mes proches et ami.e.s pour leur présence tout le long de mon parcours.

Table des matières

1	INTRODUCTION	5
2	STRATEGIE DE RECHERCHE	6
3	ETAT DE L'ART	7
3.1	L'EPICEA EN WALLONIE	7
3.2	AUTECOLOGIE DE L'EPICEA	9
3.3	PROBLEMES RECENTS ET FUTURS	9
3.4	INTERET DES PEUPELEMENTS IRREGULIERS MELANGES	11
3.5	METHODES DE RENOUVELLEMENT ENVISAGEABLES	13
3.5.1	ABANDON DE LA SYLVICULTURE	13
3.5.2	TRAITEMENT EN FUTAIE REGULIERE AVEC SYLVICULTURE TRADITIONNELLE	13
3.5.3	TRAITEMENT EN FUTAIE REGULIERE AVEC SYLVICULTURE DYNAMIQUE	15
3.5.4	CONVERSION EN FUTAIE IRREGULIERE	16
3.5.5	TRANSFORMATION EN FUTAIE IRREGULIERE MELANGEE	18
3.6	APPORT DE LA MODELISATION A LA PROBLEMATIQUE	19
4	MATERIEL ET METHODE	20
4.1	DESCRIPTION DU MODELE HETEROFOR	20
4.1.1	INITIALISATION	20
4.1.2	PHENOLOGIE	21
4.1.3	FLUX DE CARBONE ET CROISSANCE DIMENSIONNELLE	21
4.1.4	BILAN HYDRIQUE	22
4.1.5	REGENERATION	23
4.2	PARAMETRISATION DU MODULE DE REGENERATION	25
4.3	CHOIX DES CAS D'ETUDE	27
4.4	CARACTERISATION DES CAS D'ETUDE	29
4.5	INITIALISATION DU MODELE	34
4.6	SIMULATION D'ITINERAIRES SYLVICOLES	36
4.6.1	SCENARIOS POUR HONSFELD	36
4.6.2	SCENARIOS POUR BUCHHOLTZ	38
4.6.3	SCENARIOS POUR BECHEFA	39
4.7	INDICATEURS	42
5	RESULTATS ET DISCUSSION	44
5.1	PARAMETRISATION DU MODULE DE REGENERATION	44
5.2	PERFORMANCE DU MODULE DE REGENERATION	47
5.3	SIMULATIONS D'ITINERAIRES SYLVICOLES	49
5.3.1	HONSFELD – TRADITIONNEL AVEC COUPE RASE	49
5.3.2	HONSFELD – TRADITIONNEL AVEC COUPES PROGRESSIVES	52
5.3.3	HONSFELD – IRREGULARISATION PAR DIMENSION CIBLE	54
5.3.4	HONSFELD – IRREGULARISATION PAR COUPES EN BANDES	59
5.3.5	BUCHHOLTZ	64
5.3.6	BECHEFA	71
5.4	INDICATEURS	77
6	SYNTHESE ET CONCLUSION	84
7	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	88
8.	ANNEXES	95

Liste des tableaux et figures

Figure 1 Répartition par classe d'âge des surfaces de pessières wallonnes	8
Figure 2 Evolution des densités de tiges avec la hauteur dans les pessières soumises	14
Figure 3 Martelages schématisés dans des pessières d'un hectare suivant différentes sylvicultures	18
Figure 4 Synthèse du fonctionnement des modules de phénologie, flux de carbone et bilan hydrique	22
Figure 5 Synthèse des flux et stocks d'eau au sein du module de bilan hydrique	23
Figure 6 Organigramme du module de régénération pour la croissance des semis d'une classe de taille	24
Tableau 1 Synthèse des relations dendrométriques, et des modèles de régression utilisés	26
Figure 7 Localisation des trois peuplements étudiés	27
Tableau 2 Caractéristiques des peuplements étudiés	29
Figure 8 Densité et composition spécifique par classe de circonférence des peuplements	30
Figure 9 Densité et composition spécifique de la régénération par classe de hauteur des peuplements	30
Tableau 3 Synthèse des caractéristiques pédologiques pour les trois peuplements.	33
Tableau 4 Synthèse des itinéraires sylvicoles pour le peuplement de Honsfeld.	40
Tableau 5 Synthèse des itinéraires sylvicoles pour le peuplement de Buchholtz.	41
Tableau 6 Synthèse des itinéraires sylvicoles pour le peuplement de Bêchefa.	41
Tableau 7 Résultats statistiques de la paramétrisation des relations allométriques pour l'Epicéa.	44
Figure 10 Visualisation des relations allométriques pour l'Epicéa	46
Figure 11 Reproduction des Epicéas du sous-bois à Buchholtz par le module de régénération	47
Figure 12 Reproduction des Epicéas et Douglas du sous-bois à Bêchefa par le module de régénération	48
Figure 13 Evolution de la surface terrière du peuplement de Honsfeld pour le scénario "coupe rase"	49
Figure 14 Evolution des effectifs du peuplement de Honsfeld pour le scénario "coupe rase"	50
Figure 15 Visualisation en 3D du peuplement de Honsfeld pour le scénario "coupe rase"	51
Figure 16 Visualisation en 3D du peuplement de Honsfeld pour le scénario "coupes progressives"	52
Figure 17 Evolution de la surface terrière du peuplement pour le scénario "coupes progressives"	53
Figure 18 Evolution des effectifs du peuplement de Honsfeld pour le scénario "coupes progressives"	54
Figure 19 Visualisation en 3D du peuplement de Honsfeld pour le scénario "dimension cible"	55
Figure 20 Evolution de la surface terrière du peuplement de Honsfeld pour le scénario "dimension cible"	55
Figure 21 Evolution des effectifs du peuplement de Honsfeld pour le scénario "dimension cible"	56
Figure 22 Evolution de la répartition des tiges par circonférence pour le scénario "dimension cible"	56
Figure 23 Répartition des grosseurs dans le peuplement final du scénario "dimension cible"	57
Figure 24 Evolution des effectifs/de la surface terrière de la régénération du scénario "dimension cible"	58
Figure 25 Répartition finale de la régénération par classe de grosseur pour le scénario "dimension cible"	58
Figure 26 Visualisation en 3D du peuplement de Honsfeld pour le scénario "bandes"	59
Figure 27 Evolution de la surface terrière du peuplement de Honsfeld pour le scénario "bandes"	60
Figure 28 Evolution des effectifs du peuplement de Honsfeld pour le scénario "bandes"	60
Figure 29 Evolution de la répartition des tiges par circonférence pour le scénario "bandes"	61
Figure 30 Répartition des grosseurs dans le peuplement final du scénario "bandes"	62
Figure 31 Evolution des effectifs/de la surface terrière de la régénération du scénario "bandes"	63
Figure 32 Répartition finale de la régénération par classe de grosseur pour le scénario "bandes"	63
Figure 33 Evolution de la surface terrière pour les trois scénarios de Buchholtz	64
Figure 34 Evolution de la surface terrière à mi-rotation pour les trois scénarios de Buchholtz	65
Figure 35 Evolution des effectifs pour les trois scénarios de Buchholtz	66
Figure 36 Evolution de la répartition des tiges par circonférence pour le troisième scénario	67
Figure 37 Répartition des grosseurs dans les trois peuplement finaux de Buchholtz	67
Figure 38 Evolution du recrutement pour les trois scénarios de Buchholtz	68
Figure 39 Evolution des effectifs de régénération pour les trois scénarios de Buchholtz	69
Figure 40 Répartition finale de la régénération par classe de grosseur pour les trois scénarios	70
Figure 41 Evolution de la surface terrière à mi-rotation pour les trois scénarios de Bêchefa	71
Figure 42 Evolution des effectifs pour les trois scénarios de Bêchefa	72
Figure 43 Evolution de la répartition des tiges par circonférence pour le scénario moyen	72
Figure 44 Compositions spécifiques et répartition des grosseurs dans les trois peuplements finaux	74
Figure 45 Evolution du recrutement et régénération finale dans les trois peuplements de Bêchefa	76
Tableau 8 Synthèse des indicateurs économiques pour les différents scénarios des trois peuplements	78
Figure 46 Comparaison de la dimension des bois récoltés au cours des différents scénarios de Honsfeld	80
Figure 47 Comparaison de la dimension des bois récoltés au cours des différents scénarios de Buchholtz	81
Figure 48 Comparaison de la dimension des bois récoltés au cours des différents scénarios de Bêchefa	82
Tableau 10 Synthèse des indices de diversité spécifique et structurale pour les différents scénarios	83

1 Introduction

Depuis la révolution industrielle, la productivité et les qualités du bois d'Epicéa ont permis le développement de sa sylviculture à grande échelle dans toute l'Europe. En Belgique, l'Ardenne est de loin la région naturelle où l'essence est la plus présente, et où elle revêt une importance économique certaine. En effet, les volumes produits annuellement par ces pessières alimentent une filière de transformation spécialisée, dont l'avènement a été rendu possible par la généralisation des pratiques sylvicoles productives, et la pérennité supposée de la production ligneuse. Pourtant, les surfaces plantées en Epicéa sont aujourd'hui en déclin, probablement du fait d'une sensibilité pressentie comme croissante dans le contexte des changements climatiques globaux. Des dépérissements liés aux épisodes de sécheresse et les attaques généralisées de scolytes (*Ips typographus*) poussent les propriétaires forestiers à choisir d'autres essences, voire à mélanger leurs peuplements. En parallèle, la pratique de la coupe rase associée à la sylviculture résineuse présente certains inconvénients qui la rendent incompatible avec la multifonctionnalité souhaitée pour la forêt d'aujourd'hui. Dans ce contexte, la transformation d'une partie des pessières ardennaises en peuplements irréguliers mixtes s'avère à la fois souhaitable et prévisible. Toutefois, cette transformation est une opération longue et complexe dont les résultats peuvent être durs à prédire, en particulier avec un climat changeant. Ces incertitudes ressenties par les gestionnaires forestiers nécessitent dès à présent d'étoffer un corpus littéraire technique encore trop insuffisant compte tenu des enjeux économiques importants liés à la sylviculture de l'Epicéa en Belgique.

L'objectif du présent travail est d'explorer la piste de la modélisation forestière en tant qu'outil pour aider à réduire les incertitudes liées à la transformation des pessières ardennaises. L'utilisation d'un modèle basé sur les processus et dont les arbres sont individualisés et spatialisés a permis de simuler l'évolution de peuplements de structure et composition diverses dans un climat futur plausible. Toutefois, la gestion forestière est un domaine dans lequel des prédictions précises au long terme ne sauraient exister du fait d'une adaptation permanente à des conditions sanitaires, sociétales ou environnementales changeantes. Le but ici n'est donc pas tant de produire des normes et recommandations sylvicoles, que de faire éprouver une problématique réelle à un modèle adapté afin de faire émerger d'éventuelles pistes de réflexion, concernant tant la sylviculture que la modélisation forestière.

2 Stratégie de recherche

HETEROFOR, le modèle utilisé, appréhende la complexité de l'écosystème forestier en le divisant en différents modules interconnectés (phénologie, flux de carbone et croissance, bilan hydrique, nutriments, régénération). Afin de pouvoir gérer des peuplements irréguliers mixtes, le module de régénération a dû être paramétré pour une série de nouvelles essences, sur base de données issues de la littérature ou récoltées sur le terrain. Des peuplements adultes ont pu être spatialisés avec précision dans le modèle grâce à des mesures provenant d'un dispositif de suivi (IRRES). La régénération au sein de ces peuplements a été générée virtuellement pour correspondre à la densité, structure et composition des semis renseignées par le dispositif. La simulation de flux hydriques plausibles a nécessité de caractériser précisément la pédologie des sites par le creusement de fosses pédologiques, et l'analyse physico-chimique des horizons de sol. Aussi, la croissance dans un contexte futur a impliqué la création de fichiers météorologiques basés sur des données historiques locales extrapolées selon les projections hypothétiques établies par le GIEC.

Les trois peuplements étudiés sont situés en Haute Ardenne sur sol brun acide, et présentent un stade de développement et une composition spécifique variables. Cette diversité de situations initiales a permis d'analyser différentes problématiques pouvant survenir en traitement irrégulier mixte (le choix de la méthode de transformation, la récolte de gros bois vieillissants et la gestion du mélange au sein de la régénération). Pour certains des scénarios, la numérotation des arbres au sein du dispositif a permis de baser les premières rotations simulées sur des martelages réalisés in situ. Toutes les autres éclaircies ont été réalisées à l'aide d'outils d'intervention intégrés dans le modèle, mais toujours selon des modalités tâchant de reproduire les pratiques sylvicoles généralement employées. En plus des caractéristiques habituelles des peuplements, les résultats des simulations contiennent une série d'indicateurs qui ont permis d'élargir l'analyse à d'autres dimensions (économie, stockage de carbone, résilience et biodiversité).

3 Etat de l'art

3.1 L'Epicéa en Wallonie

L'Epicéa n'étant pas présent naturellement en Belgique, sa sylviculture trouve son origine dans le courant du XIX^{ème} siècle lorsque la révolution industrielle transforme les besoins en bois de la société. Avec l'abandon du charbon de bois par l'industrie au profit de la houille, le régime du taillis est progressivement délaissé pour produire le bois de soutènement des mines, ainsi que les traverses requises pour l'expansion du chemin de fer. L'explosion de la consommation de bois pousse alors les propriétaires forestiers à expérimenter avec des essences résineuses exotiques, dont la croissance s'avère supérieure aux feuillus indigènes, en particulier sur les stations les plus ingrates. Dans les décennies qui ont suivi et suite à une politique gouvernementale de valorisation des terres incultes, la majorité des landes, taillis et pâturages extensifs peu productifs ont été graduellement plantés de résineux. Cette tendance s'est prolongée au XX^{ème} siècle lorsque la mécanisation a rendu ces terres comparativement moins intéressantes pour l'agriculture, et que la sylviculture de l'Epicéa est rentrée dans les usages (Tallier, 1996).

Aujourd'hui, cette essence fait figure de proue dans la forêt wallonne, les pessières pures représentaient ainsi en 2019 près de 120 000 ha, soit un peu plus de 25% de la forêt wallonne. L'Ardenne est la région naturelle belge où la ressource en bois est la plus abondante, du fait d'un climat et d'une géologie moins adaptés aux grandes cultures que le reste du pays. Elle comprenait ainsi en 2008 environ 60% de la forêt wallonne, et en particulier 90% de ses pessières (Alderweireld et al., 2015). Les pessières wallonnes ont un accroissement annuel d'environ 1,8 millions de m³, ce qui a permis le développement d'une filière de transformation spécialisée traitant des volumes bien plus importants que la filière du bois feuillu (OEWB, 2019). En effet, la production de sciages résineux a triplé depuis les années 1990 jusqu'à atteindre un maximum vers 2010, où la demande en grumes atteignait environ 3,3 millions de m³ par an, dont 75% d'Epicéa. Les possibilités de mécanisation et d'automatisation font que le sciage résineux est caractérisé par une poignée d'unités absorbant des volumes annuels supérieurs à 100.000 m³. Les sciages résineux alimentent ensuite une multitude d'industries économiquement significatives (construction, lamellé-collé, panneaux, paletteries, caisseries), et ce tant en Belgique qu'à l'étranger (Boldrini, 2011).

Pourtant, depuis le début des années 1990, la pessière wallonne est en forte régression. Elle a ainsi perdu près de 75.000 ha en 30 ans, du fait de l'exploitation des peuplements arrivés à maturité, et à un degré moindre par la restauration de milieux ouverts naturels dans le cadre de projets Européens LIFE (Alderweireld et al., 2015). Encore en 2019, le taux de récolte en Epicéa à l'échelle wallonne équivalait à près de 150 % de son accroissement estimé, soit une nette décapitalisation (OEWB, 2019). Comme on peut l'observer à la figure 1, les jeunes peuplements sont en diminution forte, car la tendance est à la transformation vers des futaies feuillues, ou au remplacement par d'autres essences résineuses comme du Douglas, pur ou en mélange. On y remarque également qu'une vague de plantation massive a eu lieu dans les années '50 à '70 et que celle-ci arrive maintenant à maturité. Il est toutefois utile de préciser que cet histogramme ne tient pas compte de la crise du scolyte, qui depuis 2018 altère radicalement l'organisation des pessières wallonnes.

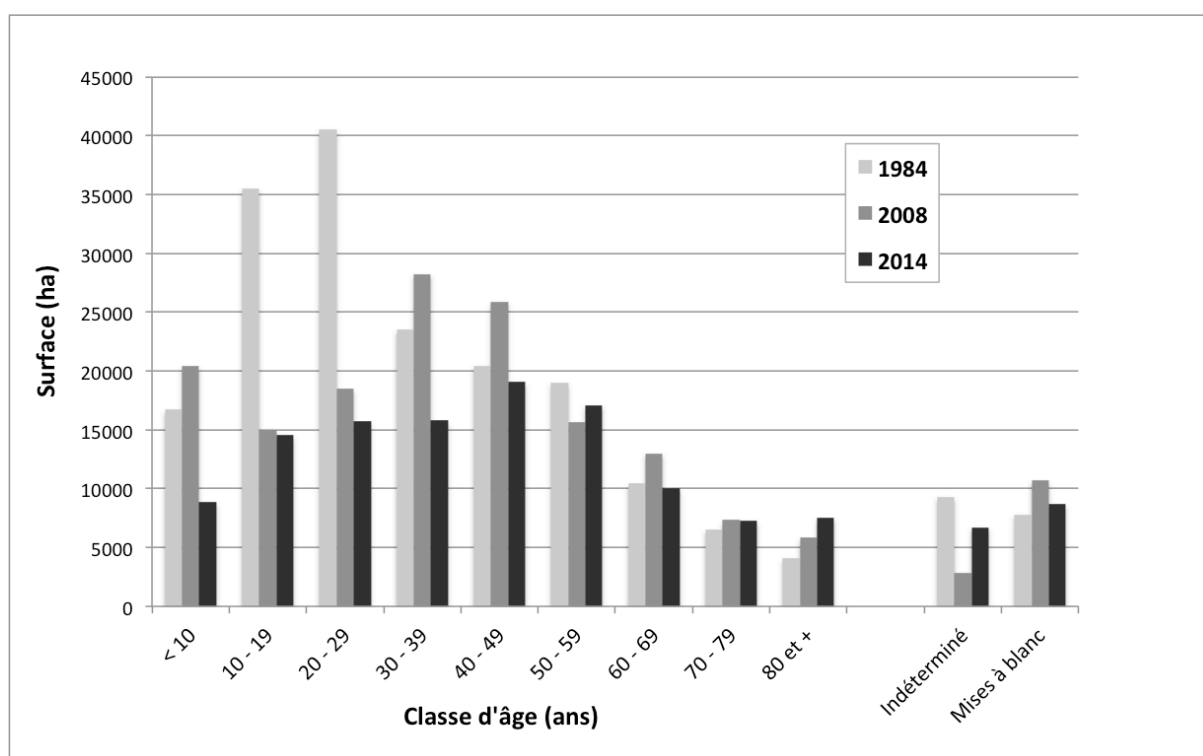


Figure 1

*Répartition par classe d'âge des surfaces de pessières wallonnes lors de campagnes d'inventaires IPRFW de 1984, 2008 et 2014
(Alderweireld et al., 2015 ; A. Thibaut communication personnelle 02/2021).*

3.2 Autécologie de l'Epicéa

L'Epicéa est une espèce d'aptitude trophique assez large, si ce n'est qu'elle ne tolère pas les sols carbonatés. Bien que sa productivité soit supérieure sur les stations plus fertiles, son installation dans des contextes mésotrophes n'est pas recommandée car le risque de pourriture rouge (*Heterobasidion sp.*) y est considérablement accru (Brūna et al., 2019). Sur le plan hydrique en revanche, l'Epicéa s'avère plus exigeant. Ainsi sur les sols plus ou moins fréquemment engorgés, ses racines sont incapables de se développer en profondeur, ce qui mène à un risque excessif de chablis auquel l'essence est déjà sensible du fait de son système racinaire traçant (Xu et al., 1997). A l'inverse, les sols plus drainants, superficiels ou à exposition chaude présentent des risques de déficits hydriques auxquels l'essence est particulièrement vulnérable (Boden et al., 2014). Cette exigence en eau combinée à son caractère acidophile expliquent sa présence presque exclusive dans le massif ardennais, où les sols sont oligotrophes et les précipitations plus élevées (Claessens et al., 2001).

3.3 Problèmes récents et futurs

Depuis plusieurs décennies, il est devenu une évidence qu'une généralisation excessive des techniques sylvicoles pour l'Epicéa a mené à son installation sur des stations qui ne conviennent pas à son autécologie. Cette inadéquation se situe principalement sur le plan hydrique, soit par un drainage insuffisant, ou à l'inverse sur des stations présentant des risques de déficits hydriques (Claessens et al., 2001). C'est cette sensibilité à la sécheresse qui présume l'incompatibilité croissante de l'essence en Belgique, déjà située hors de son aire de répartition boréo-montagnarde. En effet, il est fort probable que dans le contexte de changements climatiques, la fréquence et la sévérité des épisodes de sécheresses estivales s'accroissent dans cette région du globe (GIEC, 2014). Les dépérissements causés par les sécheresses de ces trois dernières années trouvent leur illustration la plus concrète dans les pullulations répétées de scolytes (*Ips typographus*) touchant les pessières européennes, et leur impact néfaste sur toute la filière du bois (Henin et al., 2019). La perspective d'un accroissement global des températures s'avère d'autant plus néfaste qu'elle permet au scolyte d'accroître sa vitesse de croissance, son nombre de générations annuelles et son taux de survie hivernal (Jakoby et al. 2019).

Un autre ravageur de l'Epicéa de grande importance économique, l'hylobe (*Hylobius abietis*), fera aussi probablement plus de dégâts avec les changements climatiques (Tan et al., 2010), mais son impact reste avant tout lié au mode de sylviculture pratiquée. En effet, le stade larvaire du coléoptère se déroule dans les souches de résineux fraîchement abattus, alors que les dégâts sont occasionnés par les adultes se nourrissant de l'écorce des jeunes plants. La pratique de coupes rases suivies de plantations sur de grosses surfaces favorise ainsi des pullulations qui rendent nécessaire l'ajournement de la plantation d'au moins deux ans et l'éventuelle application d'une protection chimique.

La coupe rase, utilisée traditionnellement pour régénérer les pessières équiennes, présente finalement de multiples désavantages tels qu'un risque accru d'érosion (Mohr et al., 2013), de lessivage de nutriments (Rosèn et al., 1996) et de chablis dans les peuplements attenants (Zeng et al., 2004). La perception du public, de plus en plus intégrée dans la réflexion de l'aménagement forestier, tend également à être défavorable aux coupes sur de grandes surfaces (Edwards et al., 2012). Sur le plan biologique, bien que les coupes rases puissent mener à une augmentation du nombre d'espèces de plantes (Pykälä, 2004), le reste du cycle sylvicole des pessières équiennes constitue un milieu sombre et homogène abritant globalement une faible biodiversité.

L'arrivée à maturité d'une bonne partie des pessières ardennaises, combinée aux importantes surmortalités causées par les scolytes et les chablis, font du renouvellement des pessières un sujet des plus pressants. La perspective des changements climatiques semblant de plus en plus en opposition avec la sylviculture traditionnelle de l'Epicéa, il devient impératif de tendre vers des peuplements plus résilients si l'on aspire à continuer de produire du bois de qualité de manière rentable. A ce titre, la communauté scientifique et de plus en plus de forestiers tendent à s'accorder sur les multiples avantages des forêts inéquiennes mélangées en termes de résilience.

3.4 Intérêt des peuplements irréguliers mélangés

En réponse aux problèmes touchant récemment l'Épicéa, beaucoup de praticiens tendent à le remplacer par des essences considérées comme plus résistantes à la sécheresse comme le Douglas, mais en conservant une sylviculture traditionnelle équiennne et monospécifique. Bien qu'il puisse s'avérer être une bonne alternative, le Douglas semble aussi présenter ses propres faiblesses en termes de stress hydrique (Vejpustková & Čihák, 2019) et de sensibilité aux ravageurs (Wilson et al., 2020), ce qui rend ainsi hasardeux le maintien d'une sylviculture classique dans un contexte climatique changeant.

La recherche d'une forêt productive plus résiliente tend à s'inspirer des systèmes naturels, notamment via le mélange d'essences. Bien que des peuplements mélangés aient pu montrer une résistance accrue aux épisodes de sécheresse, la diversité des conditions stationnelles et des types de mélange peut aussi entraîner des résultats contraires pour une ou plusieurs des essences du mélange. Malgré cela, l'implémentation d'une diversité de mélanges favorisant tantôt l'une ou l'autre espèce semble être la voie à suivre afin de répartir le risque lié au caractère aléatoire des perturbations biotiques et climatiques (Vitali et al., 2018).

Lorsqu'ils sont en bonne santé, les peuplements mélangés peuvent offrir l'avantage d'une hausse de production d'environ 10 à 20 % par rapport aux peuplements monospécifiques correspondants (Pretzsch & Zenner, 2017). Cette majoration concerne particulièrement les stations où un élément est limitant et où les essences du mélange possèdent des traits complémentaires vis-à-vis de ce facteur. Ces traits complémentaires peuvent concerner par exemple l'architecture racinaire, la vitesse de croissance, la tolérance à l'ombrage, la forme du houppier ou la phénologie foliaire. Ces deux derniers traits pourraient d'ailleurs expliquer la bonne productivité des mélanges combinant résineux et feuillus (Lu et al., 2018).

L'agencement complexe d'houppiers de forme contrastée permet en particulier d'augmenter la croissance radiale des couronnes et de densifier la canopée, ce qui se traduit par une hausse de la densité des tiges (Pretzsch & Biber, 2016). Dans beaucoup de cas, le mélange semble aussi mener à un meilleur prélèvement et utilisation de l'azote et du phosphore (Richards et al., 2010). Enfin, il a été montré que les peuplements mélangés souffrent significativement moins d'herbivorie de la part d'insectes oligophages, l'effet sur les ravageurs polyphages pouvant varier selon la palatabilité des essences présentes (Jactel & Brockerhoff, 2007).

La seconde caractéristique des systèmes naturels jugés plus résilients est l'absence de coupes rases, bien que certains événements puissent mener à des mortalités générales et étendues. La sylviculture à couvert continu tente d'imiter cela en maintenant dans le temps des peuplements irréguliers possédant plusieurs strates, où sont réalisées des petites coupes fréquentes s'apparentant à des phénomènes de mortalité ponctuels. La sylviculture à couvert continu présente plusieurs avantages dont le plus approprié pour l'Epicéa est une moindre sensibilité du peuplement au vent. En effet, l'absence de coupes rases et les strates inférieures qui augmentent le support mutuel et freinent le vent aboutissent à une probabilité bien moindre de chablis (Pukkala et al., 2016).

Le maintien d'un couvert continu semblerait mener généralement à une plus grande multifonctionnalité de la forêt (Peura et al., 2018). D'après certains auteurs, la quantité de carbone séquestré y serait supérieure aux peuplements réguliers, de par la nature des produits ligneux délivrés et l'accroissement supérieur de biomasse lié aux éclaircies par le haut (Pukkala, 2014) ; d'autres études ne sont toutefois pas aussi affirmatives sur la question (Lundmark et al., 2016). Bien que l'hétérogénéité structurelle au sein d'un peuplement irrégulier soit bénéfique à une plus grande biodiversité, certaines espèces forestières ont un caractère héliophile qui nécessite de continuer à réaliser ponctuellement des trouées de taille conséquente. D'après certains auteurs, l'évaluation de la biodiversité doit se faire à une échelle plus vaste, où une mosaïque fine de peuplements d'âges différents serait alors préférable à une omniprésence de peuplements irréguliers (Schall et al. 2018).

Au-delà de tout cela et au même titre que les peuplements mélangés, l'intérêt de l'irrégularisation réside avant tout dans la résilience qu'elle confère aux forêts face aux phénomènes climatiques et biotiques. La présence simultanée d'arbres de classes d'âges variées présentant des sensibilités différentes permet de diminuer les risques, et d'augmenter la rapidité de rétablissement suite à un aléa. Aussi, la nécessité d'une régénération continue dans les peuplements irréguliers permet une adaptabilité constante de la composition spécifique, ce qui peut s'avérer salutaire dans un contexte futur incertain, tant sur le plan climatique qu'économique.

3.5 Méthodes de renouvellement envisageables

Comme il a été mentionné précédemment, une bonne partie des pessières ardennaises arrivent maintenant à maturité, différents scénarios sylvicoles peuvent ainsi être imaginés afin de les renouveler. Partant d'une pessière fictive de 40 à 50 ans, des scénarios basés sur des normes adaptées à l'Ardenne ont été regroupés en cinq catégories allant du laisser-faire à un traitement de transformation avec changement de régime.

3.5.1 Abandon de la sylviculture

La stratégie consistant à abandonner la sylviculture peut être voulue ou non, par exemple dans le cas d'une parcelle privée sans gestionnaire ou d'une réserve intégrale. Certains propriétaires peuvent également abandonner toute gestion par découragement suite à un aléa, ou face à toutes les incertitudes entourant le futur de la sylviculture. Dans les peuplements abandonnés, des trouées vont se créer par les processus de mort naturelle, et être colonisées par une régénération d'épicéa ou d'autres essences situées à proximité, menant ainsi progressivement à une forêt irrégulière mélangée. Même si le résultat final est celui escompté, la longueur du processus et l'absence de prélèvement de bois sain rend ce scénario inenvisageable à une plus grande échelle que celle de l'expérimentation.

3.5.2 Traitement en futaie régulière avec sylviculture traditionnelle

L'écrasante majorité des pessières sont toujours conduites en futaie régulière pures avec des densités de tiges plutôt élevées. Ainsi, en 2008, les placettes de l'IPRFW présentaient une surface terrière moyenne de 39 m²/ha et un volume sur pied de 419 m³/ha, pour une circonférence moyenne de 71 cm, soit toujours dans la catégorie des petits bois (Alderweireld et al., 2015). Bien que les normes du DNF préconisent des éclaircies de plus en plus précoces et soutenues, même les pessières soumises au code forestier ont des densités de tiges considérées comme élevées (figure 2). Cette sylviculture présente l'avantage d'une gestion simplifiée et de fournir aux scieurs les produits qu'ils recherchent (produits calibrés, cernes fins, branches fines et peu de bois juvénile). Néanmoins, en plus de tous les problèmes cités précédemment, des densités excessives mènent à une forte instabilité au vent et une accumulation excessive de matière organique au sol, qui imposent la régénération par coupe rase suivie de plantation.

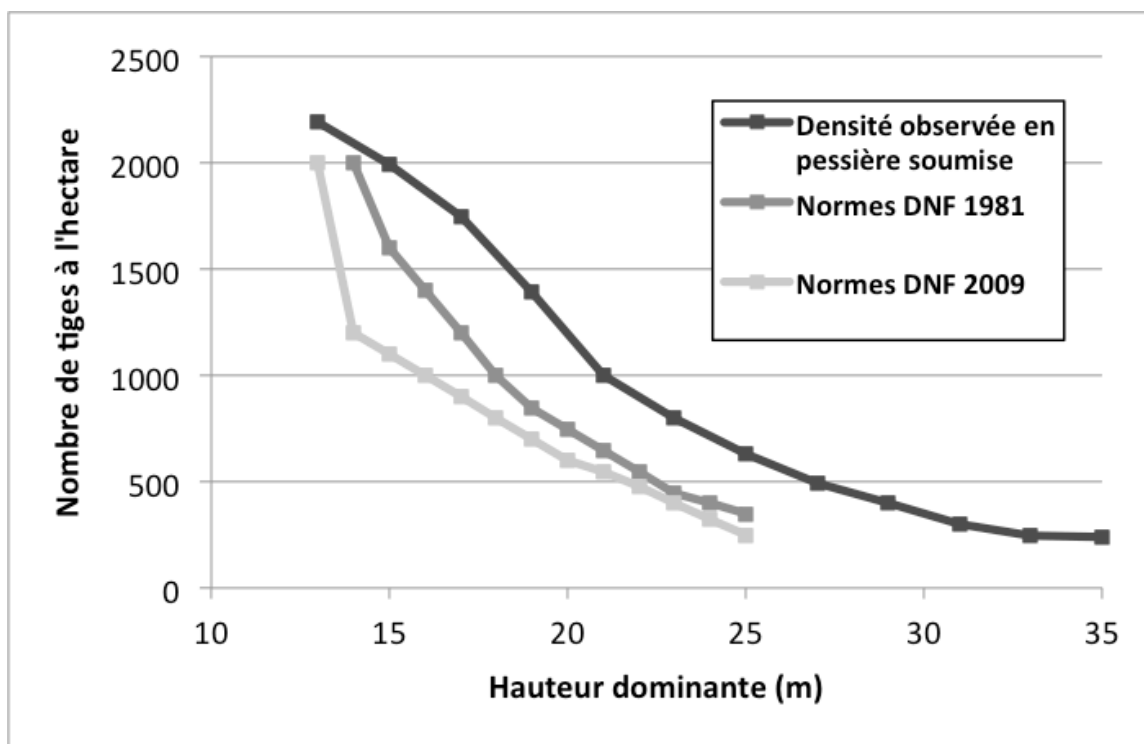


Figure 2

Evolution des densités de tiges avec la hauteur dans les pessières soumises, ou telles que prescrites par les normes DNF de 1981 et de 2009.

(Alderweireld et al., 2015 ; A. Thibaut communication personnelle 03/2021).

L'itinéraire débute par la plantation à faible écartement (au plus 2 x 2 m) de 2500 à 4000 plants par hectare, suivi d'éventuels dégagements les premières années. La plantation est ensuite laissée à elle-même jusqu'à ce que la première éclaircie soit de dimension commercialisable. Le retardement de cette première éclaircie permet un élagage naturel des tiges, mais une phase de compression trop longue mène aussi à une remontée excessive des houppiers voire à des mortalités de tiges. On voit ainsi à la figure 2 que les densités préconisées par le DNF en 2009 suite à la première éclaircie vers 13 m, ne sont atteintes en moyenne que vers la hauteur dominante de 20 m dans les faits.

Les éclaircies d'intensité faible à modérée prélèvent principalement par le bas, soit en enlevant surtout des tiges dominées qui finiraient par dépérir du fait d'un manque d'accès à la lumière. La faible intensité des éclaircies mène à une croissance plutôt lente produisant un bois aux cernes étroits et réguliers apprécié des scieurs. Ceux-ci demandent des grumes de moyen bois et sont de moins en moins aptes à traiter les très gros bois, ce qui se répercute sur le prix de ces derniers et mène à une pratique de la coupe rase vers une dimension moyenne de 90 à 120 cm de circonférence (Boldrini, 2011).

3.5.3 Traitement en futaie régulière avec sylviculture dynamique

En plus d'être la méthode de régénération traditionnellement privilégiée, la coupe rase peut aussi être imposée dans le cas de certains peuplements décimés par les scolytes, une tempête ou ayant de graves problèmes de stabilité. Dans ces cas ou lorsque le traitement en futaie régulière est tout de même choisi, la sylviculture recommandée est caractérisée par des coupes plus dynamiques que ce qui est traditionnellement pratiqué. Le renouvellement par coupe rase sera réalisé préférentiellement quand la majorité des arbres auront atteint 120 à 150 cm de circonférence (soit entre 55 et 70 ans). Suite à cela, la régénération par plantation permet d'envisager un peuplement pur ou mélangé d'essence compatible avec la station. Si le choix se porte sur l'Epicéa ou le Douglas comme c'est souvent le cas, une plantation à 2 x 2,5 m d'écartement est recommandée (Perin et al., 2016).

Si le peuplement mature est suffisamment stable, de bonne qualité génétique et adapté à la station, le renouvellement par régénération naturelle peut être envisagé. Dans ce cas, le peuplement doit être ouvert par une coupe d'ensemencement homogène, qui mènera partout à un éclaircissement relatif au sol compris entre 15 et 40%. En deçà de cette fourchette, l'Epicéa ne peut se régénérer (Baar, 2015), et au-delà la végétation compétitrice risque fortement de prendre le dessus (Ligot et al., 2015). Dans les deux rotations qui suivent, le reste du peuplement est prélevé afin de permettre la mise en lumière des semis. Bien entendu, l'obtention de plages de semis homogènes sur toute la surface du peuplement est une utopie et un regarnissage avec de l'Epicéa ou une essence de mélange sera nécessaire.

Afin d'obtenir les bénéfices de la compression sur la qualité des tiges, tout en gardant la proportion de houppier nécessaire à une sylviculture dynamique, la première éclaircie devrait avoir lieu vers une hauteur dominante de 13 à 14 m. Celle-ci prélève une ligne sur neuf pour en faire un cloisonnement d'exploitation, en plus des 25 à 30% les moins bien conformés du peuplement restant. A ce stade, environ 150 tiges d'avenir par hectare sont désignées et éventuellement élaguées. Les deuxièmes et troisièmes éclaircies gardent ce caractère dynamique (25 à 30% des tiges enlevées) et sont réalisées en faveur des arbres d'avenir, puis l'intensité des prélèvements diminue progressivement jusqu'à la coupe finale (Perin et al., 2016).

3.5.4 Conversion en futaie irrégulière

La conversion vers la futaie irrégulière s'amorce dans l'idéal avant que la croissance en hauteur du peuplement ne diminue, afin que les tiges conservées puissent augmenter leur hauteur de houppier vivant et leur stabilité. Dans le cas plus fréquent où le peuplement est d'âge intermédiaire et n'a pas été conduit selon une sylviculture dynamique, la stabilisation préliminaire du peuplement est indispensable. Ainsi, les premiers martelages tâcheront de conserver des « stabilisateurs » possédant une bonne proportion de houppier vivant, même si c'est au détriment d'autres tiges de meilleure qualité. La conversion nécessite une décapitalisation progressive jusqu'à une surface terrière d'environ 20 à 30 m²/ha, en privilégiant des prélèvements fréquents plutôt qu'intenses (Baumeister et al., 2020). Pour obtenir une présence simultanée de toutes les classes de grosseur, il est nécessaire d'étaler la période de régénération dans le temps, afin qu'idéalement une partie du recrû ait terminé sa phase de qualification quand les derniers arbres du peuplement initial seront récoltés. Trois méthodes d'irrégularisation différant par l'intensité des coupes ont été choisies pour être décrites car elles mènent à différentes répartitions spatiales du recrû, et permettent l'adjonction d'essences plus ou moins tolérantes à l'ombrage au mélange (Figure ?).

La méthode d'exploitation par dimension cible consiste à récolter progressivement les plus gros arbres selon une répartition homogène dans le peuplement. Vers l'âge de 50 à 60 ans, lorsque la plupart des arbres instables ou mal conformés ont été récoltés, chaque martelage doit viser à prélever l'accroissement via les plus grosses tiges ayant atteint une dimension cible. Ces éclaircies par le haut, s'étalant au minimum sur 30 ans, permettent l'installation progressive de cônes de régénération au gré des ouvertures, ce qui mène au final à une structure irrégulière (Sanchez, 2012). D'un ordre de grandeur d'environ 140 à 150 cm de circonférence pour l'Épicéa, cette dimension cible doit toutefois être modulée selon la qualité de l'arbre, son voisinage direct et les conditions du marché. En effet, la décision de récolter une tige doit mettre en balance la valeur qu'elle produirait en une rotation avec la valeur produite par le reste du peuplement lorsqu'il dispose du surplus de ressources rendues disponibles. Du fait qu'un arbre de qualité produise un bois de plus grande valeur, la dimension cible sera donc plus faible pour une tige présentant des défauts, et ce d'autant plus qu'elle gêne des voisins de qualité. Enfin, il est nécessaire de garder en tête qu'au-delà d'une certaine dimension, la prévalence accrue de défauts ou l'impossibilité technique d'exploitation ou de transformation peuvent jouer sur le prix (Meilby & Nord-Larsen, 2012).

Une autre manière d’obtenir une régénération progressive est d’ouvrir vers 60 ans quelques trouées de taille plus conséquente et de forme circulaire ou elliptique (perpendiculairement aux vents dominants dans ce cas). La taille de trouée préconisée avoisine les 1500 m², soit un diamètre d’environ 35 m. Une trouée trop petite s’apparente à la méthode de dimension cible et ne permet pas un éclaircissement suffisant pour l’installation de certaines essences. A l’inverse, une ouverture trop grande a les désavantages d’une coupe à blanc et rend difficile l’ensemencement total de l’ouverture par les arbres voisins. Dans les cas où la mise en lumière risque d’amener à une situation de blocage par la végétation concurrente, le décapage mécanique du sol peut permettre l’apparition d’une plus grande densité de semis et d’accélérer la fermeture de la trouée (Veuillen et al., 2020). Si le peuplement est suffisamment stable, plusieurs trouées peuvent être installées en même temps. Quand il y en a 3 à 5 par hectare, le couvert restant est enlevé progressivement par la méthode de dimension cible. Une variante de cette technique, mise au point par George Turner, consiste plutôt à élargir les trouées progressivement dans la direction sud-sud-ouest afin de donner plus de lumière à la régénération au fur et à mesure de sa croissance (Sanchez, 2012).

La troisième méthode d’irrégularisation est généralement réservée aux peuplements insuffisamment stables pour y opérer des coupes sélectives, et consiste à réaliser des petites mises à blanc. Par exemple, l’exploitation d’une bande d’une trentaine de mètres bien orientée permettra une ouverture forte sans risques excessifs de chablis. Aux rotations suivantes, des bandes attenantes sont exploitées en progressant dans le sens contraire aux vents dominants pour que la lisière de plus en plus exposée ait eu le temps de se stabiliser. Si elle a bien été réalisée, cette technique amène une régénération en cohortes étagées de manière graduelle (Baar, 2005).

Les méthodes présentées ici permettent d’initier l’irrégularisation en étalant des dimensions de tiges présentes et par l’apparition simultanée de la régénération. Suite à cela, l’équilibre entre les classes d’âge ne doit pas être considéré comme un objectif premier mais bien comme la conséquence d’une sylviculture recherchant la valeur à l’échelle de l’arbre. Ainsi, les tiges de qualité en pleine croissance auront toujours la priorité sur des perches ou des semis qu’elles surplombent, d’autant plus que ces derniers seront tolérants à l’ombrage et capables d’attendre longuement la mise en lumière. La plus grande flexibilité permise par un recrû mélangé aux traits contrastés montre finalement l’intérêt de conserver par le martelage des essences d’accompagnement lorsqu’elles se présentent (Baumeister et al., 2020).

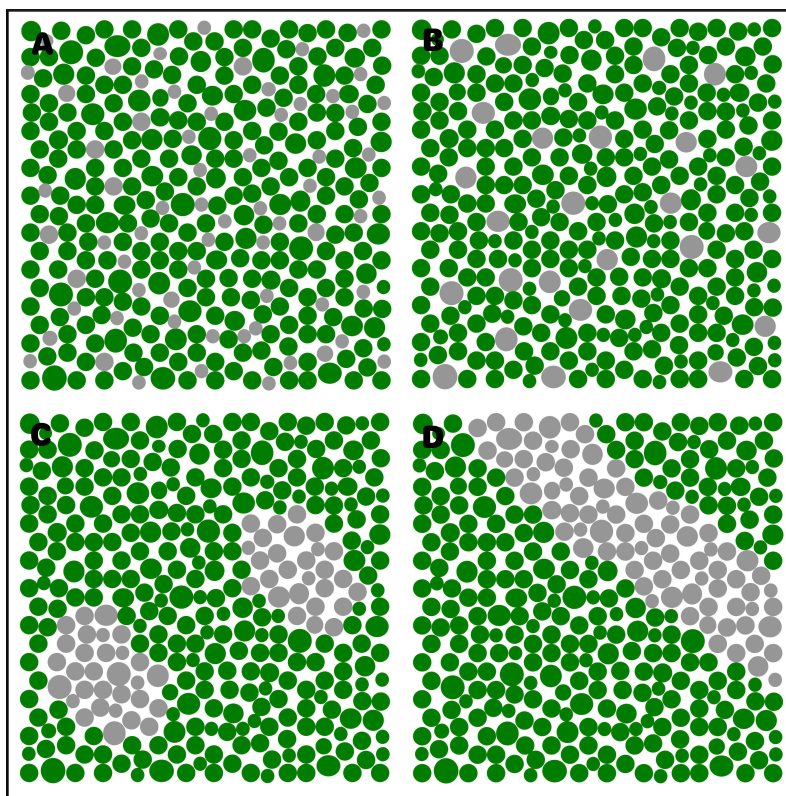


Figure 3

Martelages schématisés dans des pessières d'un hectare suivant une sylviculture traditionnelle (A), par dimension cible (B), par trouées (C) et par bandes (D).

3.5.5 Transformation en futaie irrégulière mélangée

Toutes les méthodes d'irrégularisation citées précédemment peuvent être associées à l'introduction d'une ou plusieurs essences de mélange. Les jeunes plants de Hêtre et de Sapin étant particulièrement tolérants à l'ombrage, ils peuvent être installés sous abris avant toute coupe de régénération. Par exemple, du Hêtre peut être planté dans 30 à 40 cellules de 5 x 5 m qui donneront chacune un arbre-objectif constituant le peuplement final. De par leur faible taille, ces cellules permettent d'imiter la dynamique d'un cône de semis via un faible écartement (0,7 x 0,7 m ou 1 x 1 m), sans requérir plus de plants qu'une plantation traditionnelle et en laissant de la place pour exploiter le couvert sans dégâts. L'Erable sycomore et le Douglas présentent également des tolérances à l'ombrage compatibles avec une plantation sous couvert mais nécessitent une exploitation plus rapide du peuplement pour profiter pleinement de leur croissance juvénile. L'introduction d'essences à caractère héliophile comme les Chênes indigènes ou le Mélèze n'est par contre envisageable qu'au sein de trouées de taille suffisante ou dans la méthode d'exploitation par bande, en veillant particulièrement à garder sous contrôle la compétition latérale (Baar, 2005).

3.6 Apport de la modélisation à la problématique

Concernant les normes et méthodes sylvicoles, il apparaît clairement qu'un niveau de complexité supérieur est associé à la gestion des peuplements irréguliers mixtes, en particulier durant la période délicate de la transformation. L'infinité de combinaisons d'essences et de modes de traitements rend illusoire l'idée de tous les tester in situ, d'autant plus que l'hétérogénéité des conditions stationnelles compromet souvent l'applicabilité à grande échelle. Compte tenu de la longueur des cycles sylvicoles et de l'incertitude climatique grandissante à long terme, les gestionnaires ont un besoin pressant d'outils leur permettant d'opérer en confiance des choix qui auront des conséquences économiques non négligeables. A ce titre, la modélisation offre un intérêt certain dans la mesure où elle peut établir les projections plausibles, permettant ainsi de réduire l'incertitude et d'identifier d'éventuelles vulnérabilités suggérant une gestion adaptée (André et al., 2019).

Allant de pair avec une vision de la forêt productive en tant que système contrôlable et prédictible dans le temps, la plupart des modèles forestiers traditionnels sont de type empirique et permettent de prédire la production de peuplements équiennes avec comme hypothèse la stabilité temporelle. La prise en compte des changements climatiques réfute bien entendu cette hypothèse, et rend nécessaire l'utilisation d'un modèle basé sur les processus afin de rendre compte des multiples interactions et boucles de rétroactions des écosystèmes forestiers dans un environnement changeant. Dans le cas des peuplements irréguliers mixtes, la simulation des processus doit se faire à l'échelle de l'arbre et si possible en établissant sa position spatiale afin de prendre en compte l'hétérogénéité horizontale et verticale au sein du peuplement. En effet, dans ce type de peuplement, le voisinage direct d'un arbre a un impact très variable sur la disponibilité en ressources, et influencera en retour sa stratégie de développement, tant physiologique que morphologique. Pour finir, le modèle en question doit présenter une interface claire et des résultats pertinents et interprétables si l'on souhaite que les gestionnaires forestiers s'en approprient les résultats. Parce qu'il possède toutes ces caractéristiques et qu'il est calibré pour la zone bioclimatique d'intérêt, le modèle HETEROFOR développé au sein de la plateforme collaborative Capsis a été utilisé pour réaliser l'étude (Jonard et al., 2020, de Wergifosse et al., 2020).

4 Matériel et méthode

4.1 Description du modèle HETEROFOR

Le modèle HETEROFOR est hébergé au sein de la plateforme collaborative Capsis, conçue au sein de l'AMAP à Montpellier. Cette plateforme a pour but de fournir un environnement ouvert au développement collaboratif de modèles forestiers. En plus d'offrir une structure de logiciel adaptée et adaptable, Capsis permet une intégration des différents modèles, et un partage de données et de savoirs au sein de la communauté de développeurs (Dufour-Kowalski et al., 2012). Afin de modéliser des peuplements complexes dans un contexte changeant, HETEROFOR a comme particularité de décrire la croissance individuelle d'arbres positionnés avec précision, selon une approche basée sur le partage des ressources (lumière, eau et nutriments). Pour ce faire, il s'articule en différents modules traduisant avec précision les processus écosystémiques en langage mathématique. Ces modules interconnectés forment un tout mais leur description successive permet d'appréhender le fonctionnement global du modèle.

4.1.1 Initialisation

Pour spatialiser le peuplement initial, le modèle requiert un fichier d'inventaire comprenant les caractéristiques individuelles de chaque arbre (position spatiale, espèce, circonférence à 1,30 m, hauteur totale, hauteur des premières branches vivantes, hauteur de l'extension de couronne maximale et rayon de couronne dans les quatre directions cardinales). Ce fichier d'inventaire permet aussi d'intégrer des cohortes de régénération et de végétation compétitrice (voir partie régénération ci-dessous), et il permet de définir l'année où débutera la simulation. Additionnellement, l'activation éventuelle du module de bilan hydrique nécessite un fichier décrivant les conditions météorologiques selon une précision horaire, ainsi qu'un fichier reprenant les caractéristiques des différents horizons pédologiques (épaisseur, densité apparente, granulométrie, distribution verticale des racines, etc.). Il est également possible d'activer un module de nutrition en renseignant notamment les concentrations foliaires en nutriments pour les différentes essences présentes.

4.1.2 Phénologie

La phénologie foliaire joue un rôle primordial dans les processus de photosynthèse et d'évapotranspiration, son cycle annuel est donc recalculé à chaque année de la simulation. A chaque phénophase du cycle annuel est associé une variable d'état, celle-ci évolue généralement avec la température jusqu'à une valeur seuil qui entraîne le passage à la phase suivante. Dans l'ordre chronologique, une période d'accumulation de froid fait place à une période d'accumulation de chaleur, qui mène au débourrement puis à la phase de croissance foliaire. Le vieillissement des feuilles avec le retour des températures froides, aboutit à leur jaunissement lié à la diminution de la photopériode, puis à leur chute (de Wergifosse et al., 2020). Le module de phénologie permet d'obtenir la proportion de feuilles vivantes par rapport au développement complet, celles-ci ayant un impact sur la photosynthèse, la respiration et la transpiration de l'arbre (figure ?). Avec la sénescence foliaire, ces processus sont interrompus mais une partie du rayonnement lumineux et des précipitations sont toujours interceptées.

4.1.3 Flux de carbone et croissance dimensionnelle

L'approche utilisée par le modèle pour simuler le transfert radiatif est celle de la librairie SamsaraLight. Un rayon lumineux suivant la trajectoire du rayonnement solaire est projeté au travers du peuplement et permet ainsi d'estimer la proportion du rayonnement absorbée par le tronc et la couronne de chaque individu (Courbaud et al., 2013). Sur base du rayonnement intercepté par la traversée du houppier et de l'état foliaire, le modèle biochimique de photosynthèse du modèle CASTANEA est utilisé afin d'évaluer la production primaire brute annuelle pour chaque individu (Dufrene et al., 2005). Après avoir soustrait la respiration via un ratio liant production primaire brute et nette, cette production est allouée aux différents compartiments de l'arbre à la fin de chaque année. Le carbone est ainsi premièrement réparti dans les feuilles et les racines fines selon un rapport pouvant varier selon le statut nutritionnel. Pour les arbres de taille suffisante, une autre partie de la production photosynthétique est utilisée pour la fructification, dont l'ampleur dépend de l'exposition au soleil. Après avoir compensé la mortalité annuelle des branches et des racines, tout le carbone résiduel finit alloué à la croissance structurelle aérienne et souterraine. La croissance aérienne est répartie entre la croissance en hauteur et en diamètre en tenant compte de la taille de l'arbre et de la compétition pour la lumière. L'accroissement en diamètre est ensuite utilisé pour estimer l'extension de la couronne, modulée par la compétition avec les arbres voisins (figure 4).

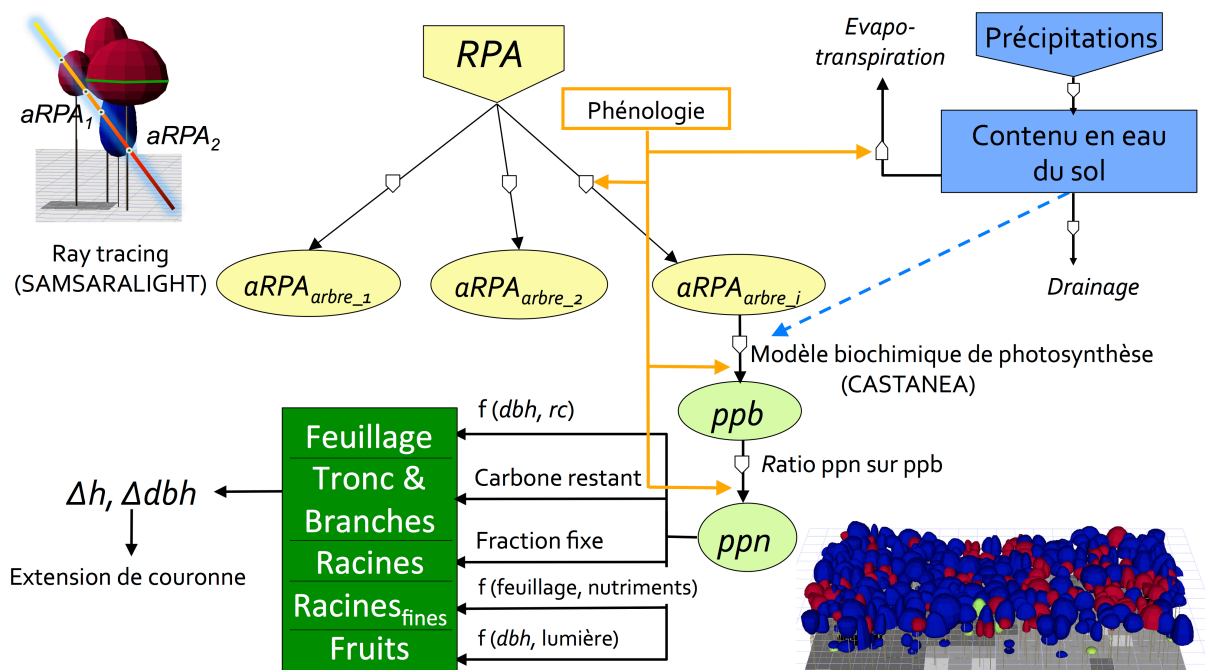


Figure 4

Articulation et synthèse du fonctionnement des modules de phénologie, flux de carbone et bilan hydrique. (RPA : Rayonnement photosynthétiquement actif ; ppb : production primaire brute ; ppn : production primaire nette ; rc : rayon de couronne)

4.1.4 Bilan hydrique

Le module du bilan hydrique calcule à chaque heure les stocks et les flux d'eau circulant entre les différents compartiments du peuplement et du sol (figure 5). Les précipitations incidentes parviennent directement au sol ou peuvent être interceptées par le tronc et les feuilles. Ceux-ci se chargent d'eau jusqu'à une capacité maximale au-delà de laquelle l'eau excédentaire s'égoutte ou coule le long du tronc. Dans le sol, chaque horizon pédologique est caractérisé par une teneur en eau qui varie d'heure en heure. L'eau se déplace d'un horizon à l'autre via le drainage et les remontées capillaires, et peut quitter le système par un écoulement préférentiel jusqu'au drainage profond. En fonction du rayonnement incident, l'eau présente dans l'horizon superficiel, sur le tronc ou les feuilles peut s'évaporer. De plus, un prélèvement d'eau est effectué dans chaque horizon (en fonction de la proportion de racines et du potentiel hydrique), ce qui permet de compenser les pertes par transpiration liées à la photosynthèse (de Wergifosse et al., 2020).

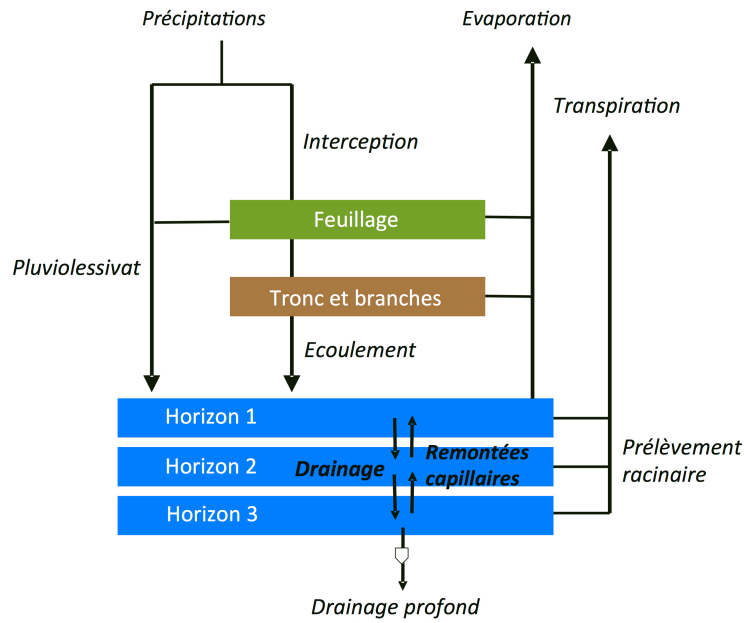


Figure 5

Synthèse des flux et stocks d'eau au sein du module de bilan hydrique

4.1.5 Régénération

Etant donné le grand nombre de tiges présentes au sein d'une régénération naturelle, le modèle ne simule pas celle-ci à l'échelle de l'arbre mais bien de cellules carrées dont la taille, fixée à 10 m de côté par défaut, peut être modifiée par l'utilisateur. Lors de l'initialisation de la simulation, la régénération peut être implémentée manuellement par un fichier d'inventaire, ou en la générant à l'aide d'un outil de création virtuel du sous-bois (évolution de la régénération avec maintien du peuplement adulte dans sa situation originale). La régénération au sein d'une cellule est divisée en cohortes auxquelles correspondent un âge et une espèce, et ces cohortes se structurent verticalement en plusieurs classes de taille. Le module peut également tenir compte d'une éventuelle végétation accompagnatrice. Le rayonnement transmis aux cellules est ensuite graduellement absorbé et distribué aux différentes classes de taille (de la plus haute à la plus basse) selon la loi de Beer-Lambert. Au sein d'une classe de taille, tous les individus sont identiques et leurs caractéristiques dendrométriques (rayon de couronne, biomasse des racines, feuilles et branches) sont déduites par des relations allométriques les reliant à la hauteur ou au diamètre, ces deux grandeurs étant reliées entre-elles par les équations 1 et 2.

$$Hauteur = a + b.d_{collet} + c.d_{collet}^2 \quad [cm] \quad (1)$$

$$d_{collet} = a + b.Hauteur + c.Hauteur^2 \quad [cm] \quad (2)$$

$$Rcouronne_{max} = a + b.Hauteur \quad [cm] \quad (3)$$

$$\text{Croissance} = \frac{(a+b.\sqrt{\text{Hauteur}})}{(1+e^{\left(\frac{\text{Lumière}}{c-d.\text{Tolérance}} + 1\right)})} \quad [\text{cm}] \quad (4)$$

$$\text{Biomasse}_{\text{tige}} = a. (d_{\text{collet}}^2 \cdot \text{Hauteur})^{(b)} \quad [\text{g}] \quad (5)$$

$$\text{Biomasse}_{\text{feuilles}} = a. d_{\text{collet}}^b \quad [\text{g}] \quad (6)$$

$$\text{Biomasse}_{\text{racines}} = \text{Biomasse}_{\text{tige}} \cdot (a + b. e^{(-c.Hauteur)}) \quad [\text{g}] \quad (7)$$

$$\text{Dbh} = a + b. d_{\text{collet}} \quad [\text{cm}] \quad (8)$$

L'estimation du rayon de couronne maximal (3) permet de calculer le degré de recouvrement par les semis de la classe, qui, combiné avec le LAI, sert à trouver le rayonnement intercepté et la production photosynthétique totale. D'autre part, à une lumière incidente donnée correspond une croissance en hauteur normale (4) pour des individus de hauteur et d'espèce données (la tolérance à l'ombrage au stade du semis pour chaque essence provenant de Leuschner & Meier (2018)). Cette croissance individuelle entraîne un accroissement de la biomasse des différents compartiments (5)(6)(7), et l'énergie que cet accroissement requiert est confrontée avec la production primaire nette de la classe de taille pour déduire le nombre de semis capables de survivre aux conditions lumineuses (figure 6). Ainsi, au fil des années simulées, certains jeunes arbres meurent et seuls ceux qui parviennent à atteindre une hauteur seuil finissent par être intégrés et spatialisés dans le peuplement adulte (Ryelandt, 2019).

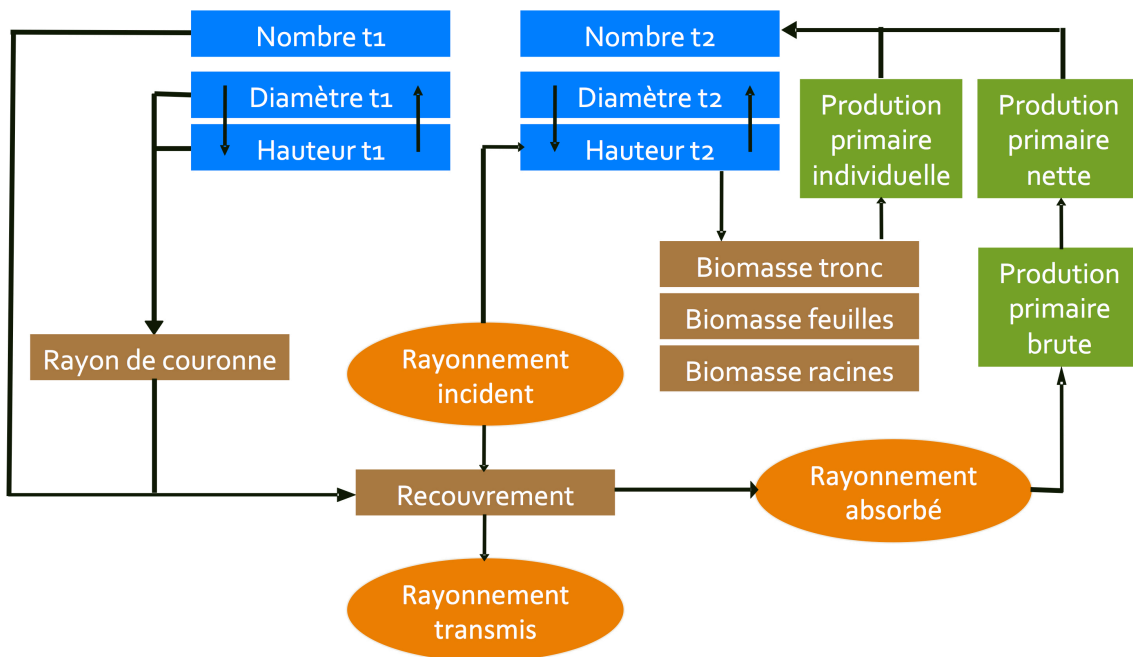


Figure 6

Organigramme du module de régénération pour la croissance des semis d'une classe de taille.

4.2 Paramétrisation du module de régénération

Pour pouvoir simuler la croissance de peuplements irréguliers, il est indispensable de pouvoir prédire la croissance de la régénération des essences composant le peuplement, parfois aussi d'autres essences que l'on souhaite ajouter au mélange. Le module de régénération d'HETEROFOR n'ayant été calibré que pour le Chêne et le Hêtre, il a été nécessaire d'y ajouter les paramètres régissant la croissance d'une série d'autres essences. La constitution d'une base de donnée regroupant des dimensions de semis, gaulis et perchis pour dix nouvelles essences a permis d'obtenir par régression les valeurs de leurs paramètres pour les équations 1 à 7. Cette base de données contient environ 16 000 entrées provenant de publications scientifiques en libre accès, ou dont l'auteur principal a consenti le partage (Ameztegui & Coll, 2013 ; Annighöfer et al., 2017 ; Dutcã, 2018 ; Falster et al., 2015 ; Forrester et al., 2017 ; Jagodziński et al., 2019 ; Jagodziński et al., 2020 ; Kühne et al., 2011 ; Ligot et al., 2015 ; Ligot et al., 2020 ; Petrișan et al., 2009 ; Petrișan et al., 2011 ; Portsmouth & Niinemets, 2006 ; Schall et al., 2012 ; Schepeschchenko et al., 2017). L'ensemble des mesures concerne des arbres de 0 à 20 m de hauteur, et une analyse préliminaire dans le logiciel JMP a permis de localiser des gammes de hauteur insuffisamment représentées pour certaines espèces. Afin de remédier partiellement à cela, des mesures sur 157 jeunes tiges de 6 essences différentes ont été réalisées dans le bois de Lauzelle à Louvain-la-Neuve. Les semis ont été mesurés au collet et à 1,30 m avec un pied à coulisse, et leur hauteur ainsi que leur rayon de couronne maximal avec un mètre ruban. Sur les tiges plus grandes, ces deux dernières dimensions ont été évaluées à l'aide d'un dendromètre à ultrasons Vertex.

Les régressions retenues pour lier les caractéristiques dendrométriques de la régénération sont communes à toutes les essences, et correspondent autant que possible à celles utilisées originellement dans le module du modèle (Tableau 1). Pour le rayon de couronne maximal, les paramètres pour le rayon de couronne moyen ont été multipliés par un coefficient permettant à la droite de passer au niveau du percentile 90. Les équations de type linéaire ont été ajustées dans R à l'aide de la fonction `lm` (linear model) par la méthode des moindres carrés avec une pondération pour tenant compte de l'hétéroscédasticité. Les paramètres pour les équations non linéaires ont quant à eux été fournis par la fonction éponyme du package `nlme` (non linear mixed effects). Cette fonction permet d'ajouter au modèle un effet aléatoire lié à la source de données, ce qui n'a pas été appliqué aux quatre premières équations du fait d'un nombre insuffisant de sources de données différentes. Pour ces équations non linéaires,

la pondération de la variance se base sur la fonction varPower. Le ratio liant les biomasses racinaires et aériennes évolue selon une exponentielle décroissante avec l'âge, tel que décrit dans Genet et al. (2010), toutefois la hauteur a été utilisée comme variable de remplacement. L'asymptote a alors été fixée à la valeur du modèle pour les arbres adultes, et les essences où des données de jeunes âges manquaient ont été regroupées avec l'essence taxonomiquement la plus proche (Longuetaud et al., 2014).

Tableau 1 Synthèse des relations liant les caractéristiques dendrométriques, et des modèles de régression utilisés.

Caractéristique à estimer	Relation dendrométrique	Modèle	Pondération
Diamètre à 1,30 m	$Dbh = a + b \cdot d_{collet}$	lm	1/ d_{collet}
Rayon de couronne maximal	$Rcouronne_{max} = a + b \cdot Hauteur$	lm	1/ Hauteur
Hauteur totale	$Hauteur = a + b \cdot d_{collet} + c \cdot d_{collet}^2$	lm	1/ d_{collet}
Diamètre au collet	$d_{collet} = a + b \cdot Hauteur + c \cdot Hauteur^2$	lm	1/ Hauteur
Biomasse ligneuse aérienne	$Biomasse_{tige} = a \cdot (d_{collet}^2 \cdot Hauteur)^{(b)}$	nlme	varPower
Biomasse foliaire	$Biomasse_{feuilles} = a \cdot d_{collet}^b$	nlme	varPower
Ratio biomasse racines/tige	$Ratio = a + b \cdot e^{(-c \cdot Hauteur)}$	nlme	varPower
Croissance en hauteur	$Croissance = \frac{(a + b \cdot \sqrt{Hauteur})}{(1 + e^{(-\frac{Lumière}{c-d.Tolérance} + 1)})}$	nlme	varPower

Afin de vérifier la qualité des paramètres trouvés pour les différentes essences, une évaluation portant sur différents critères statistiques a été utilisée. Premièrement, une régression selon la méthode de Deming a été utilisée pour lier les observations aux prédictions. Cette méthode de moindre carrés permet de minimiser la distance orthogonalement à la droite afin de tenir compte des incertitudes tant sur les x que sur les y. Les intervalles de confiance autour de la pente et de l'ordonnée à l'origine de cette régression doivent alors s'approcher respectivement de 1 et 0 pour que les prédictions soient correctes sur toute la gamme de variation.

L'erreur absolue moyenne permet de rendre compte de la qualité globale de la régression :

$$erreur\ moyenne\ absolue = \frac{\sum_{i=1}^n |prédiction_i - observation_i|}{n}$$

Pour finir, un test de Student permet de vérifier statistiquement que la moyenne des observations équivaut à la moyenne des prédictions, et le R^2 quantifie la part de la variabilité totale expliquée par le modèle.

4.3 Choix des cas d'étude

Trois peuplements d'Epicéa ont été choisis comme cas d'étude afin d'en simuler la croissance selon différents scénarios sylvicoles. L'objectif premier du présent travail n'étant pas de produire des normes précises et applicables à grande échelle, le choix a été fait de se limiter au contexte de la Haute Ardenne belge sur des sols bruns acides typiques. D'après Alderweireld et al. (2015), 90 % des pessières wallonnes se situent en région ardennaise, 63 % sont au-dessus de 400 m d'altitude, et leur sol est souvent acide (pH_{eau} moyen de 4,21). Les trois peuplements sont situés à une latitude d'environ 50°19' nord et à une altitude de 550 à 650 m (Figure 7). La température moyenne annuelle y est de 7,2 °C et les précipitations annuelles atteignent en moyenne 950 mm (Calculé sur la période 1976 – 2005). Ces pessières sont des placettes d'un à deux hectares faisant partie du dispositif IRRES mis en place en 2016 par l'unité de recherche en Gestion des Ressources Forestières de Gembloux (ULg). Ce dispositif a pour objectif d'étudier l'impact de différentes techniques d'irrégularisation sur l'évolution de la structure et de la composition des peuplements. Les trois sites choisis présentent des stades de croissance et des compositions spécifiques variables, dans le but d'essayer des itinéraires diversifiés et d'éprouver le modèle dans une large gamme de situations.

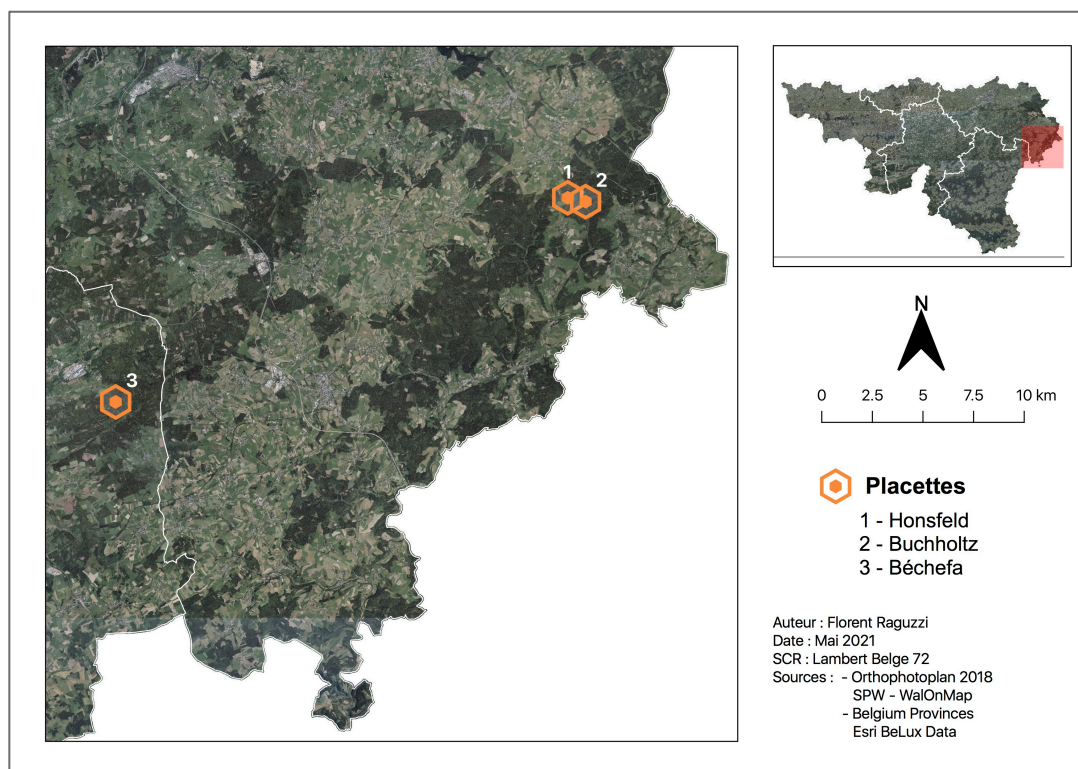


Figure 7

Localisation des trois peuplements étudiés (Carte réalisée dans QGIS 3.10).

Le premier peuplement (Honsfeld) se situe entre Honsfeld et Holzheim, dans la Forêt Domaniale de Büllange. Il s'agit d'une jeune pessière pure plantée en 1994. Sa structure équiennne permet d'aborder la question de l'irrégularisation au départ d'une plantation traditionnelle tel qu'il en existe des milliers d'hectares en Wallonie (En 2014, environ 40 000 ha de pessières pures ont moins de 30 ans en Wallonie (Alderweireld et al. 2015)). Bien que le peuplement soit en cours d'irrégularisation, son jeune âge permet encore de le conduire selon des itinéraires réguliers. Ce cas d'étude a donc comme intérêt principal de permettre la comparaison de différents traitements sylvicoles entre eux.

Le second peuplement (Buchholtz) se situe également dans la Forêt Domaniale de Büllange, une centaine de mètres en contrebas du premier. Il est composé d'Epicéa plantés en 1865, sous lesquels un sous-étage irrégulier et mélangé avec du hêtre et du sorbier s'est développé. Ce cas d'étude permet d'aborder la problématique de l'irrégularisation amorcée dans les vieux peuplements, lorsque la régénération n'a pas encore atteint des dimensions exploitables mais que les gros bois arrivent à des grosseurs où ils risquent de perdre en valeur. Cette situation peut être rencontrée en forêt publique du fait des circulaires récentes incitant à une sylviculture de type pro silva. Elle risque aussi de survenir dans les peuplements touchés partiellement par la crise du scolyte, où les bois sains ont été maintenus sur pied dans l'espoir que le marché du bois se redresse.

Le troisième peuplement (Bêchefa) est un ancien marteloscope situé dans la Forêt Domaniale du Grand bois à Vielsalm. Il s'agit d'un peuplement mélangé d'Epicéa, de Douglas et de Sapin pectiné planté vers 1900. Bien qu'il ne soit pas vraiment représentatif des peuplement forestiers trouvés en Belgique, ce cas peut être considéré comme un objectif à atteindre tant en terme de structure que de mélange d'essences. L'intérêt consiste à suivre l'évolution éventuelle de la composition spécifique lorsque l'on souhaite maintenir la structure irrégulière, en particulier dans les dynamiques de compétition au sein de la régénération naturelle.

4.4 Caractérisation des cas d'étude

L'intérêt du dispositif IRRES réside dans le fait que tous les arbres de dbh supérieur à 10 cm ont été inventoriés (espèce, localisation GPS, hauteur, diamètre à 1,30 m, rayon de couronne). Les mesures utilisées correspondent à cet inventaire datant de 2018, et elles ont permis de calculer les caractéristiques dendrométriques de départ pour les trois peuplements (tableau 2). Pour le peuplement de Buchholtz, la distinction a été faite entre les Epicéa de l'étage dominant et ceux du sous-étage, et une ligne correspond à l'ensemble du sous-étage sans distinction d'essence. La hauteur dominante correspond à la hauteur moyenne des 100 plus grand arbres (Rondeux, 1993), ou de tous les arbres considérés si il y en a moins de 100. Le diamètre moyen correspond au diamètre à 1,30 m d'un arbre de surface terrière moyenne. La répartition des arbres au sein des différentes classes de grosseur est donnée en détail dans la figure 8 à la page suivante. Les données récoltées dans le cadre du dispositif IRRES concernent également les semis, gaules et perches, qui ont fait l'objet d'inventaires au sein de 12 sous-placettes circulaires de 3 m de rayon par site. La délimitation entre ces arbres et le peuplement adulte correspond à un diamètre à 1,30 m de 10 cm, et la répartition de cette régénération par classe de hauteur est donnée dans la figure 9 à la page suivante.

Tableau 2 *Caractéristiques des peuplements étudiés*

	Surface terrière (m ² /ha)	Densité (Tiges/ha)	Hauteur dominante (m)	Diamètre moyen (cm)
Honsfeld	25,3	763	17,3	20,5
Buchholtz	35,0	355	34,3	33,9
Vieux Epicéas	29,4	67	44,2	74,5
Jeunes Epicéas	1,8	112	11,8	14,3
Hêtre	1,3	44	13,0	19,8
Sorbier	2,5	132	14,8	15,5
Sous-étage	5,6	288	13,1	15,7
Bêchefa	36,2	180	35,1	50,6
Epicéa	20,5	88	30,2	54,3
Douglas	7,2	24	25,8	61,8
Sapin	5,7	26	30,9	53,3
Hêtre	2,8	42	18,3	29,0

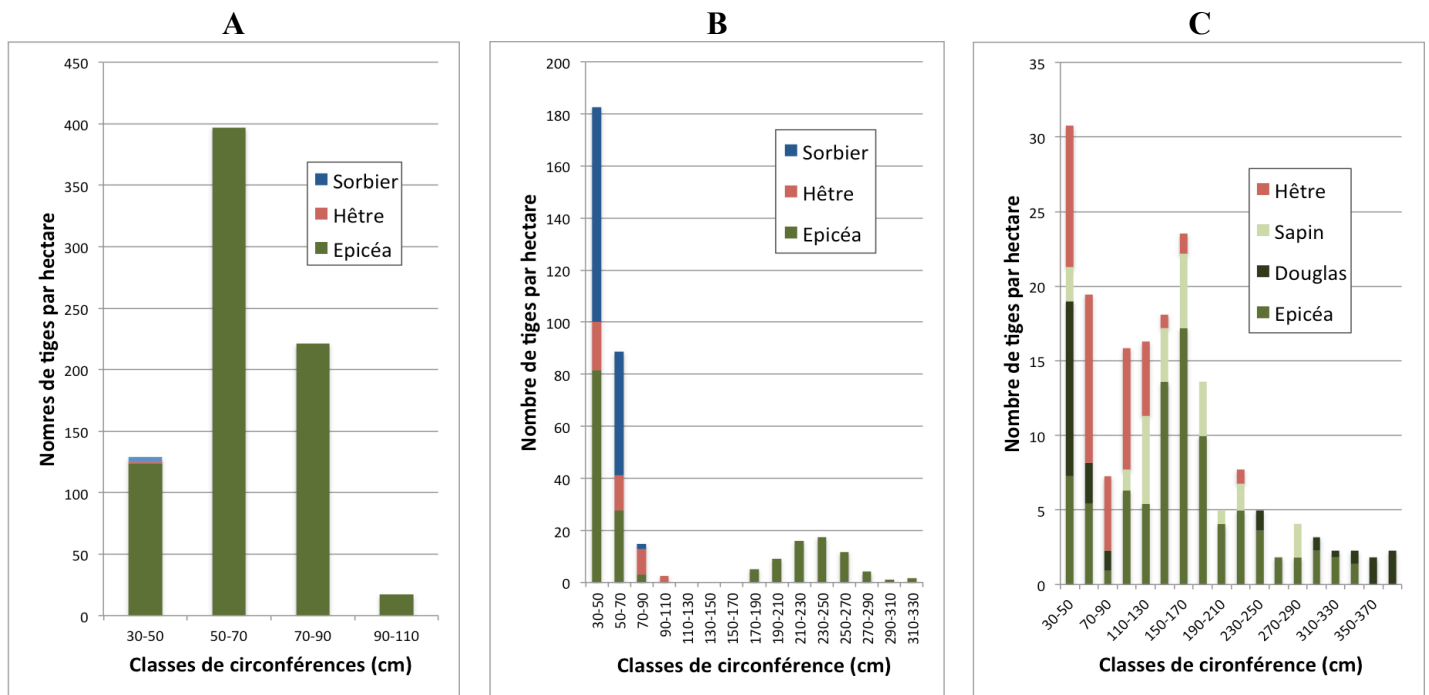


Figure 8

Densité et composition spécifique par classe de circonférence des peuplements de Honsfeld (A), Buchholtz (B) et Bêcheffa (C).

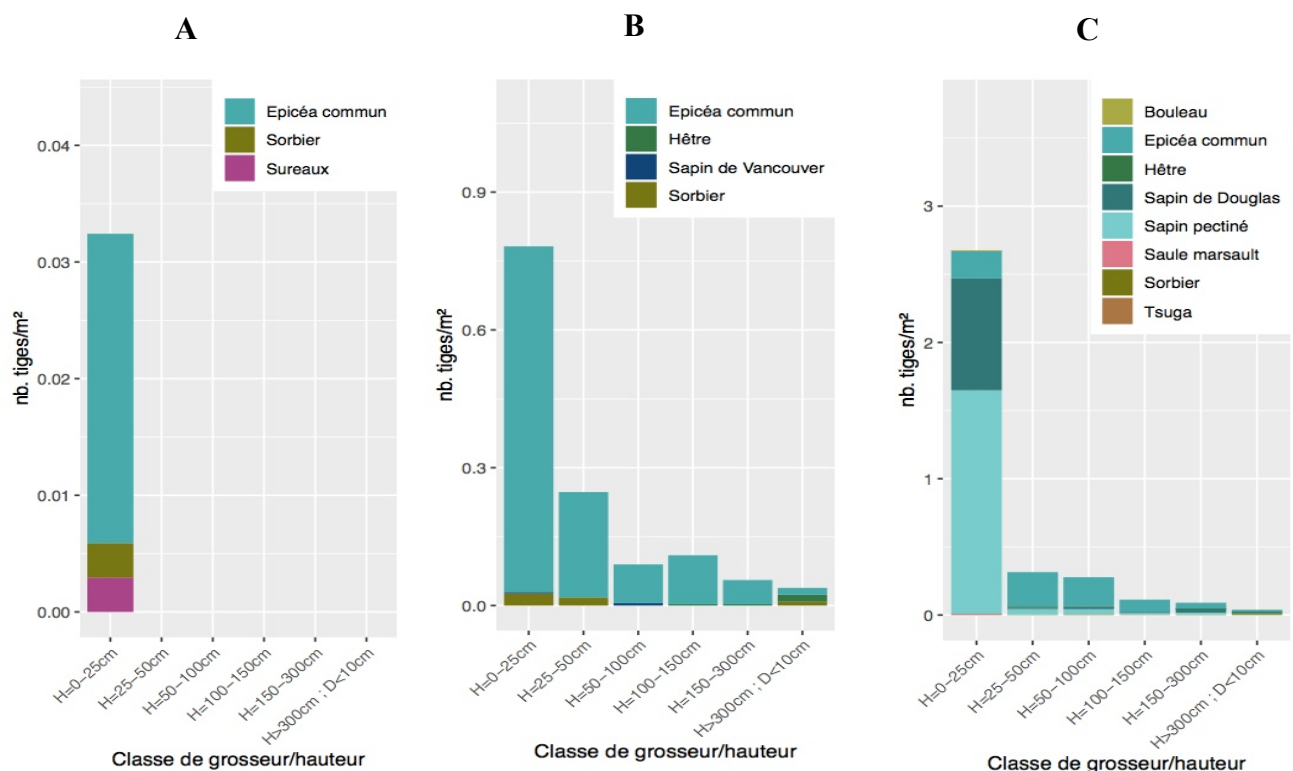


Figure 9

Densité et composition spécifique de la régénération par classe de hauteur pour le peuplement de Honsfeld (A), Buchholtz (B) et Bêcheffa (C) (G. Ligot, communication personnelle 03/2021).

Le peuplement de Honsfeld avait une hauteur dominante de 18 m à l'âge de 24 ans, ce qui d'après Perin et al. (2016) correspond à une classe de fertilité située entre 0 et 1. La surface terrière de seulement 25,3 m²/ha témoigne d'éclaircies intenses et relativement récentes qui ont été réalisées. La structure est clairement équiennne et la majorité des tiges se trouvent dans la classe de grosseur autour du diamètre moyen de 20,5 cm. Le jeune âge du peuplement fait que quelques semis d'Epicéa non acquis commencent seulement à émerger suite aux deux premières éclaircies réalisées dans le but d'amorcer l'irrégularisation. Avant la première éclaircie, une septantaine d'arbres d'avenir sur l'hectare ont été désignés pour leur absence de défaut. Ce nombre, plutôt faible par rapport aux densités finales en peuplement régulier, se justifie par le fait que des tiges additionnelles seront choisies dans le recrû au fur et à mesure que celui-ci apparaîtra. Les tiges sélectionnées comprennent à la fois des dominants, co-dominants et dominés afin que les coupes réalisées à leur profit mènent à une hétérogénéité structurelle. Lors de la visite, un nombre très élevé de pointes cassées par la neige a été constaté, ce qui aura un impact certain sur les martelages futurs.

Dans le peuplement de Buchholtz, les vieux Epicéa ont une hauteur d'environ 45 m pour un diamètre moyen de 74,5 cm, tandis que le sous-étage a une hauteur dominante de 13,1 m pour un diamètre moyen de 15,7 cm. La surface terrière y est de 34,8 m²/ha, dont seulement 5,6 m²/ha proviennent du sous-étage. L'abondance de sorbiers dans ce sous-étage provient du fait qu'un ancien enclos a empêché pendant plusieurs années l'abrouissement de cette essence très appétante. Malgré le grand âge du peuplement, la régénération naturelle n'est pas très abondante et elle est composée presque exclusivement d'Epicéas. La méthode d'irrégularisation consiste présentement à réaliser des éclaircies par dimension cible en faisant pénétrer les machines par des cloisonnements d'exploitation définis.

A Bêchefa, la surface terrière du peuplement atteint 36,2 m²/ha, dont près de 60 % correspond à de l'Epicéa (Sanchez (2013) préconise entre 22 et 36 m²/ha avant éclaircie pour ce type de peuplement). Les Douglas occupent seuls les plus grosses classes de grosseur et sont absents dans les bois moyens, à l'inverse du Sapin. En sous-étage, les essences d'ombre que sont le Hêtre et le Tsuga parviennent à croître et forment une part non négligeable des effectifs. La régénération acquise est également composée majoritairement d'Epicéa, alors que les semis de Sapin sont maintenus au ras du sol par un abrouissement systématique, de même que le Douglas qui souffre de surcroît d'attaques récentes de ravageurs et de champignons (entre autres *Contarinia pseudotsugae* et *Nothophaeocryptopus gaeumannii* (Ligot et al. 2020)).

Pour les besoins du modèle, une caractérisation poussée de la pédologie des trois peuplements a été réalisée, les résultats en sont repris dans le tableau 3 à la page suivante. Trois profils pédologiques de 50 à 80 cm de profondeur ont été creusés in situ, et chaque horizon différencié a été décrit synthétiquement avant d'y prélever un échantillon de terre de 200 cm³ à l'aide d'un cylindre métallique de type kopecki. Concernant les analyses granulométriques, les fractions grossières ont été pesées après tamisage et les fractions fines ont été isolées à la pipette après mise en suspension et sédimentation, avant d'être séchées puis pesées. La texture correspond ensuite au report de ces fractions dans le triangle textural d'après la classification américaine (USDA, 1951). La pierrosité en volume a été calculée avec le poids sec de la fraction retenue par un tamis de maille 2 mm, et une densité moyenne de 2,67 g/cm³. L'abondance des racines a été déterminée visuellement dans la fosse pédologique. La détermination du pH des échantillons a été réalisée à l'aide d'une électrode de verre en suspension aqueuse de rapport volumique 1:5 (norme ISO 10390). Les teneurs en carbone organique ont été obtenues après combustion sèche et correction pour tenir compte des carbonates dans l'échantillon (norme ISO 10694).

Le peuplement de Honsfeld se situe à une élévation moyenne de 635 m, la pente y est d'environ 8 % avec une exposition est-sud-est. Sur le plan pédologique, on retrouve un sol brun acide typique de l'Ardenne, classé comme fGbbr2 dans la carte numérique des sols de Wallonie (Sol limono-caillouteux à charge schisto-gréseuse, à horizon B structural, et phase peu profonde). Le caractère limoneux provient d'un dépôt de Loess d'origine éolienne, et la pierrosité schisto-gréseuse issue du matériau parental se manifeste surtout à partir de 20 cm de profondeur. C'est au-dessus de cette limite que la prospection racinaire est maximale, mais le pH y est fortement acide (< 4).

Le peuplement de Buchholtz, situé en contrebas du premier, présente une élévation moyenne de 550 m pour une pente d'environ 15 % orientée à l'est. Au vu de la proximité avec le peuplement d'Honsfeld, il est logique d'y retrouver un sol de nature très similaire (même classification d'après la carte numérique des sols de Wallonie), ce qui a été confirmé sur le terrain. La situation topographique en contrebas fait tout de même que l'on y retrouve une granulométrie un peu plus argileuse et une pierrosité plus faible. Le profil a ainsi été creusé jusqu'à une profondeur de 80 cm, bien qu'à partir de 60 cm le sol devienne fortement caillouteux avec un horizon de transition Bc.

Tableau 3 Synthèse des caractéristiques pédologiques pour les trois peuplements.

Horizon	Profondeur (cm)	Texture	Argile- Limon-Sable (g/100g)	Pierrosité (Volume)	Racines	pH	C _{organique} (mg/g)
Honsfeld							
Type de sol : fGbb2		Substrat : Schisto-gréseux + Loess				Type d'humus : Moder	
Ol	-5 à -4						
Of	-4 à -1						
OAh	-1 à 0						
Ah	0 à 5	Limon fin	19-54-27	9 %	++	3,5	136
Bw ₁	5 à 20	Limon fin	22-52-26	16 %	++	3,8	52
Bw ₂	20 à 50	Limon fin	23-53-24	26 %	+	4,4	11
Buchholtz							
Type de sol : fGbb2		Substrat : Schisto-gréseux + Loess				Type d'humus : Moder	
Ol	-4 à -3						
Of	-3 à -1						
OAh	-1 à 0						
Ah	0 à 5	Limon fin	23-52-25	9 %	++	3,3	200
Bw ₁	5 à 15	Limon	27-50-23	14 %	++	4,1	35
Bw ₂	15 à 60	Limon	25-50-25	16 %	++	4,3	11
Bc	60 à 80	Limon	20-49-31	37 %	+	4,3	5,3
Bêchefa							
Type de sol : Gcb0_1		Substrat : Schisto-gréseux + Loess				Type d'humus : Mor	
Ol	-8 à -6						
Of	-6 à -2						
Oh	-2 à 0						
Ah	0 à 6	Limon fin	13-72-15	4 %	++	3,3	93
E	6 à 20	Limon fin argileux	19-70-11	6 %	++	4,1	21
Bt	20 à 50	Limon fin	16-71-13	4 %	++	4,4	5,3
Bc	50 à 80	Limon fin argileux	18-72-10	3 %	+	4,1	8

Le peuplement de Bêchefa présente une élévation moyenne de 550 m et une pente d'environ 7 % avec une exposition sud-est. Par rapport aux deux premiers peuplements, le matériau parental est le même mais l'humus y semble plus épais et moins bien dégradé. D'après la carte numérique des sols de Wallonie, le drainage y est aussi un peu moins bon, la charge caillouteuse plus faible, et la phase plus profonde. Au niveau de la granulométrie, les limons y sont plus fortement prédominants encore. La pierrosité mesurée est en effet très faible, et ce jusqu'au moins 80 cm de profondeur. La profondeur totale du sol n'est d'ailleurs pas connue, ce qui laisse présager une bonne réserve en eau, bien qu'à cette profondeur la compaction rende difficile la pénétration racinaire.

4.5 Initialisation du modèle

Afin de spatialiser les peuplements dans le modèle, les données récoltées dans le cadre du dispositif IRRES (espèce, localisation GPS, hauteur, diamètre à 1,30 m, rayon de couronne) ont permis de constituer les fichiers d'inventaire requis pour l'initialisation. Depuis la campagne de mesure de 2018, 10 arbres ont dû être abattus dans le peuplement de Buchholtz suite à la crise du scolyte, ces arbres ont donc été supprimés d'emblée du fichier d'inventaire. La régénération ayant également fait l'objet d'inventaires, l'outil de génération de sous-bois virtuel a été utilisé pour obtenir des densités adéquates pour chaque essence, et ce dans toutes les classes de taille. Dans cet outil, des cohortes de jeunes semis générées annuellement peuvent pousser pendant plusieurs années alors que le peuplement adulte n'évolue pas. Une fois les simulations lancées, de nouveaux semis sont générés annuellement dans les cellules où l'éclairement transmis au sol est suffisant. Cet éclairement minimal requis a été utilisé comme manière de moduler l'apparition de différentes essences en fonction de leur tolérance à l'ombrage (par exemple, le Sapin requiert un éclairement minimal de 10 %, l'Epicéa 15 % et le Douglas 20 %)

Pour pouvoir simuler correctement les flux hydriques, des fichiers rassemblant les caractéristiques pédologiques des peuplements ont dû être réalisés. Les cylindres de terre prélevés dans les trois profils de sol ont ainsi permis d'obtenir toutes les mesures précitées. En plus de cela, la masse volumique apparente (la masse de terre fine sur le volume total de sol) a nécessité d'extraire toute l'humidité de cette terre fine (séparée au tamis de maille 2 mm après une semaine à 25 °C) par un séjour de 3 jours dans une étuve à 105 °C.

Afin de faire croître les peuplements dans des conditions climatiques plausibles, il a également été nécessaire de réaliser des fichiers contenant une météorologie à l'échelle horaire, pour chaque site et selon un scénario de trajectoire de forçage radiatif¹ plausible (RCP 4.5 tel que décrit par le GIEC) (Moss et. al., 2008). La météorologie se base sur des données historiques pour la période 1979-2019 fournies par le modèle de réanalyse ERA5 développé à l'ECMWF. Ces données comprennent la radiation solaire, la température de l'air, la pluviométrie, l'humidité relative, la vitesse du vent et sont données à une fréquence horaire. La résolution spatiale est de 30 km, et d'éventuels biais ont été corrigés avec la méthode de quantile mapping du package biasCorrection dans R, lorsque des données provenant d'une station météo à proximité étaient disponibles. Ces données historiques révisées ont elles-mêmes ensuite servi à corriger, pour la même période 1979-2019 et selon la même méthode, l'éventuel biais dont pouvait être entaché le modèle utilisé pour les projections. Les projections suivant le scénario RCP 4.5 sont données par un modèle climatique régional, ALARO-0, qui affine les résultats du modèle climatique global CNRM-CR5. Les données en sortie d'ALARO-0 ont une résolution temporelle de 3h et nécessitent donc une interpolation pour les intégrer dans un fichier horaire.

¹ Le forçage radiatif est défini par la commission d'enrichissement de la langue française comme "L'écart entre le rayonnement solaire reçu par une planète et le rayonnement infrarouge qu'elle émet sous l'effet de facteurs d'évolution du climat, tels que la variation de la concentration en gaz à effet de serre." Ainsi, RCP 4.5 correspond par exemple à un scénario où le forçage radiatif est de + 4,5 W/m².

4.6 Simulation d'itinéraires sylvicoles

Afin de réaliser des simulations plausibles, les itinéraires sylvicoles appliqués aux peuplements ont été calqués autant que possible sur les pratiques et les normes appliquées par les gestionnaires forestiers. Bien entendu, dans les faits, le martelage est un art dont le résultat variera selon le praticien, surtout dans les peuplements complexes où les compromis sont fréquents. L'impossibilité du modèle à rendre compte des subtilités propres à chaque arbre n'est toutefois pas un problème, car la variabilité entre les différents scénarios est bien plus grande que celle qui pourrait survenir entre deux agents marquant des bois selon les mêmes consignes de prélèvement. Toutes les simulations ont été réalisées sur la période 2018-2099, selon le scénario RCP 4.5 (considéré comme hypothèse de forçage radiatif moyen, entre les scénarios RCP 2.6 et RCP 8.5), et avec une concentration en CO₂ atmosphérique variable. La fréquence de passage en coupe a été fixée à 6 ans comme c'est le cas dans les trois peuplements.

4.6.1 Scénarios pour Honsfeld

Même si son irrégularisation est prévue, le jeune âge du peuplement de Honsfeld fait qu'il pourrait encore être géré de manière équiennne selon une sylviculture traditionnelle. Deux scénarios selon un traitement régulier ont été testés de manière à conduire ce peuplement à maturité au moyen d'éclaircies dynamiques telles que préconisés dans les circulaires DNF (Perin et al., 2016) et afin d'assurer la stabilité et la productivité du peuplement. Pour ce faire, un outil d'intervention permet de sélectionner de manière aléatoire des arbres autour du premier décile de grosseur, jusqu'à atteindre une fraction définie du nombre de tiges. A la 5^{ème} rotation, le peuplement est jugé avoir atteint la maturité car la majorité des tiges font plus de 120 cm de circonférence.

Un scénario consiste alors à récolter l'entièreté du peuplement selon une coupe rase, puis à replanter une nouvelle pessière conduite selon la même sylviculture. Pour la plantation, le module de régénération a été utilisé en intégrant 4 plants de 50 cm par cellule de 25 m², ce qui mène à une densité de 1600 tiges à l'hectare lors du recrutement fixé à 13 m. Suite à cela, une éclaircie enlève 30 % des tiges, puis les éclaircies suivantes se font ensuite selon la même modalité que dans la première rotation du scénario. Toutefois, l'intensité de prélèvement est légèrement plus faible pour compenser la croissance déficitaire des semis, ceux-ci n'ayant pas été paramétrés pour une croissance en pleine lumière.

Le second scénario opte pour une récolte du peuplement mature en trois coupes progressives enlevant chacune 17 m²/ha. Les deux premières coupes sont de nature mixte et légèrement par le bas, pour tâcher d'enlever les tiges du sous-étage mais aussi celles de qualité moindre, logiquement réparties dans toutes les classes. Une rotation après la troisième coupe, 80% des tiges nouvellement recrutées correspondant à la régénération amorcée avant le début des coupes progressives sont enlevées afin d'imiter des dégâts d'exploitation. Par la suite, trois éclaircies successives enlèvent à chaque fois 50 % des tiges inférieures à 18 m. Cette limite de hauteur permet à la fois de cibler le nouveau recrû pour y mettre de la distance entre les arbres, et de réaliser des éclaircies par le bas dans les zones où le recrutement a eu lieu il y a une ou deux rotations. Le maintien de cette intensité pendant trois rotations est rendu nécessaire par l'étalement dans le temps de la vague de recrutement issue des coupes progressives. Lors de la dernière rotation, l'étage dominant atteint des dimensions qui justifient son exploitation, celle-ci s'accompagnant de 30% de casse dans le sous-étage. Cette casse est simulée de la même manière que les éclaircies, si ce n'est que les volumes et revenus qu'elle engendre sont décomptés des calculs économiques.

La stratégie mise en place dans le peuplement d'Honsfeld pour initier l'irrégularisation a consisté en la désignation de tiges d'avenir de bonne qualité et de statut social variable. Le martelage réalisé sur place puis encodé dans le modèle, a tâché de prélever environ un arbre par rotation et par tige d'avenir, et ce pour trois rotations. En plus de ces arbres, presque autant de tiges additionnelles ont été prélevées directement dans le modèle afin d'atteindre une intensité objectif de 20 % de la surface terrière. Ces arbres additionnels appartiennent à toutes les classes de grosseur et sont répartis homogènement sur la surface du peuplement. Ils ont été choisis préférentiellement là où la compétition entre les houppiers semblait excessive. A partir de la quatrième rotation et jusqu'à la fin de la simulation, la stratégie d'éclaircie est passée à une récolte par dimension cible. Pour ce faire, 15 % des tiges ont été sélectionnées parmi celles dont le diamètre excède 40 cm, elles ont été choisies manuellement selon une répartition spatiale homogène, en mettant la priorité sur les tiges dépassant 65 cm de diamètre. Additionnellement, une éclaircie aléatoire mixte a systématiquement permis d'abaisser le capital sur pied juste en dessous de 28 m²/ha, afin de tenir compte des travaux d'amélioration dans les petits et moyens bois en plus de la récolte.

Le dernier scénario appliqué au jeune peuplement consiste en une irrégularisation par la technique des coupes par bande. Cette méthode est généralement réalisée dans les peuplements denses et instables, où les houppiers trop comprimés ont perdu de leur réactivité et que des éclaircies fortes risqueraient de créer des chablis en excès. La première rotation de la simulation a donc laissé le peuplement intact dans le but d'obtenir une pessière plus dense. Les quatre rotations suivantes ont toutes enlevé une bande d'arbres délimitée par deux layons, soit d'une largeur d'environ 20 mètres. La première bande enlevée est celle au nord-est du peuplement, et la progression se fait dans la direction opposée aux vents dominants, soit vers le sud-ouest. En complément de la coupe de la bande, 15% des tiges dans les bandes restantes sont prélevées par le bas, afin d'ouvrir très progressivement le peuplement. Lorsque les cohortes de régénération arrivent successivement au recrutement, des mises à distance sont réalisées en enlevant 50 % des tiges inférieures à 18 m. Une fois l'entièreté du peuplement régénéré, l'irrégularisation est poursuivie par des éclaircies aléatoires mixtes ramenant la surface terrière sous 28 m²/ha. En plus d'amener une différenciation des grosseurs, celles-ci permettent un climat lumineux favorable à la continuité de la régénération.

4.6.2 Scénarios pour Buchholtz

Le peuplement du Buchholtz présente une régénération d'Epicéa développée et de bonne qualité, ce qui rendrait illogique sa mise à blanc dans le but de revenir à une sylviculture équiennne. Les scénarios appliqués visent donc à poursuivre l'irrégularisation déjà amorcée, en prélevant les gros bois selon différentes modalités. En effet, l'essentiel du volume sur pied est constitué par ces gros bois, dont les dimensions commencent à rendre leur exploitation et transformation délicates. Un premier scénario prélève donc l'intégralité de ces gros bois lors de la première rotation, de manière à éviter toute dépréciation ultérieure qu'ils pourraient subir ou causer au sous-étage. Le second scénario échelonne cette récolte sur cinq rotations, pour régler le problème tout en atténuant l'intensité d'ouverture. Dans ce cas, 1/5^{ème} des gros bois ont été prélevés à chaque rotation, en choisissant systématiquement les plus gros. Enfin, le dernier scénario se base sur le martelage réalisé sous la direction de l'agent technique en charge du peuplement. L'intensité de coupe envisagée (environ 10 m² par rotation) a été appliquée jusqu'au prélèvement de tous les gros bois, soit sur dix rotations. Vu la durée que cela représente, ces prélèvements ont été réalisés via des éclaircies mixtes par le haut afin de prélever quelques tiges du sous-étage à des fins d'amélioration.

Dans les trois scénarios décrits ci-dessus, l'irrégularisation a été poursuivie selon les mêmes modalités de coupe une fois l'étage dominant récolté. Ainsi, à partir de la rotation suivante (ou lors de l'apparition des premières tiges suffisamment grosses pour le scénario n°1), les arbres dépassant 65 cm de diamètre ont été systématiquement récoltés, et 15 % des tiges sont sélectionnés par une éclaircie mixte aléatoire. Un autre traitement en commun est la récolte complète des sorbiers lors de l'année 2039. En effet, la majorité de ceux-ci atteignent alors un âge au-delà duquel le maintien sur pied n'est pas souhaitable car l'essence devient fortement sensible à la pourriture du tronc, particulièrement au-delà de 400 m d'altitude (fiche « Sorbier des oiseleurs » sur fichierecologique.be). Enfin, il a été présumé que les dégâts dans le sous-étage liés à la récolte des gros bois étaient du même ordre de grandeur pour les trois scénarios, aucune casse n'a dès lors été considérée.

4.6.3 Scénarios pour Bêchefa

Dès le départ, toutes les classes de grosseur sont présentes de manière équilibrée dans le peuplement de Bêchefa, ce qui permet en théorie de conduire le peuplement selon des itinéraires de jardinage. Une telle coupe a été désignée lors du martelage *in situ*, et celle-ci enlève 5 m²/ha, pour amener la surface terrière juste sous 32 m²/ha. Un premier scénario consiste à maintenir à ce niveau le capital sur pied, en effectuant des éclaircies par le haut avec une surface terrière cible de 32 m²/ha. Pour le second scénario, l'intensité de 5 m² par hectare et par rotation a été maintenue tout le long de la simulation, afin d'en observer l'impact au long terme sur le capital du peuplement.

La régénération simulée pour ce peuplement comporte trois essences (Epicéa, Douglas et Sapin), de tolérance à l'ombrage variable. Les dynamiques de compétition entre les semis peuvent donc évoluer suivant le niveau d'éclairement, lui-même fonction de la densité du peuplement. Un troisième scénario permet donc d'imaginer l'abaissement progressif du capital sur pied jusqu'à un niveau de 26 m²/ha après passage en coupe, puis le maintien à cette valeur afin d'en observer l'influence sur la composition spécifique à long terme. Dans les faits, un peuplement ouvert peut être souhaité par tout gestionnaire souhaitant favoriser les essences de lumière, mais il peut aussi être une conséquence non choisie d'évènements climatiques ou sanitaires.

Tableau 4 Synthèse des itinéraires sylvicoles pour le peuplement de Honsfeld.

Honsfeld														
Scénario	2021	2027	2033	2039	2045	2051	2057	2063	2069	2075	2081	2087	2093	
Traditionnel – Coupe rase	Aléatoire par le bas				Coupe rase / Plantation				Aléatoire par le bas					
	25% des tiges	20% des tiges	15% des tiges	15% des tiges	100% des tiges				30% des tiges	25% des tiges	20% des tiges	15% des tiges	15% des tiges	
	Aléatoire par le bas				Coupes progressives			Casse	Mise à distance					Récolte GB
Traditionnel – Coupes progressives	25% des tiges	20% des tiges	15% des tiges	15% des tiges	17 m ² /ha autour du 3 ^{ème} décile			80% des tiges recrutées	50% des tiges < 18m					+ 30% de casse
Irrégularisation – Dimension cible	Martelage <i>in situ</i>			Récolte par dimension cible										
	+ sélection manuelle intensité de 20% en G			15% des tiges au-dessus de 40 cm de diamètre (+ éclaircie mixte aléatoire) G cible de 28 m ² /ha										
Irrégularisation - Bandes		1 ^{ère} bande	2 ^{ème} bande	3 ^{ème} bande	4 ^{ème} bande	Reste	Mise à distance		Aléatoire mixte					
		+ 15% des tiges par le bas				50% des tiges < 18m		G cible de 28 m ² /ha						

4.7 Indicateurs

Pour pouvoir comparer les différents scénarios sur le plan économique, la librairie economics2 hébergée dans Capsis a été rendue compatible avec HETEROFOR (http://capsis.cirad.fr/capsis/help_fr/economics2). Cet outil de calculs financiers nécessite un calendrier des dépenses et des revenus inhérents à chaque itinéraire sylvicole, pour pouvoir procéder à leur actualisation et ainsi tenir compte du coût de l'immobilisation de l'argent. Les revenus sont uniquement liés à la vente des bois, dont les prix ont été fixés par essence et par classe de grosseur sur base des mercuriales de la Fédération Nationale des Experts Forestiers (Annexe 1). Les prix choisis correspondent à la moyenne pour la période 2006-2016 afin d'ignorer l'impact de la crise des scolytes sur la rentabilité de l'Epicéa vis à vis des autres essences. Concernant les dépenses, la variabilité des tarifs pratiqués dans les faits amène inmanquablement à des simplifications grossières, toutefois suffisantes dans un but de comparaison entre les scénarios (Annexe 2). Les coûts liés au martelage sont considérés sensiblement équivalents en irrégulier et en régulier, car la réflexion supplémentaire par arbre est compensée par le moindre nombre de tiges à marquer pour un volume constant. Une décote de 10 % a toutefois été considérée sur les revenus liés aux coupes jardinatoires, afin d'approximer les contraintes matérielles et techniques imposées à l'exploitant. Les coupes jardinatoires intègrent également un coût lié à l'élague d'un nombre de tiges équivalent à celui des gros arbres récoltés, et lorsque la régénération est mélangée, un coût pour la surveillance et les travaux visant à doser ce mélange.

Différents indicateurs économiques ont été sélectionnés pour leur complémentarité. Premièrement, la productivité totale permet une comparaison sur base des volumes et non des prix. Dans le cas de forêts gérées à l'échelle du massif où les revenus sont équilibrés dans le temps, le bénéfice annuel moyen (bénéfice total divisé par le nombre d'années simulées) donne une idée de la rentabilité des scénarios sans prendre en compte le coût d'immobilisation des capitaux. Lorsque ce coût est pris en compte, la rentabilité annuelle actualisée équivaut à la rente au sens d'Hanewinkel et al. (2014).

$$Rente = \left[\frac{VM_{finale}}{(1+r)^n} - VM_{initiale} + \sum_i^n \frac{R_i - D_i}{(1+r)^i} \right] \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^i - 1} \quad (9)$$

Avec la valeur marchande (VM), les revenus (R) et les dépenses (D) données en euros, le taux d'actualisation (r), et l'indice i correspondant à l'année.

Le calcul de la rente nécessite donc de fixer un taux d'actualisation, et celui-ci doit rester le même pour tous les scénarios. Ce taux a ainsi été fixé au taux interne de rentabilité pour le scénario traditionnel avec coupe rase à Honsfeld (3,1 % pour un fonds de 5000 €/ha). La valeur associée au fonds constitue le dernier indicateur économique, et correspond à la valeur du bénéfice actualisé à séquence infinie (BASI), soit l'escompte de tous les bénéfices attendus dans le futur jusqu'à un horizon de temps infini.

La quantité de carbone séquestrée par la forêt étant de plus en plus mis en avant comme une de ses valeurs intrinsèques, celle-ci a été approximée par la biomasse du tronc et des branches des arbres sur pied à la fin de chaque simulation, en considérant que la biomasse ligneuse est composée à 50 % de carbone. Le stock constitué par le sol n'a pas été considéré ici, malgré qu'on puisse y retrouver 2,5 fois plus de carbone que dans les arbres (De Vos et al., 2015). Une part non négligeable de carbone est également stockée dans les produits ligneux exportés, en particulier dans le bois d'œuvre à long cycle de vie. La finalité des grumes récoltées étant en partie liée à leur grosseur, il a été jugé utile de comparer les dimensions de l'ensemble des produits ligneux fournis par les différents scénarios, tant pour leur capacité à stocker le carbone que pour leur adéquation avec les préférences de la filière de transformation.

La résilience et la capacité d'accueil pour la biodiversité des peuplements sont deux grandeurs qui peuvent être évaluées à l'aide d'un indice de diversité spécifique et structurale inspiré du *total diversity index* de Jaehne & Dohrenbusch (1997). Cet indice composite est calculé pour l'état final en dernière année de chaque scénario, et consiste en la somme de quatre éléments :

- La diversité spécifique (α) se base sur la fraction de surface terrière représentée par chaque essence (E) : $\alpha = 1 - \sum E_{\text{essence } i}^2$
- La diversité structurale (β) se base sur la fraction de surface terrière représentée par chaque classe de grosseur (G) : $\beta = 1 - \sum G_{\text{classe } i}^2$
- La répartition des espèces (χ) ajoute la dimension de l'agencement spatial du mélange d'essences, les n arbres du peuplement étant comparés avec leur plus proche voisin :

$$\chi = \frac{1}{n} \sum_1^n x \quad \text{avec } x = 1 \text{ si les deux arbres sont d'espèce différente, et } x = 0 \text{ sinon.}$$
- La répartition des couronnes (δ) mesure l'agencement spatial de la structure du couvert, en calculant pour tous les arbres le ratio de la hauteur du plus petit arbre sur celle du plus gros parmi ses trois voisins les plus proches (H)

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_1^n (1 - H)$$

5 Résultats et discussion

5.1 Paramétrisation du module de régénération

Les résultats de la paramétrisation des équations allométriques sont rassemblés dans le tableau 7 ci-dessous ainsi qu'à la figure 10 pour l'Epicéa, et aux annexes 3 à 20 pour les 11 autres essences étudiées.

La relation liant le diamètre au collet avec celui à 1,30 m est celle pour laquelle le moins de données étaient généralement disponibles, surtout pour l'Epicéa et le Douglas dont les paramètres ont dû être récupérés du Sapin, ainsi que ceux du Pin sylvestre récupérés du Mélèze. Néanmoins, cette relation se prête bien à l'ajustement comme en témoignent les bonnes valeurs d'intercepte et de pente sur les régressions de Deming, ainsi que les R^2 . Ainsi, l'erreur absolue moyenne est dans tous les cas inférieure à 5 millimètres.

Tableau 7 Résultats statistiques de la paramétrisation des relations allométriques pour l'Epicéa. (Intercepte et pente : Intercepte et pente de la régression de Deming des observations sur les prédictions, et intervalles de confiances correspondants ; t-test : Test de Student sur la moyenne ; E.A.M. : Erreur absolue moyenne). (voir section 4.2 pour plus de détails)

Epicéa (<i>Picea abies</i>)								
Relation [unités]	Paramètres	n	Intercepte [I.C.]	Pente [I.C.]	E.A.M.	t- test	R^2	
Dbh = a + b.d _{collet} [cm]	a = -0.681 b = 0.789	25*	0.17 [-0.270 ; 0.653]*	0.97 [0.885 ; 1.05]*	0.420*	1*	0.95*	
Rcouronne _{max} = a + b.Hauteur [cm]	a = 81.540 b = 0.074	452	-66.79 [-87.76 ; -49.31]	1.56 [1.412 ; 1.742]	27.03	0.914	0.381	
Biomasse tronc/branches = a.d _{collet} ² .H [g]	a = 0.1079	822	599 [262 ; 942]	0.98 [0.944 ; 1.007]	4125	1	0.949	
Biomasse foliaire = a.d _{collet} ^b [g]	a = 39.664 b = 1.737	920	-571 [-767 ; -375]	1.16 [1.085 ; 1.230]	1441	0.557	0.711	
Hauteur = a + b.d _{collet} + c.d _{collet} ² [cm]	a = -16.854 b = 64.713 c = 0.624	1070	-23.86 [-31.68 ; -17.31]	1.05 [1.023 ; 1.073]	87.26	1	0.906	
d _{collet} = a+ b.Hauteur + c.Hauteur ² [cm]	a = 2.583e-01 b = 1.778e-02 c = -4.424e-06	1021	-0.29 [-0.373 ; -0.186]	1.04 [1.020 ; 1.061]	1.038	1	0.924	

* Résultats obtenus sur des mesures de sapin pectiné.

Les prédictions sur le rayon de couronne sont moins bonnes que pour le dbh, ce qui est logique au vu de la variabilité inhérente à ce trait. La distribution déséquilibrée des points pour certaines essences a nécessité de fixer le paramètre d'intercepte à zéro, sans pour autant causer de biais sur la moyenne. L'erreur absolue moyenne est plus élevée pour le Charme, ce qui est probablement dû à une présence d'arbres de taillis dans les données d'ajustement. Pour rappel, les régressions ont permis d'obtenir l'évolution du rayon de couronne moyen, dont la conversion en rayon de couronne maximal a nécessité de choisir un facteur de multiplication, l'interprétation des variables statistiques est donc à nuancer dans ce cas.

Concernant la relation liant la biomasse du tronc et des branches au diamètre au collet, un paramètre a été ajouté dans le cas de l'Erable pour rendre la régression non linéaire, et ainsi mieux la faire correspondre à l'allure courbée des points. Cette essence présente de ce fait un t-test inférieur aux autres, mais son erreur absolue moyenne est très faible contrairement aux Chênes où elle dépasse 10 à 20 kg. Si ce n'est pour le bouleau, on remarque que les paramètres des feuillus sont plus élevés que ceux des résineux, ce qui traduit leur densité de bois plus élevée et/ou leur architecture basée sur des grosses branches charpentières.

A l'inverse, la biomasse foliaire des résineux est proportionnellement plus élevée que celle des feuillus, ce qui rajoute un ordre de grandeur à leurs erreurs absolues moyennes. Il est à souligner que des données étaient absentes au delà de 5 cm de diamètre au collet pour l'Erable et le Frêne. Pour le Hêtre, le t-test révèle un biais sur la moyenne qui pourrait être dû à des défoliations ou un biais de mesure sur une série de points situés dans les gros diamètres.

Les deux dernières relations sont celles pour lesquelles le plus de données étaient disponibles, ce qui a permis de bonnes qualités d'ajustement comme en témoignent les R^2 élevés. Le Hêtre et le Pin sylvestre sont les essences avec le plus de données, ce qui explique leur erreur absolue moyenne plus élevée. Les t-tests de la deuxième relation indiquent un biais sur la moyenne pour le Sapin et l'Erable, et la pente de leur régression de Deming indiquerait que c'est dû à une légère surestimation du diamètre dans les grandes hauteurs de tiges.

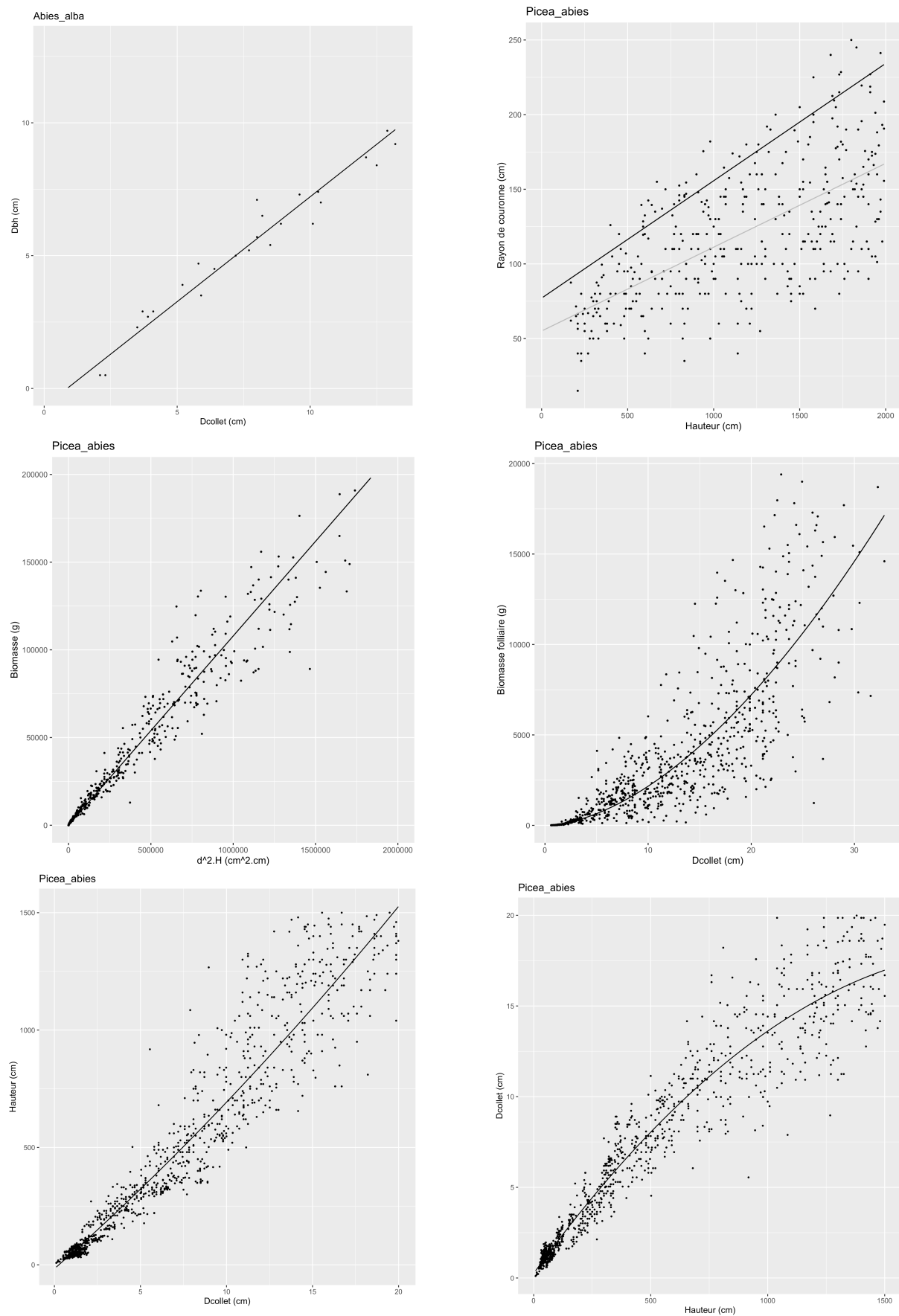


Figure 10

Visualisation des relations allométriques pour l'Epicéa (Equations (8)(3)(5)(6)(1) et (2))

5.2 Performance du module de régénération

Afin de reproduire la régénération mesurée dans les deux peuplements âgés, des cohortes de semis générées annuellement ont pu croître quelques années dans le modèle alors que le peuplement adulte restait statique. Dans le cas de Buchholtz, la régénération étant presque exclusivement composée d'Epicéa, seule cette essence a été considérée. Afin d'obtenir un sous-bois réparti par plage, des semis n'ont été générés que dans les cellules recevant un éclairage relatif au sol supérieur à 15 %. Dans ces cellules de 100 m², 20 plants de 10 cm de hauteur ont été intégrés annuellement pendant 10 ans. Les densités à l'hectare obtenues sont du bon ordre de grandeur pour la régénération supérieure à 50 cm de hauteur, mais bien insuffisante en deçà (figure 11). Cela est dû à la refermeture progressive du couvert par les semis grandissants, ce qui finit par empêcher l'apparition de nouveaux individus. Lors des simulations, ces jeunes semis seront donc générés directement avec une hauteur de 25 cm dans les cellules où l'éclairage relatif excédera 15 %, avec une densité de 20 tiges par cellule de 100 m² (soit 0,2 tiges/m²).

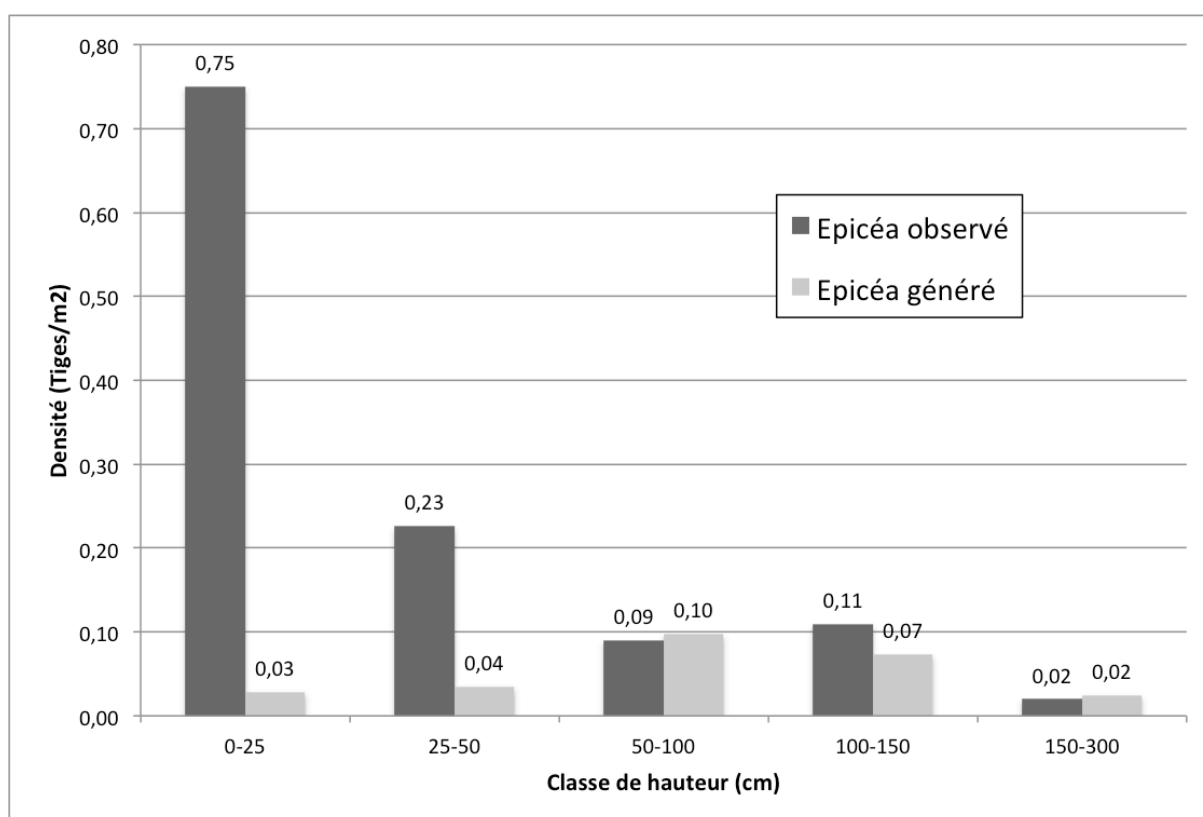


Figure 11

*Reproduction des Epicéas observés en sous-bois à Buchholtz
à l'aide du module de régénération.*

Dans le peuplement de Bêcheffa, la régénération est composée d'un mélange d'Épicéa, de Douglas et de Sapin pectiné. Ce dernier n'est toutefois pas considéré ici car il parvient très peu à sortir de la première classe de hauteur du fait de sa très forte appétence pour le gibier (environ 1,6 tiges/m² en dessous de 25 cm, à peine 0,05 tiges/m² au-dessus). Les jeunes Douglas sont également appâtés mais ils composent tout de même une bonne proportion du gaulis (figure 12). Les Épicéa ont été générés selon les mêmes modalités qu'à Buchholtz, et les Douglas avec la même densité mais un seuil d'éclairement relatif requis de 20 % au lieu de 15. Dans le sous-bois généré, cette essence n'est donc plus présente dans les petites classes de hauteur car sa plus faible tolérance à l'ombrage l'exclut au fur et à mesure de la fermeture du couvert. En considérant que sous 25 cm, la dent du gibier rend toute survie aléatoire, les jeunes semis générés lors des simulations se calqueront sur les densités de la classe 25-50, soit 20 tiges par cellule pour l'Épicéa et 4 tiges par cellule pour le Douglas et le Sapin pectiné.

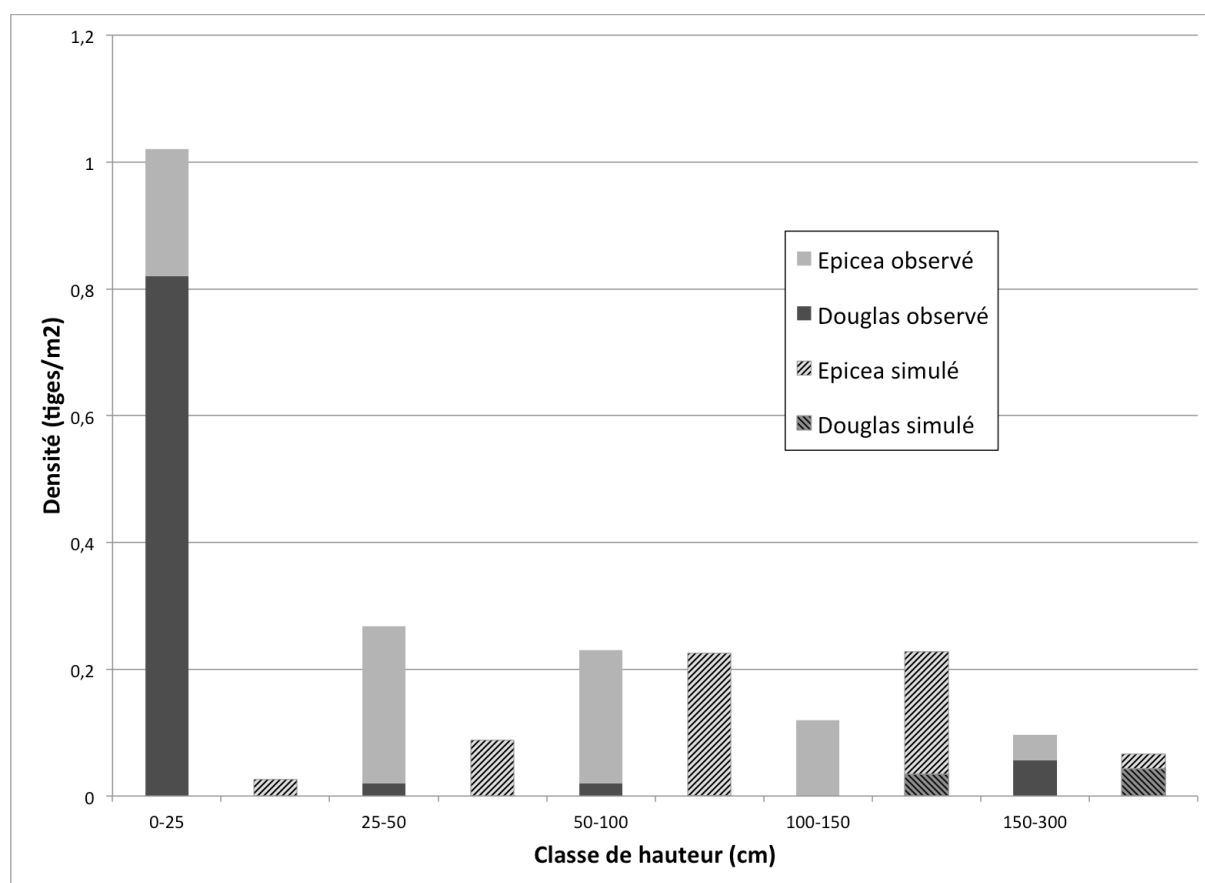


Figure 12

Reproduction des Épicéas et des Douglas observés en sous-bois à Bêcheffa à l'aide du module de régénération.

5.3 Simulations d'itinéraires sylvicoles

L'analyse des résultats pour les scénarios des trois peuplements sera étayée ici par une série de graphes et figures dont le nombre a été limité pour une question de clarté de lecture. Toutefois, des représentations graphiques ainsi que des tables de production sont présentées en annexe 21 à 40, ce qui peut aider à la compréhension globale.

5.3.1 Honsfeld – Traditionnel avec coupe rase

Lors de l'inventaire en 2018, le peuplement de Honsfeld présentait une hauteur dominante de 18 m à 24 ans, ce qui correspond à une classe de fertilité située entre 0 et 1 d'après Perin et al. (2016). À l'âge de 50 ans, ces classes correspondent à des hauteurs dominantes respectives de 33 et 30 m, et le peuplement simulé se situe en effet entre les deux avec une hauteur dominante de 31 m. La figure 13 compare la surface terrière du peuplement simulé avec celle préconisée par la norme pour la classe de fertilité 1, et la figure 14 fait de même avec la densité de tiges. On remarque qu'avant la coupe rase, la surface terrière du peuplement suit dans un premier temps la norme, mais que comparativement les éclaircies tendent ensuite à diminuer en intensité, et qu'en conséquence l'accroissement s'amoindrit.

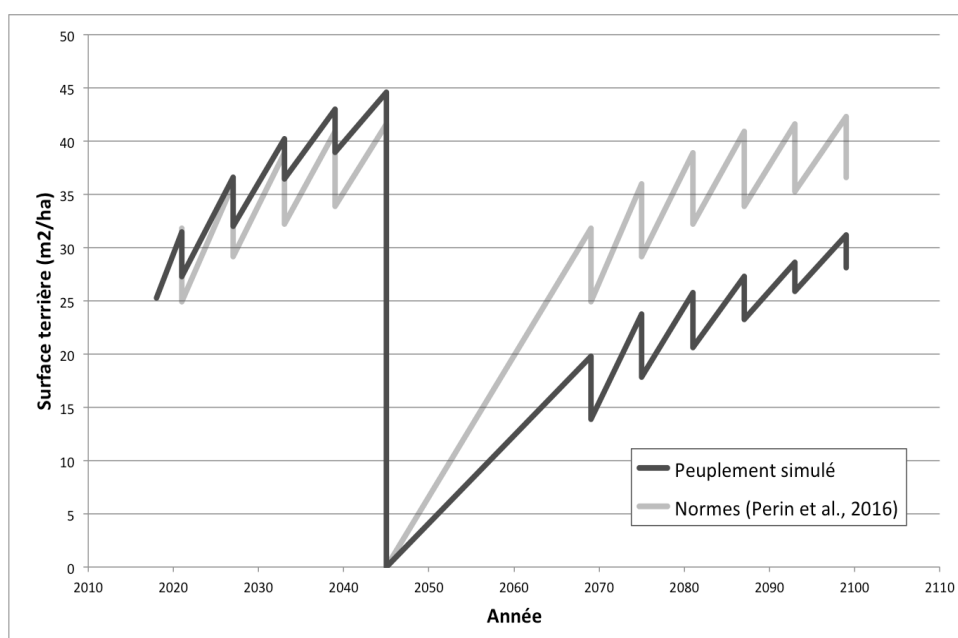


Figure 13

Evolution de la surface terrière du peuplement de Honsfeld pour le scénario traditionnel avec coupe rase, et comparaison avec Perin et al. (2016)

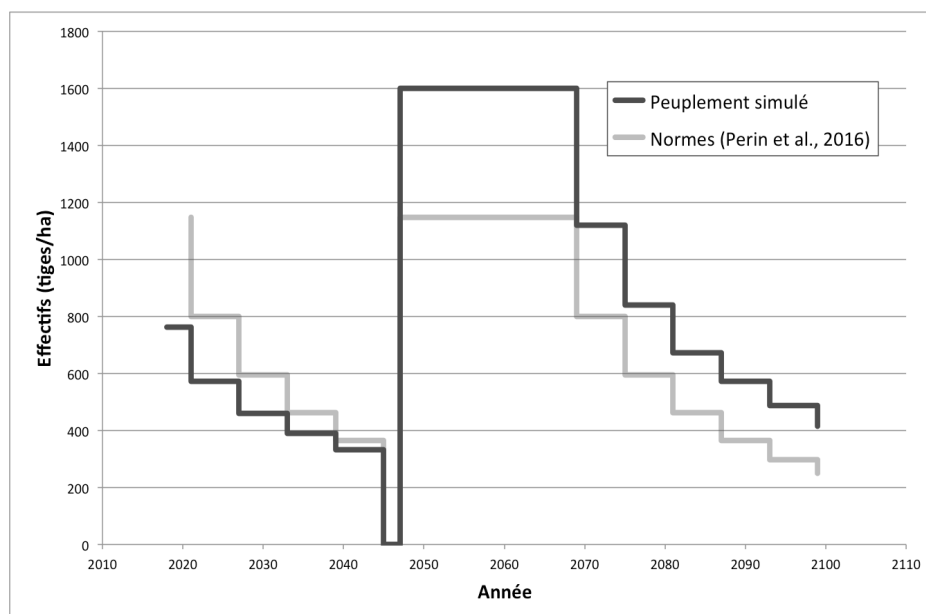


Figure 14

Evolution des effectifs du peuplement de Honsfeld pour le scénario traditionnel avec coupe rase, et comparaison avec Perin et al. (2016)

Ces éclaircies moins intenses s'expliquent en partie par un nombre de tiges récoltées plus faible, causé par la densité moindre du peuplement simulé qui semble en avance d'une rotation sur la norme. Cette précocité des éclaircies pratiquées dans le peuplement réel pourrait être due à la désignation de tiges objectif, dont le développement complet du houppier est souhaité pour structurer le futur peuplement irrégulier. La seconde raison pour la diminution de l'intensité d'éclaircie provient du fait que les prélèvements ont été réalisés plus fortement par le bas que dans la norme. Ainsi, la moyenne du coefficient k (rapport du diamètre moyen éclairci sur le diamètre moyen du peuplement) pour les quatre éclaircies est de 0,77, contre 0,87 pour Perin et al. (2016). Toutefois, la conduite du peuplement avec cette modalité d'éclaircies a permis l'obtention d'un peuplement de dimension récoltable à 50 ans (en 2045). Sa surface terrière atteint alors $45 \text{ m}^2/\text{ha}$ pour une densité de 333 tiges/ha, soit un diamètre moyen de 41,3 cm et un volume d'environ 590 m^3 .

Deux ans après la coupe rase, la plantation de 1600 tiges à l'hectare d'Épicéa a permis d'obtenir 28 ans plus tard un peuplement dont la surface terrière n'est que de $23,7 \text{ m}^2/\text{ha}$ alors qu'elle était de $31,5 \text{ m}^2/\text{ha}$ pour le peuplement inventorié vers le même âge, et ce malgré une densité de tiges supérieure. Cette densité a d'ailleurs été maintenue plus élevée que celle préconisée par les normes afin de minimiser ce retard de croissance, qui s'est tout de même maintenu jusqu'à la fin de la simulation.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer ce retard de croissance au stade de la régénération. Premièrement, la paramétrisation du module de régénération a pu être réalisée avec des peuplements de fertilité moindre, et pour des semis ne croissant pas en pleine lumière (l'investissement est alors proportionnellement plus grand dans la croissance en hauteur qu'en grosseur). Il est également possible que le LAI des jeunes semis n'atteigne pas suffisamment rapidement sa valeur maximale, ce qui mène à une utilisation moindre du rayonnement photosynthétique. Du fait de cette croissance moindre, le peuplement à la fin de la simulation est âgé de plus de 50 ans et pourtant son diamètre moyen n'est que de 29,5 cm, contre 41,3 cm pour le peuplement mis à blanc, ce qui amène à le maintenir encore sur pied. Il est intéressant de noter que la différenciation des dimensions de couronne est moindre en 2099 qu'en 2039, du fait que les arbres de la plantation aient été générés par le modèle avec des dimensions identiques (figure 15).

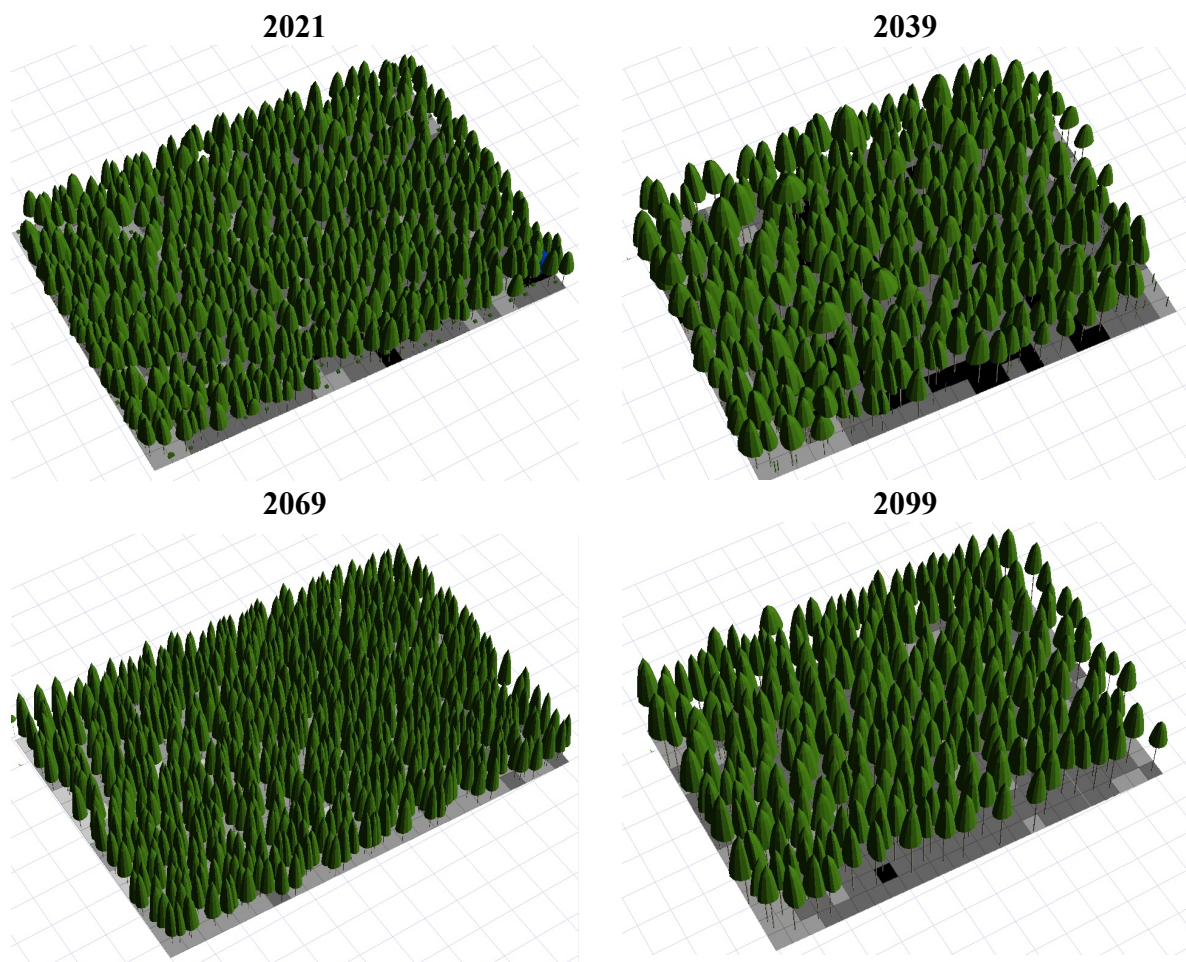


Figure 15

Visualisation en 3D du peuplement de Honsfeld pour le scénario traditionnel avec coupe rase

5.3.2 Honsfeld – Traditionnel avec coupes progressives

Le remplacement de la mise à blanc par trois coupes progressives a permis de combiner le renouvellement du peuplement avec une croissance prolongée des arbres matures. A la figure 16, l'année 2045 correspond au peuplement suite à la première des trois coupes progressives, et on remarque que le peuplement de 2081 issu de cette régénération présente une structure à deux étages. En effet, contrairement au scénario précédent, le module de régénération a été activé dès le début de la simulation, ce qui amène à la présence de semis avant même la coupe d'ensemencement. Cette régénération précoce a été considérée détruite à 80 % par l'exploitation du peuplement initial, avant de constituer l'étage dominant du peuplement. Une rotation avant la fin du scénario, cet étage dominant totalisant 240 m^3 est considéré comme mature et récolté en considérant 30 % de casse dans les tiges issues des coupes progressives.

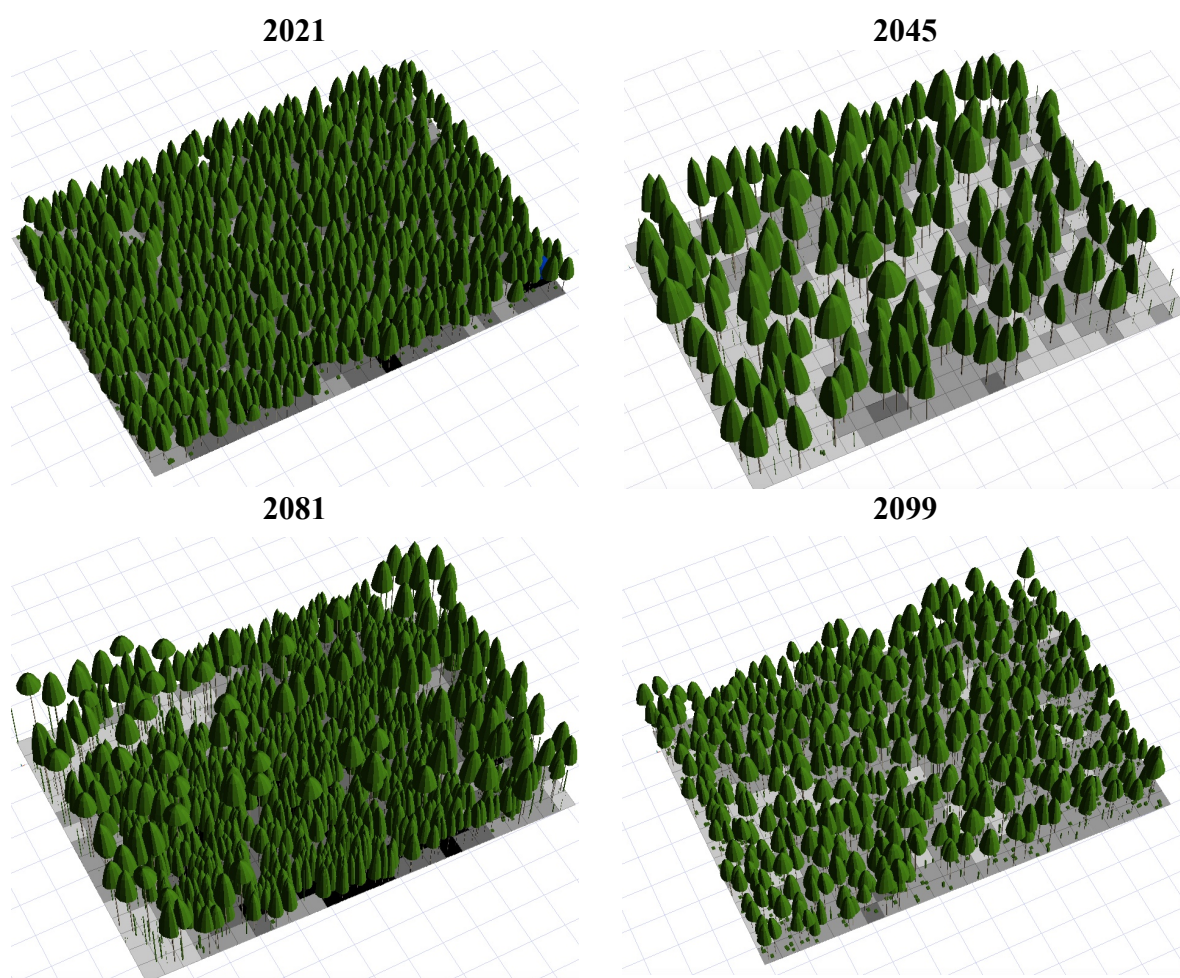


Figure 16

Visualisation en 3D du peuplement de Honsfeld pour le scénario traditionnel avec coupes progressives

Les figures 17 et 18 ci-dessous montrent l'évolution de la surface terrière et du nombre de tiges avec le temps. On y observe que le recrutement s'est bien effectué en deux vagues, la seconde, liée aux trois coupes progressives, concerne environ 2000 tiges dont l'apparition s'étale sur quatre rotations. Deux éclaircies sévères dans ce recrû ont été nécessaires pour ramener le peuplement à des densités proches des normes sylvicoles. Dans les faits, l'obtention de telles densités représente certainement un cas idéal, compte tenu des nombreux facteurs pouvant mettre à mal la germination et la survie des semis. Ne serait-ce que pour l'enlèvement du couvert, Nilsson et al. (2002) relatent qu'il peut causer de fortes mortalités chez l'Epicéa, même lorsqu'il est progressif. Une rotation avant la fin du scénario, les derniers gros bois issus de la première génération de recrûs sont récoltés, ils représentent alors environ 15 m² de surface terrière et un volume de 240 m³, ce qui n'est pas négligeable. Six ans plus tard, le peuplement final entièrement issu des coupes progressives a une hauteur dominante de 26,8 m, une densité de 630 tiges/ha et une surface terrière de 24,2 m²/ha. En comparaison, le peuplement final du scénario avec coupe rase atteint ces dimensions en 2087, soit 10 ans plus tôt. La régénération issue de coupes progressives prend donc plus de temps à croître, car la ressource lumineuse est interceptée à la fois par les arbres matures laissés sur pied, et dans ce cas-ci par des sprinters qui étaient présents dans le peuplement avant même la coupe d'ensemencement.

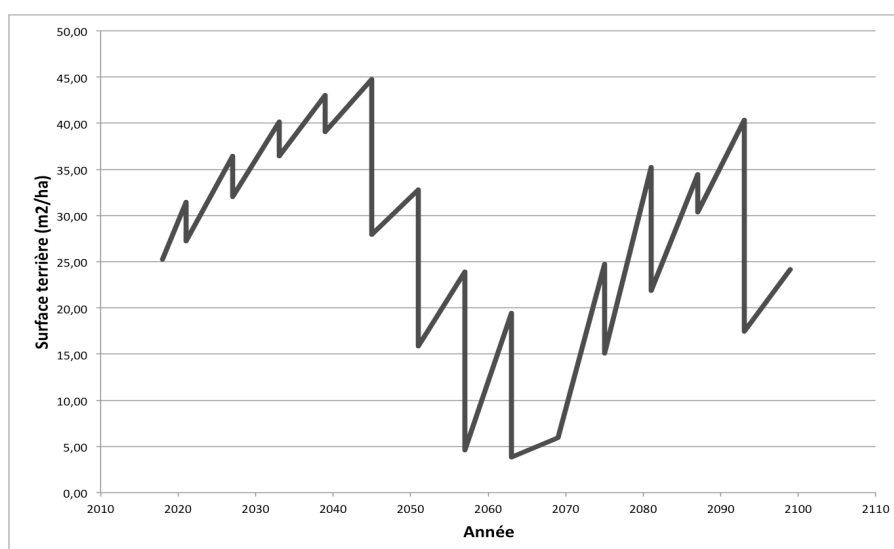


Figure 17

Evolution de la surface terrière du peuplement de Honsfeld pour le scénario traditionnel avec coupes progressives

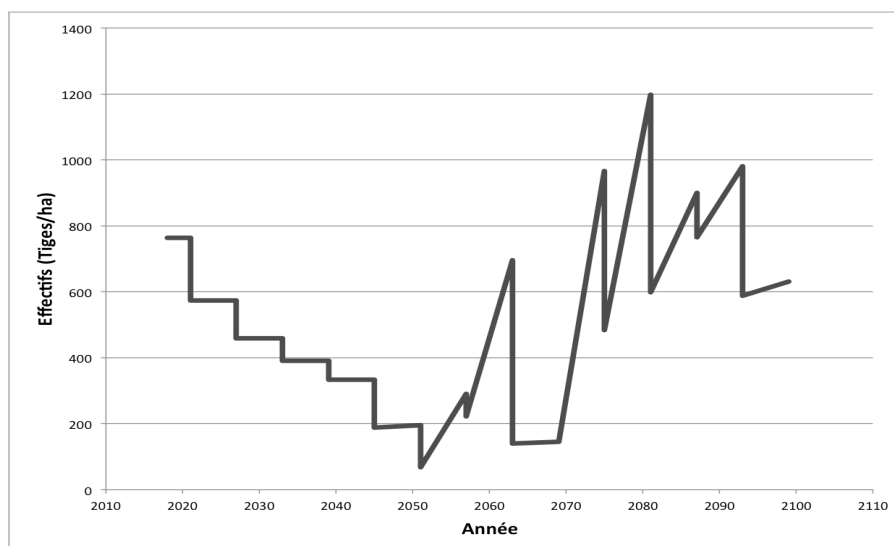


Figure 18

Evolution des effectifs du peuplement de Honsfeld pour le scénario traditionnel avec coupes progressives

5.3.3 Honsfeld – Irrégularisation par dimension cible

La récolte par dimension cible permet bien l'obtention progressive d'un peuplement irrégulier au départ de la plantation équienne. Le caractère mixte des éclaircies pratiquées a permis le maintien sur pied de tiges de statut social varié, puis à partir de 2057 l'apparition d'un passage à la futaie vient assurer le renouvellement des gros bois au fur et à mesure de leur récolte. Dans le peuplement final, ces gros bois sont répartis par pied d'arbre sur toute la surface, et deux Sorbiers et un Hêtre issus de l'inventaire initial ont été laissés sur pied (figure 19). La luminosité parvenant aux cellules de sol est globalement la même que dans le peuplement initial, si ce n'est que les zones plus lumineuses sont plus étendues et ne correspondent plus aux cloisonnements d'exploitation.

Au niveau de la surface terrière, les trois premiers martelages réalisés in situ provoquent premièrement une légère capitalisation, qui finit par s'arrêter suite au passage à la récolte visant un capital sur pied résiduel de $28 \text{ m}^2/\text{ha}$ (dimension cible associé à une éclaircie mixte) (figure 20). Bien que la surface terrière à mi-rotation n'évolue ensuite plus beaucoup, les effectifs, eux, augmentent avec les premiers recrutements (figure 21). A partir de 2080, soit 60 ans après le début de la simulation, le peuplement au dessus de 15 m semble avoir atteint un état stable. La surface terrière oscille alors autour de $30 \text{ m}^2/\text{ha}$, et la densité autour de 500 tiges/ha. Les éclaircies prélèvent environ $4,5 \text{ m}^2/\text{ha}/\text{rotation}$, soit environ 35 tiges d'un diamètre moyen de 40 cm (rapport $\frac{\text{diamètre Éclaircie}}{\text{diamètre Peuplement}}$ de 1,4).

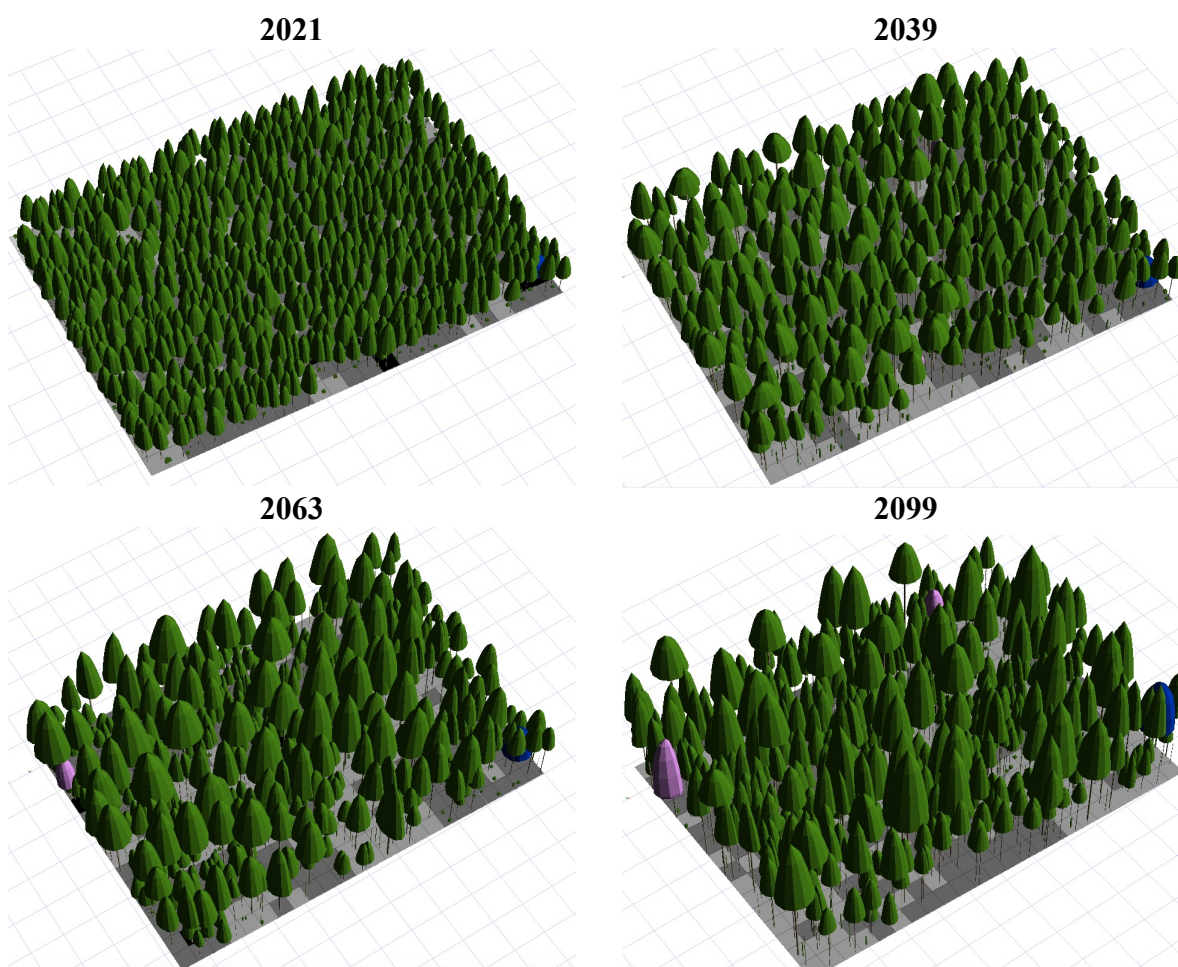


Figure 19

Visualisation en 3D du peuplement de Honsfeld pour le scénario d'irrégularisation par dimension cible

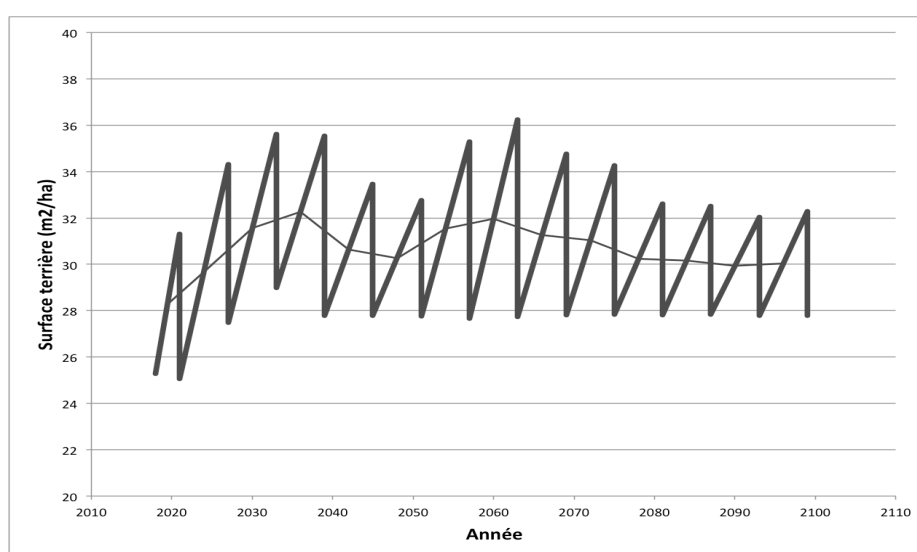


Figure 20

Evolution de la surface terrière du peuplement de Honsfeld pour le scénario d'irrégularisation par dimension cible, avec l'évolution de la valeur à mi-rotation

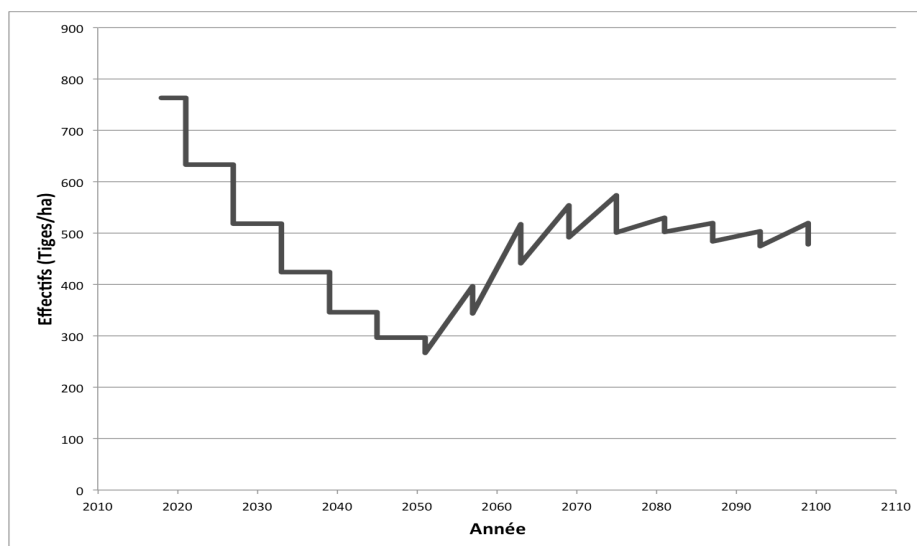


Figure 21

Evolution des effectifs du peuplement de Honsfeld pour le scénario d'irrégularisation par dimension cible

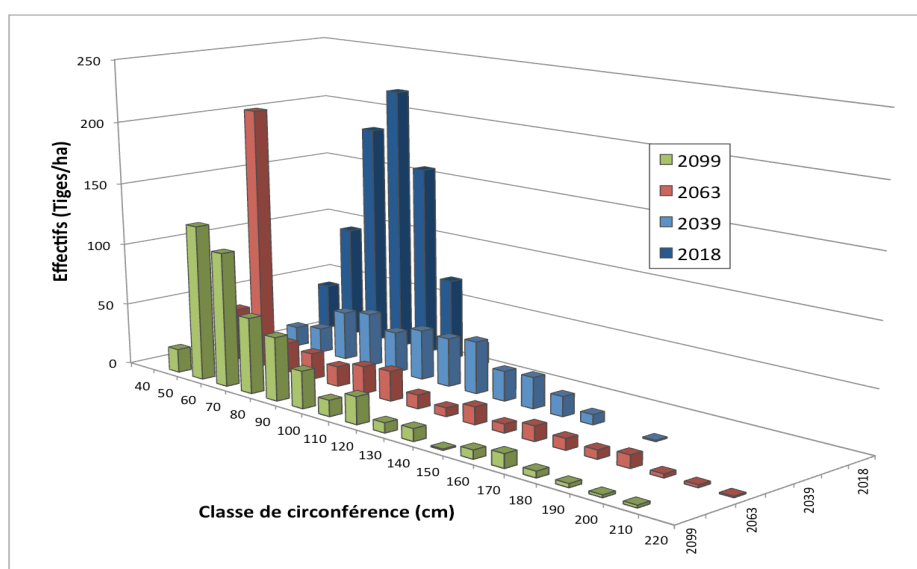


Figure 22

Evolution de la répartition des tiges par classes de circonférence durant le scénario d'irrégularisation par dimension cible

La figure 22 ci-dessus montre la transition entre le peuplement régulier et irrégulier au travers de la répartition des tiges dans les classes de circonférence. Dans un premier temps, la croissance du peuplement combinée au maintien de certaines tiges dominées permet l'étalement des dimensions, avec toutefois une baisse d'effectifs due aux éclaircies. L'apparition des premiers recrûs mène à un pic dans la classe 40-50 cm, qui finit par s'étaler lui aussi au fil des éclaircies et de la différenciation des tiges de par la compétition. On remarquera finalement que la récolte par dimension cible permet dans ce cas de borner les épicéas à la dimension maximale de 220 cm de circonférence.

Afin de juger si le peuplement final présente bien une répartition des tiges équilibrée, celle-ci a été comparée à la distribution idéale au sens de Liocourt (1898), soit lorsque toutes les classes de circonférence occupent la même surface terrière (figure 23). Les classes de 40 à 210 cm ont été considérées pour ce calcul, la surface terrière de 30 m²/ha a donc été répartie dans ces 17 classes. On remarque sur la figure que les gros bois sont sous-représentés, ce qui pourrait traduire un prélèvement légèrement excessif. Toutefois, si l'intensité de prélèvement venait à diminuer, cela pourrait mener à une capitalisation pouvant nuire à la continuité de la régénération. Le choix de diminuer le diamètre moyen des tiges prélevées n'est pas non plus souhaitable car il risquerait de mener à des sacrifices d'exploitabilité dans les bois moyens, dont l'accroissement est encore élevé, tant en grosseur qu'en qualité.

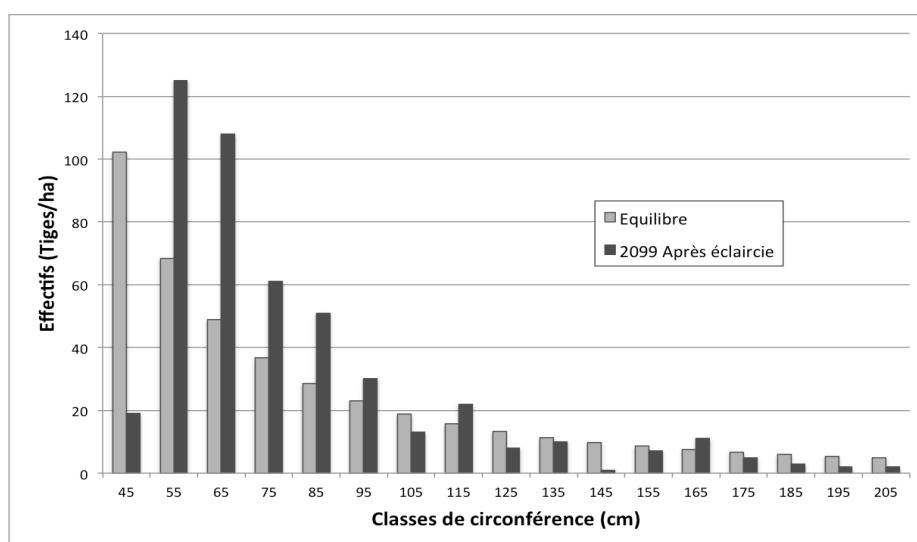


Figure 23

Répartition des grosseurs dans le peuplement final éclairci du scénario d'irrégularisation par dimension cible, et répartition idéale pour un peuplement irrégulier équilibré

Au niveau de la régénération, la figure 24 montre qu'elle a commencé à apparaître dès le début de la simulation, ce qui est plutôt précoce compte tenu du fait qu'aucune régénération n'était présente sous le peuplement en 2018. Le maximum d'effectifs est atteint 15 ans plus tard, suite à quoi l'accaparement de la ressource lumineuse par les plus grands semis mène à des mortalités chez les plus petits, ainsi qu'une diminution de l'apparition de nouveaux semis. Vers 2050, une première vague de semis a été recrutée en masse, la régénération a ensuite oscillé en tendant vers les valeurs de 2000 tiges par hectare pour une surface terrière d'environ 3 à 4 m²/ha. La diminution de l'amplitude de cette fluctuation tend à indiquer une stabilisation de la structure du peuplement, du moins dans sa composante inférieure à 15 m de hauteur.

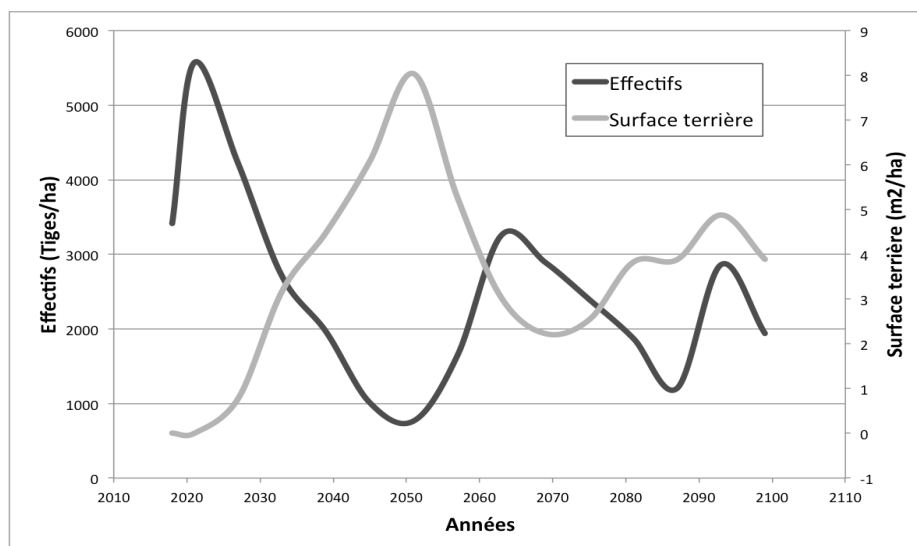


Figure 24

Evolution des effectifs et de la surface terrière pour l'ensemble de la régénération (tiges de 0 à 15 m de hauteur)

A l'année finale de la simulation, toutes les classes de grosseur de semis sont présentes et selon une distribution avoisinant une exponentielle décroissante, ce qui semble confirmer le dosage correct de la luminosité arrivant au sol (Figure 25). Sur les 30 dernières années de la simulation, la moyenne de recrutement est de 40 tiges par hectare et par rotation. Ce passage à la futaie conséquent semble suffisant pour disposer d'un choix dans la désignation des tiges d'avenir qui remplaceront les 15 tiges matures récoltées en moyenne à chaque rotation. Baar (2013) considère d'ailleurs que la sélection de 6 à 10 tiges par rotation peut suffire, en considérant 70 à 110 *Epicéa* objectifs par hectare, dont la durée de vie approximative est de 70 ans.

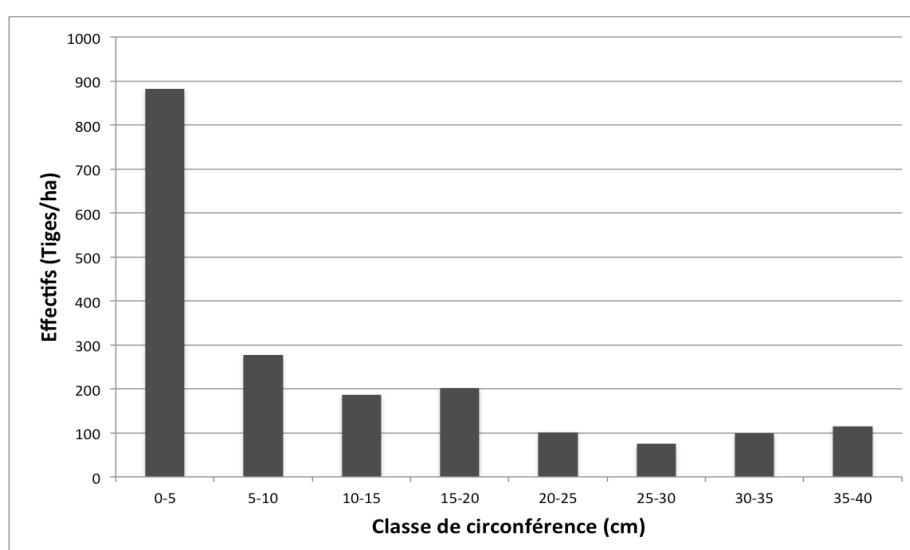


Figure 25

Répartition de la régénération du peuplement final dans les différentes classes de grosseur

5.3.4 Honsfeld – Irrégularisation par coupes en bandes

La première coupe du scénario d'irrégularisation avec coupes par bandes intervient six ans plus tard que dans les autres scénarios, ce qui ne se remarque pas particulièrement sur la représentation visuelle, si ce n'est quelques cellules moins éclairées au sol (figure 26). En 2045, trois bandes ont déjà été enlevées et on distingue que la régénération (représentée par les barres verticales) s'échelonne globalement en trois bandes de hauteurs différentes. Toutefois, plusieurs cellules présentent une régénération qui semble s'être amorcée top tôt, en particulier sur la limite inférieure du peuplement. Pour éviter un effet de bordure, le modèle accole des copies du peuplement de part et d'autre de celui-ci avant de simuler la trajectoire des rayons lumineux. L'ouverture des bandes amène donc un artefact en provoquant l'éclairement au sol de parties du peuplement qui ne devraient pas l'être. Pour cette raison, la répartition des différentes classes de taille dans le peuplement final ne correspond pas vraiment aux différentes bandes, bien qu'on remarque tout de même qu'une structure irrégulière par bouquets semble atteinte.

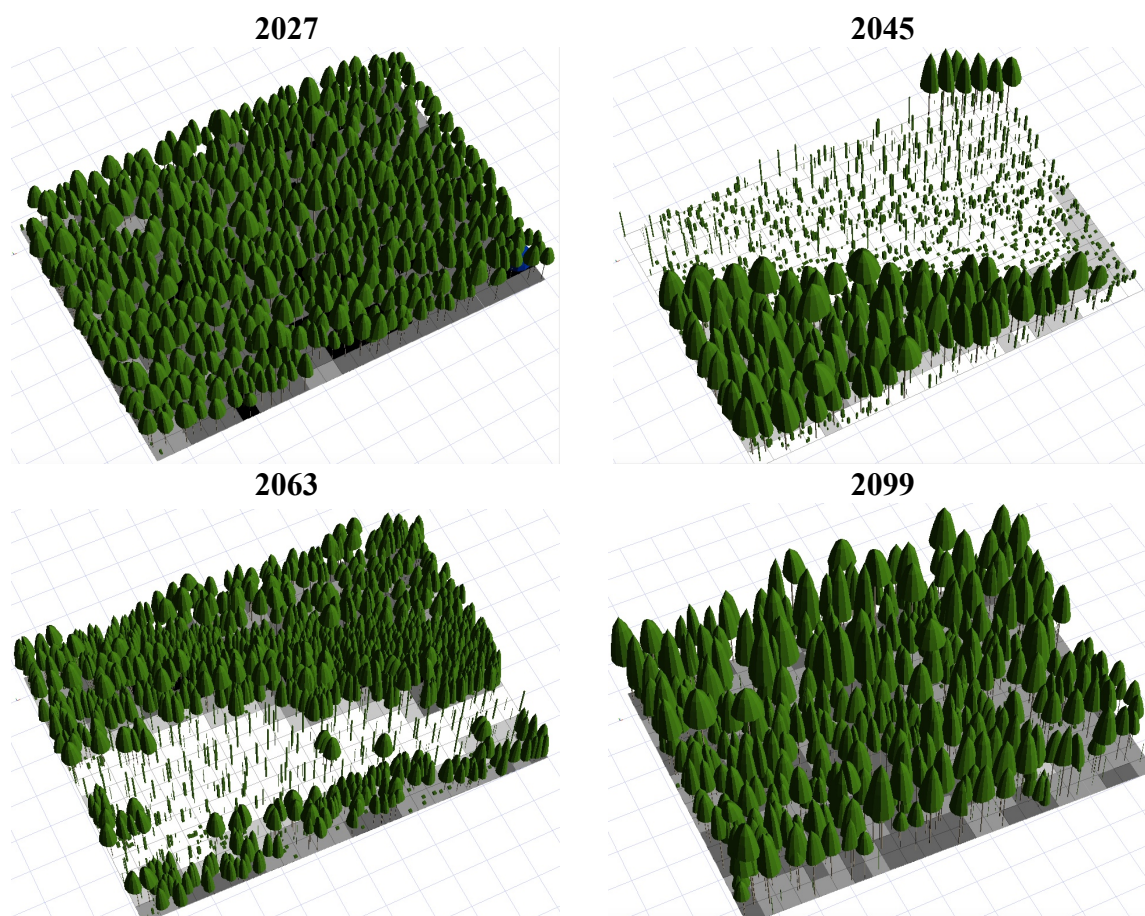


Figure 26

Visualisation en 3D du peuplement de Honsfeld pour le scénario d'irrégularisation par coupes en bandes

Au niveau de la surface terrière, l'absence d'éclaircie dans un premier temps fait monter la surface terrière au-dessus de 40 m²/ha (figure 27). Ensuite, les coupes par bandes associées à des éclaircies faibles par le bas permettent la récolte des 800 tiges initiales en cinq fois, les recrutements issus de la première ouverture ayant déjà lieu lors de l'enlèvement de la dernière bande (figure 28). L'ampleur des cinq vagues de recrutement se succédant ensuite est logiquement corrélée à la taille des bandes respectivement prélevées. En tout, le nombre d'arbres recrutés avoisine 2500 tiges ce qui a nécessité des éclaircies fortes, surtout en 2069 où 17 m² ont été récoltés pour ramener un éclaircissement au sol favorable à la continuité de la régénération.

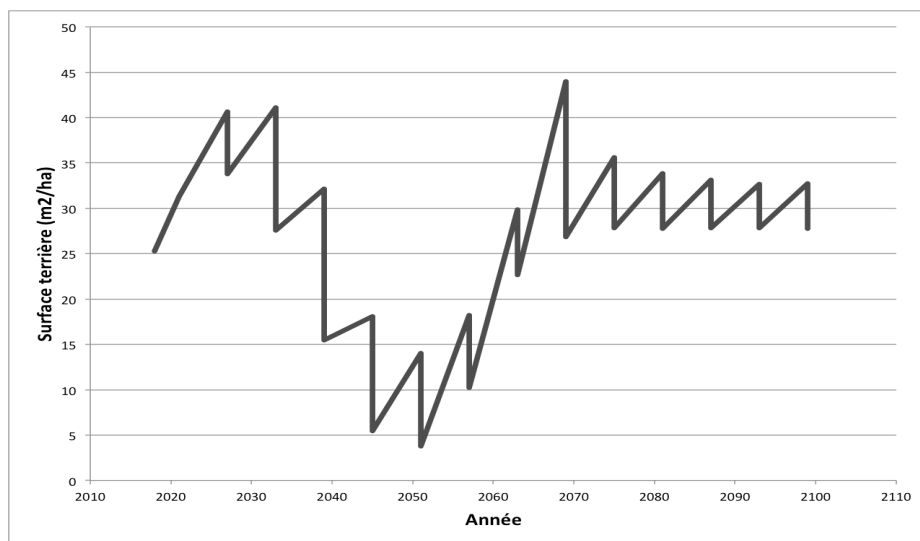


Figure 27

Evolution de la surface terrière du peuplement de Honsfeld pour le scénario d'irrégularisation par coupes en bandes

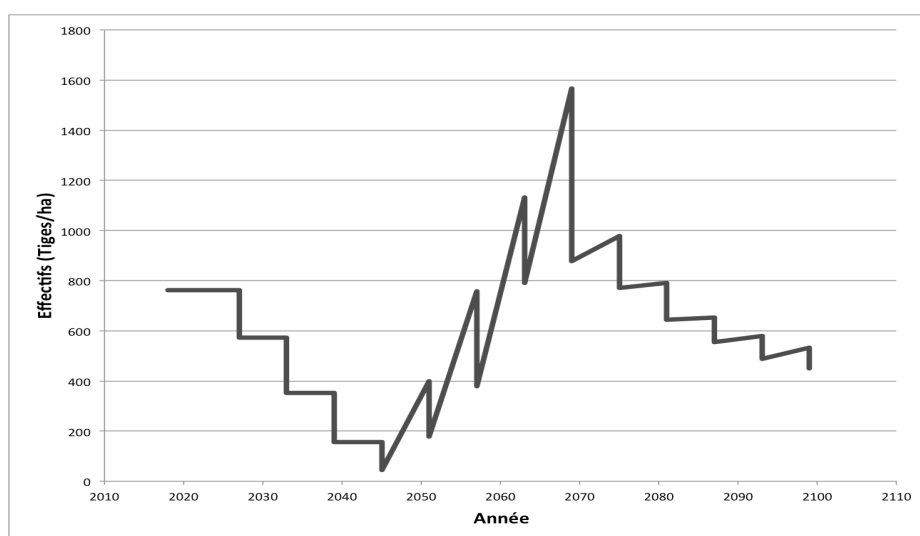


Figure 28

Evolution des effectifs du peuplement de Honsfeld pour le scénario d'irrégularisation par coupes en bandes

Lorsqu'on observe la transition entre le peuplement régulier et irrégulier au niveau de la répartition des grosseurs de tiges, la situation de départ montre déjà une plus grande différenciation des tiges que lors de l'inventaire de 2018 (figure 29). Le laisser-faire permet ainsi de tendre naturellement vers une structure plus irrégulière, du fait des dynamiques de compétition entre les tiges de statut social contrasté. Toutefois, au bout d'un certain temps, la fermeture du couvert freine cette irrégularisation en causant la mortalité systématique des tiges dominées. On ne peut donc espérer un obtenir un peuplement irrégulier équilibré sans ouverture dans le couvert, que celle-ci soit issue de la main de l'homme, ou naturelle comme dans le cas d'un chablis ou d'une attaque de ravageur. Douze ans plus tard, on observe clairement l'effet des éclaircies par le bas, mais aussi que la croissance des plus grosses tiges est assez bonne, peut-être du fait de la mise en lumière d'arbres situés en bordure de layon. En 2063, tout le peuplement initial a été récolté et le recrutement amorcé présente une distribution fortement similaire au peuplement régulier au moment de l'inventaire. La méthode des coupes par bandes doit donc être vue comme une technique de régénération favorisant l'irrégularisation et non l'inverse, car la récolte systématique d'arbres en pleine croissance ne se justifie que lorsque leur stabilité ou leur survie est compromise. Ainsi, à l'année finale de la simulation, les catégories récoltables commencent seulement à se remplir, et les plus gros bois ont 50 cm de circonférence en moins que dans le scénario précédent.

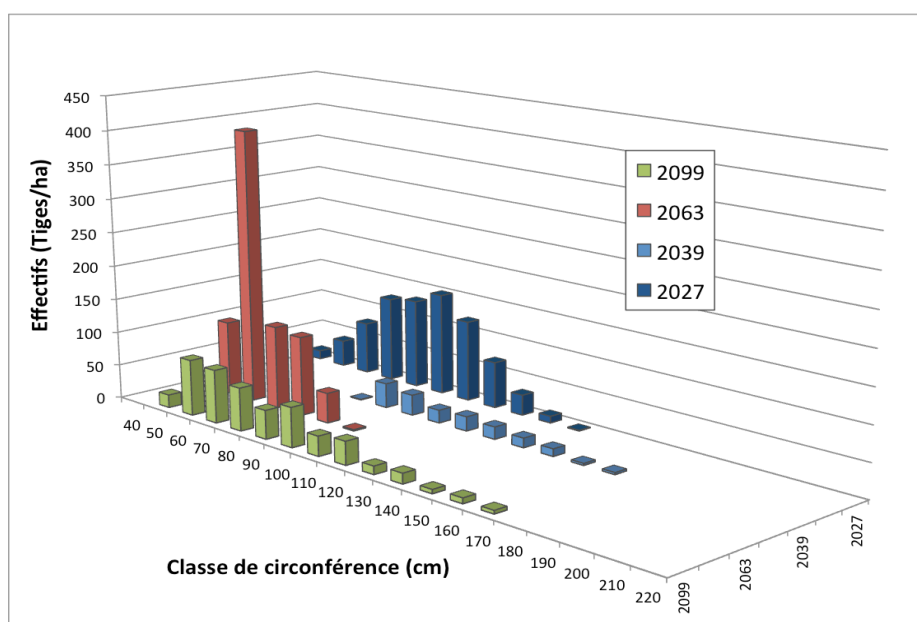


Figure 29

Evolution de la répartition des tiges par classes de circonférence durant le scénario d'irrégularisation par coupes en bandes

La figure 30 ci-dessous compare la distribution des tiges composant le peuplement final, par rapport à la situation d'équilibre au sens de Liocourt (1898) calculée précédemment. On y voit que les effectifs de gros bois devraient être laissés intacts afin qu'ils puissent croître et occuper l'espace de manière optimale. Les classes surreprésentées sont situées dans les bois moyens, ce qui est logique étant donné que l'entière du peuplement a été renouvelé 50 à 70 ans plus tôt.

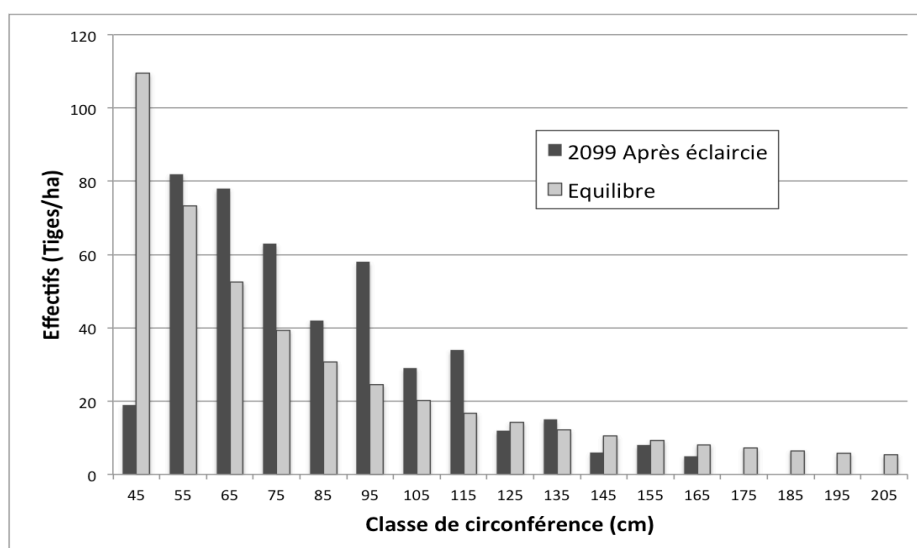


Figure 30

Répartition des grosseurs dans le peuplement final éclairci, et répartition idéale pour un peuplement irrégulier équilibré

La régénération composée des tiges inférieures à 15 m a atteint un maximum juste avant les premiers recrutements vers 2050 (figure 31). Le peuplement complet comptait alors plus de 13.000 tiges, et sa surface terrière atteignait 42 m²/ha. Les éclaircies fortes pratiquées jusqu'à la fin de la vague principale de recrutement ont permis d'emblée de plafonner le capital sur pied à des valeurs compatibles avec la continuité de la régénération. Cela a permis d'atteindre dès 2070 un état semblant stable, où la régénération oscille autour de 1000 tiges et 2 m² par hectare. A la fin du scénario, toutes les classes de taille sont présentes, ce qui présage la continuité du recrutement (figure 32). Toutefois, à partir de 10 cm de circonférence, les effectifs dans chaque classe sont inférieurs à 100 tiges à l'hectare, ce qui signifie que le recrutement risque d'être faible voire insuffisant dans les prochaines 30 années. Il apparaît donc une contradiction entre le perchis qui nécessiterait d'être dégagé pour assurer l'avenir du peuplement, et les bois récoltables qui devraient être laissés sur pied pour ne pas restreindre sa rentabilité.

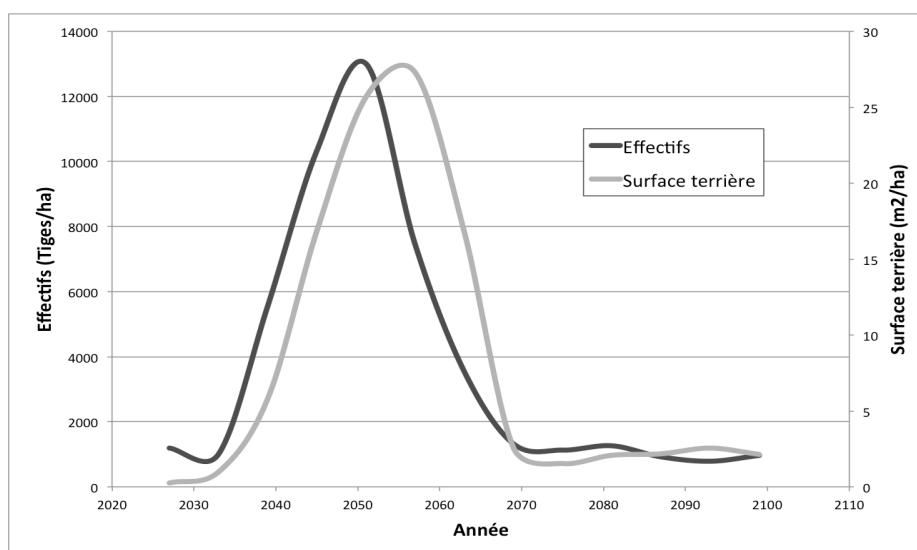


Figure 31

Evolution des effectifs et de la surface terrière pour l'ensemble de la régénération (tiges de 0 à 15 m de hauteur)

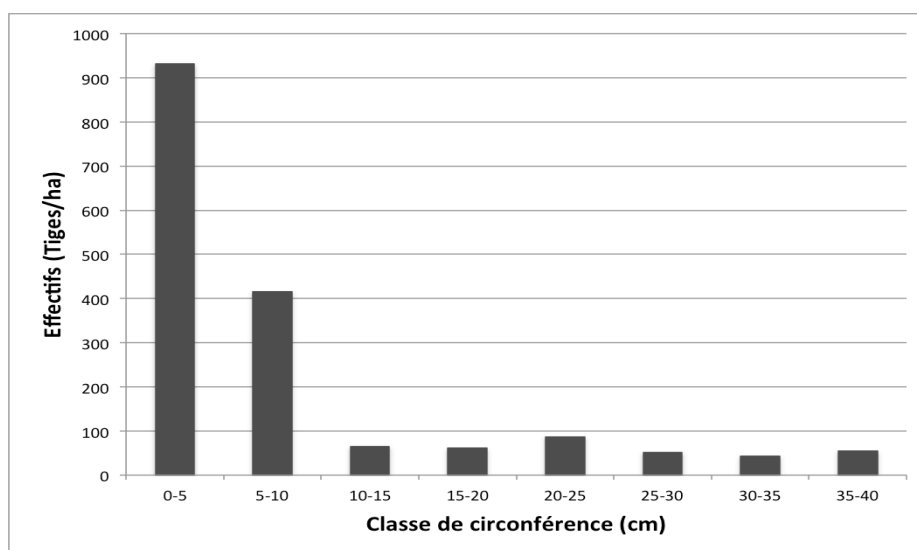


Figure 32

Répartition de la régénération du peuplement final dans les différentes classes de grosseur

5.3.5 Buchholtz

Pour rappel, les trois scénarios pour le peuplement de Buchholtz diffèrent par le temps mis pour prélever les vieux Epicéas surplombant le sous-étage en croissance. Après que cela soit fait, les tiges dépassant 65 cm de diamètre ont été prélevées à chaque rotation, ainsi que 15 % du peuplement par une éclaircie mixte aléatoire. Les surfaces terrières découlant des trois scénarios sont reprises à la figure 33 ci-dessous, et leur tendance est comparée via l'évolution de la valeur à mi-rotation à la page suivante (figure 34).

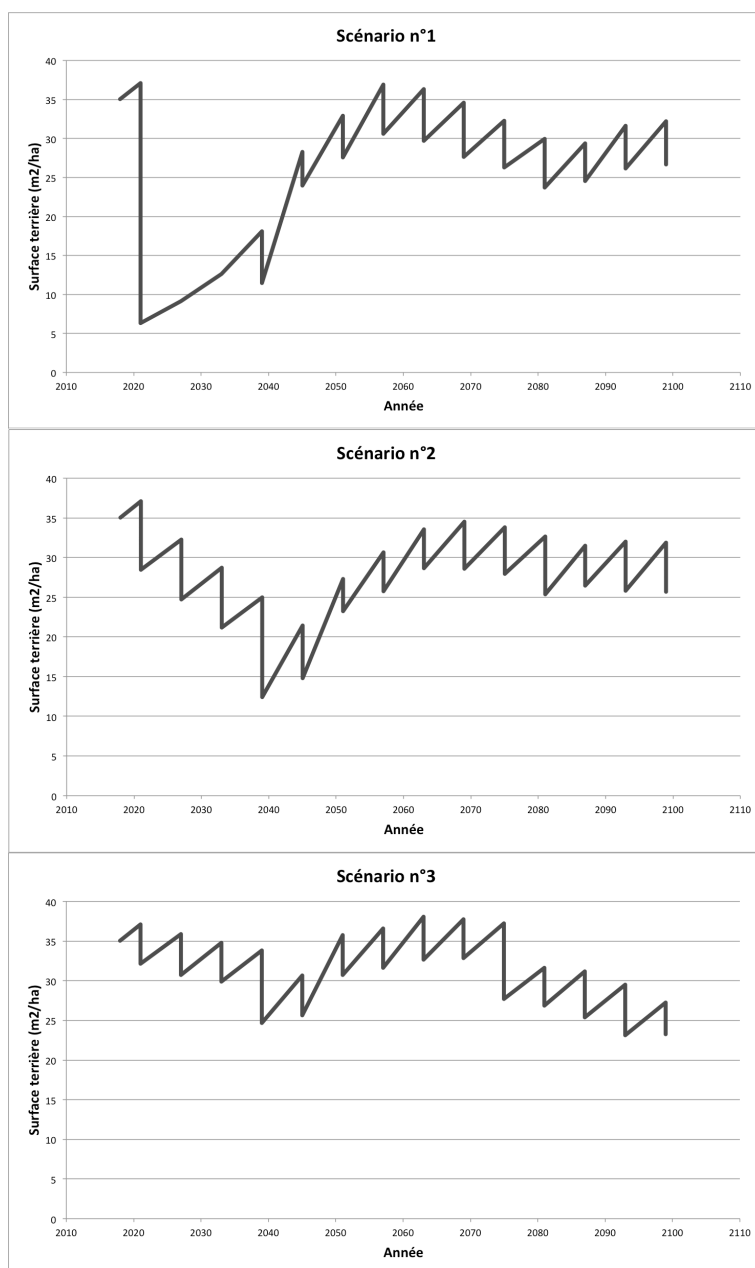


Figure 33

Evolution de la surface terrière du peuplement de Buchholtz pour les trois scénarios

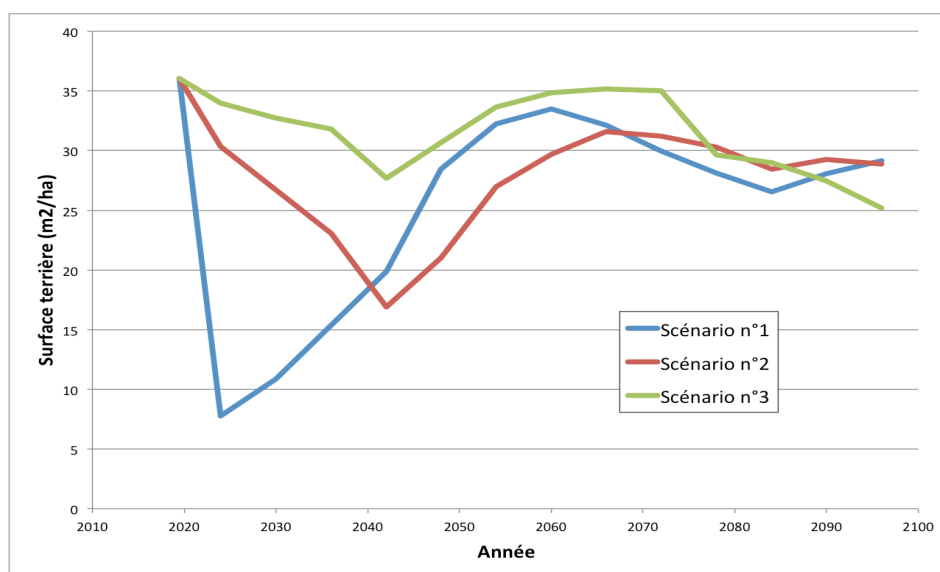


Figure 34

Evolution de la surface terrière à mi-rotation pour les trois scénarios du peuplement de Buchholtz

Le premier scénario (prélèvement des gros bois en une fois) voit d'emblée la surface terrière du peuplement baisser à 6,3 m²/ha, suite à quoi elle remonte pendant cinq rotations avec le recrutement, jusqu'à osciller autour de 30 m²/ha avec une amplitude de 6 à 7 m²/ha. Le second scénario (prélèvement en 5x) opère un prélèvement plus graduel qui ne fait pas baisser la surface terrière en dessous de 12 m²/ha, et les premiers recrutements ont lieu avant même que l'entière des gros bois soient enlevés. La surface terrière du peuplement remonte presque aussi rapidement que dans le premier scénario autour de 30 m²/ha, et elle oscille ensuite moins fortement autour de cette valeur (4 à 5 m²/ha d'amplitude). Dans le troisième cas (prélèvement en 9x), l'intensité de prélèvement ne dépasse pas 5 m² par hectare et par rotation, sauf en 2039 de par la récolte des sorbiers, et en 2075 avec la première éclaircie mixte prélevant 15 % des tiges. La surface terrière a premièrement tendance à baisser légèrement avant de remonter avec les recrutements, mais à partir de 2075 et jusqu'à la fin de la simulation, les récoltes par diamètre cible combinées aux éclaircies mixtes semblent imprimer une tendance nette vers la décapitalisation. Lorsque l'on prend la moyenne des cinq dernières rotations, le capital prélevé dans les trois scénarios est du même ordre de grandeur (5,6 - 6,1 - 6,1 m²/ha), c'est donc l'accroissement moyen qui est plus faible dans le troisième cas (1,40 - 1,45 - 0,86 m²/ha/an).

Sur le graphe montrant l'évolution des effectifs pour les trois scénarios, la récolte des gros Epicéas dans la première partie des scénarios est assez peu visible car cela concerne à peine 60 tiges (figure 35). Cette partie des scénarios 2 et 3 semble très similaire, mais c'est dû au fait que le scénario n°2, qui prélève de manière plus intense, le fait en se concentrant sur les tiges les plus grosses. Après la récolte des sorbiers en 2039, les recrutements s'amorcent pour les trois scénarios, selon une vitesse et une intensité proportionnelles au degré d'ouverture du couvert. Avec le passage à une modalité de récolte de 15 % des tiges en aléatoire mixte en plus des arbres de diamètre supérieur à 65 cm, l'effet des éclaircies devient plus visible sur le nombre de tiges du peuplement. Les effectifs diminuent alors jusqu'à 400 à 500 tiges par hectare, avant de remonter du fait d'un recrutement supérieur au prélèvement dans les deux premiers cas. Pour le troisième scénario, cette recapitalisation n'a pas eu lieu et le nombre de tiges fléchissant pourrait être la raison du faible accroissement moyen soulevé plus tôt.

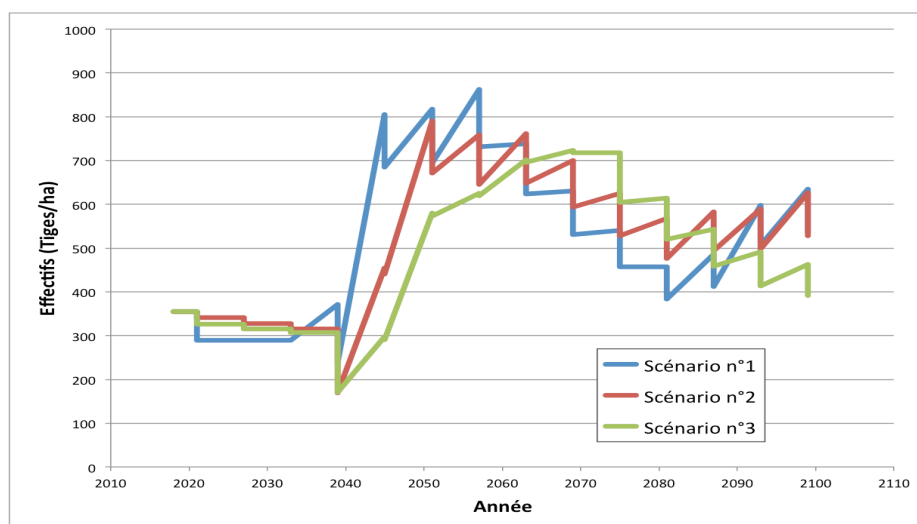


Figure 35

*Evolution des effectifs pour les trois scénarios
du peuplement de Buchholtz*

L'évolution de la répartition des tiges pour ce troisième scénario permet de comparer la situation finale avec l'année 2063, où à la fois la surface terrière et les effectifs étaient à leur maximum (figure 36). Entre ces deux dates, la récolte des 18 tiges résiduelles devenues de très gros bois a enlevé environ 15 m² de surface terrière. Entre 100 et 200 cm de circonférence, le nombre de tiges a augmenté dans toutes les catégories, par contre en deçà, les effectifs ont diminué, or c'est justement dans ces jeunes catégories que l'accroissement courant en surface terrière est maximal (Perin et al., 2016). Le passage à la futaie rentrant également en compte dans le calcul de la surface terrière, la décapitalisation finale du troisième scénario proviendrait donc d'un recrutement faible pendant plusieurs rotations.

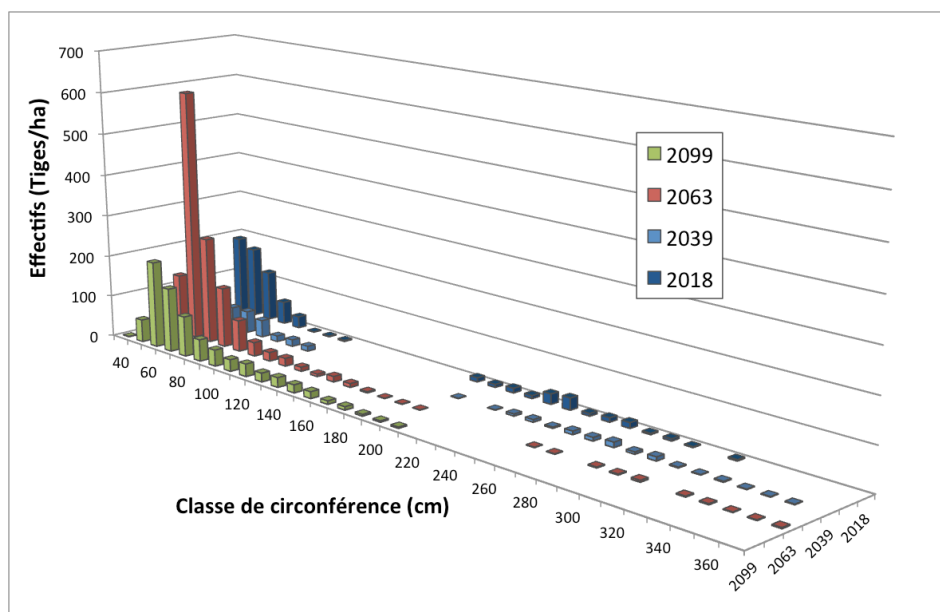


Figure 36

*Evolution de la répartition des tiges par classes de circonférence
durant le troisième scénario (récolte en 9x)*

En comparant la répartition finale des tiges entre les scénarios et avec une situation d'équilibre des classes, on observe que le recrutement (ayant lieu directement dans la classe 55 cm) est en effet plus faible dans le troisième scénario (figure 37). Toutefois, cela ne semble pas encore avoir eu un impact sur le reste des classes de circonférence, dont les effectifs sont de l'ordre de ceux à l'équilibre pour les trois cas.

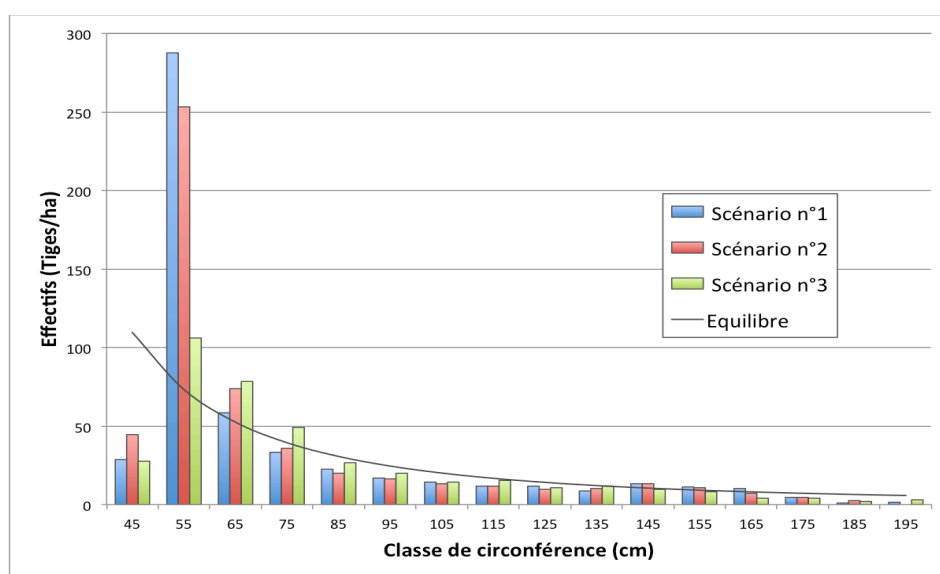


Figure 37

*Répartition des grosseurs dans les peuplements finaux éclaircis des trois scénarios,
et répartition idéale pour un peuplement irrégulier équilibré*

L'allure de l'évolution du recrutement avec le temps est globalement la même pour les trois scénarios (figure 38). Le premier pic correspond au sous-bois généré lors de l'initialisation, dont la croissance a été d'autant plus rapide, et la mortalité d'autant plus faible que le couvert a été enlevé précocement. La petite bosse accolée à ce pic est liée au recrutement des plages de semis apparues suite à la première ouverture du couvert en 2021. L'apparition massive des premiers recrûs peut s'expliquer par l'ouverture conséquente du couvert dans les deux premiers scénarios, mais pas particulièrement pour le troisième. Les densités du sous-bois généré ont été calquées sur des valeurs moyennes pour le peuplement, mais il est vraisemblable que dans les faits, la régénération soit plutôt répartie localement et de manière plus serrée. La génération d'un sous-bois moins dense et plus étalé a pu causer une mortalité moindre, qui s'est traduite par une surestimation du recrutement. Il est tout de même intéressant d'observer la difficulté d'obtenir un recrutement constant dans le temps, pourtant fondamental dans le cas d'une futaie irrégulière à l'équilibre. La pratique d'éclaircies fortes peut permettre l'apparition de brosses de semis denses et mélangées propices aux futures tiges de qualité. Mais si la surface régénérée est trop importante, les tiges résultantes arriveront simultanément à maturité sans que rien d'autre ne pousse sous elles, compromettant ainsi l'équilibre futur. A l'inverse, des éclaircies trop précautionneuses, ou le fait de maintenir trop de gros bois sur pied, peut mener à des situations où la régénération a du mal à apparaître et où les mortalités dans les gaules et perches est excessive. Cela semble avoir été le cas dans le troisième scénario, bien que le recrutement semble en augmentation faible mais constante.

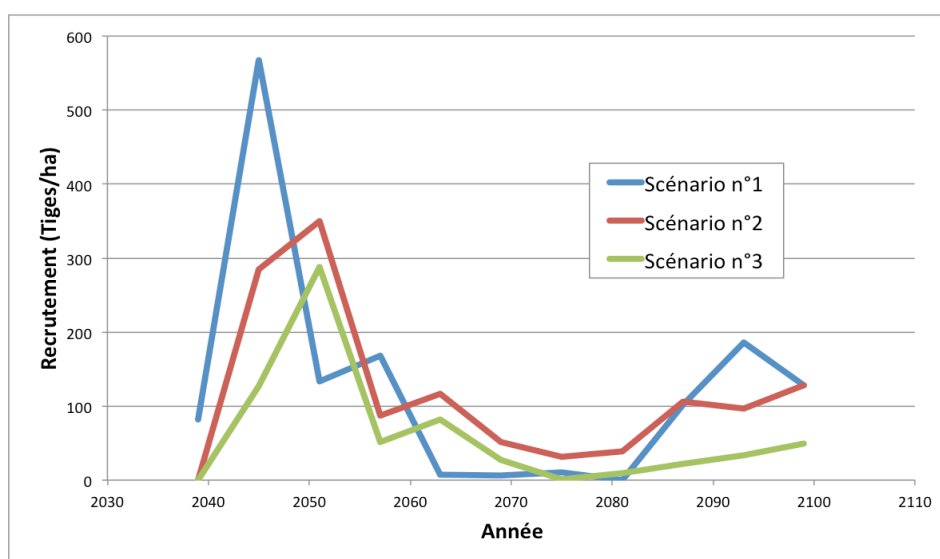


Figure 38

Evolution du nombre de tiges recrutées par hectare pour les trois scénarios du peuplement de Buchholtz

L'évolution du nombre de tiges composant la régénération suit globalement la même allure pour les trois scénarios, si ce n'est que dans le premier cas, la mise en lumière initiale mène à l'apparition de nombreux jeunes semis, alors que cette augmentation est plus faible dans les deux autres cas (figure 39). Avant même les premiers recrutements, les effectifs diminuent ce qui indique une mortalité d'auto-éclaircie supérieure à la germination de nouveaux semis. Ces deux phénomènes étant intimement liés à la luminosité et donc au degré d'ouverture du couvert, le bilan démographique est plus négatif dans le troisième scénario que dans le second. Suite à la vague de recrutements, les effectifs se stabilisent autour de 2.000 tiges à l'hectare. Dans le troisième scénario, les conditions lumineuses semblent faire diminuer progressivement la germination, puis à partir de 2075 le passage à une récolte de 15 % des tiges mène à une décapitalisation qui fait repartir les effectifs à la hausse. Etant donné qu'il faut 5 à 7 rotations pour qu'un semis atteigne le recrutement, une régénération stabilisée à 2000 tiges par hectare signifie que sans mortalités, environ 300 tiges seraient recrutées en moyenne par rotation. Le nombre de recrûs étant plutôt proche de 100 tiges/ha/rotation, on peut considérer que l'auto éclaircie cause la mortalité de l'ordre de 2/3 des tiges.

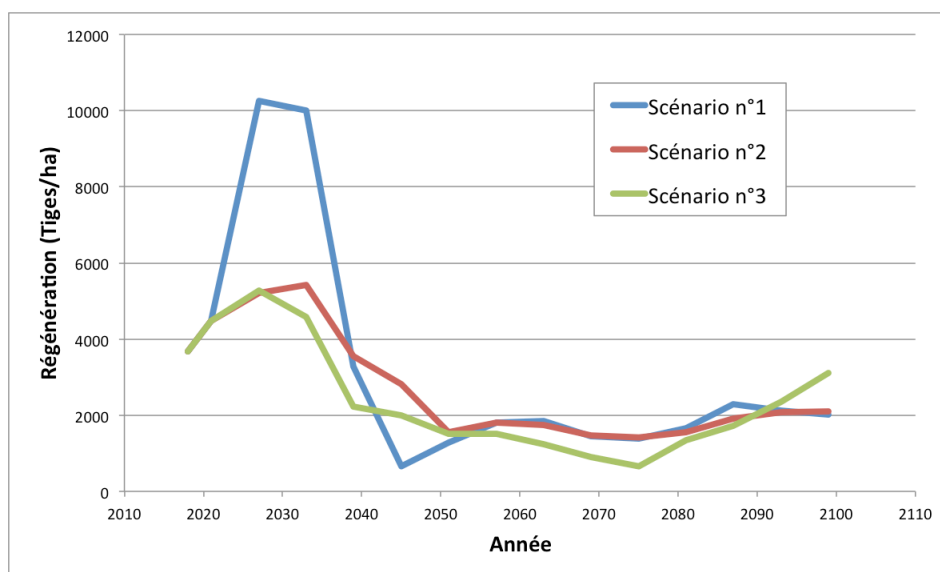


Figure 39

Evolution du nombre de tiges par hectare comprises dans la régénération pour les trois scénarios du peuplement de Buchholtz

A la fin des simulations, le nombre de tiges composant la régénération est stable depuis environ 50 ans pour les deux premiers scénarios, ce qui permet de présumer que la répartition au sein des classes de grosseur l'est aussi (figure 40). Dans le cas du scénario n°3, la baisse du capital sur pied à la fin de la simulation se traduit par la hausse du nombre de tiges de régénération dans les petites classes de grosseur, où le nombre de semis est plus du double des autres scénarios. Pour les trois scénarios, la mortalité due à la compétition pour la lumière fait diminuer les effectifs avec la taille, mais certaines fluctuations témoignent de la dynamique variable des conditions lumineuses arrivant au sol, même lorsque les modalités de coupes sont *a priori* constantes.

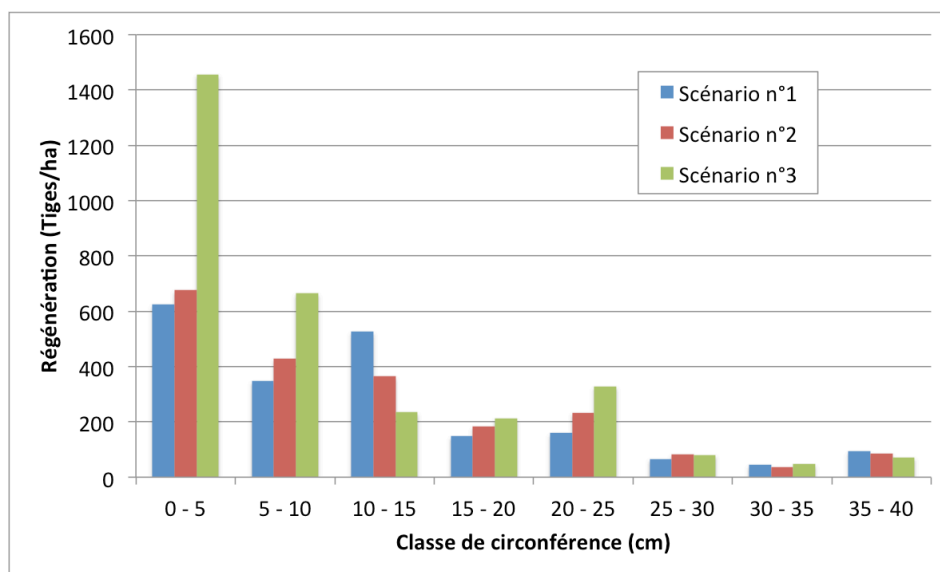


Figure 40

Densités de la régénération par classe de grosseur lors de la dernière année des trois scénarios du peuplement de Buchholtz

5.3.6 Bêchefa

Pour rappel, les simulations de Bêchefa débutent toutes par un même martelage, qui a été réalisé *in situ* afin de jauger les modalités d'éclaircies pratiquées dans la gestion courante du peuplement. Un scénario a consisté à maintenir jusqu'au bout l'intensité d'éclaircie de ce martelage (environ $4,8 \text{ m}^2/\text{ha}/\text{rotation}$), ce qui a finalement mené à une stabilisation du matériel sur pied autour de $31 \text{ m}^2/\text{ha}$ (figure 41). La problématique d'intérêt pour ce peuplement étant l'impact de climat lumineux sur la régénération mélangée, le facteur de variation principal entre les scénarios réside dans le niveau de capital sur pied. Ainsi, un second cas, qualifié caricaturalement de « fermé », stabilise la surface terrière à son présent niveau (autour de $34 \text{ m}^2/\text{ha}$) par des éclaircies d'intensité adéquate ($4,2 \text{ m}^2/\text{ha}/\text{rotation}$ en moyenne). Le cas « ouvert » débute par une décapitalisation progressive avant de maintenir le capital sur pied autour de $28 \text{ m}^2/\text{ha}$ en enlevant environ $5,2 \text{ m}^2/\text{ha}/\text{rotation}$.

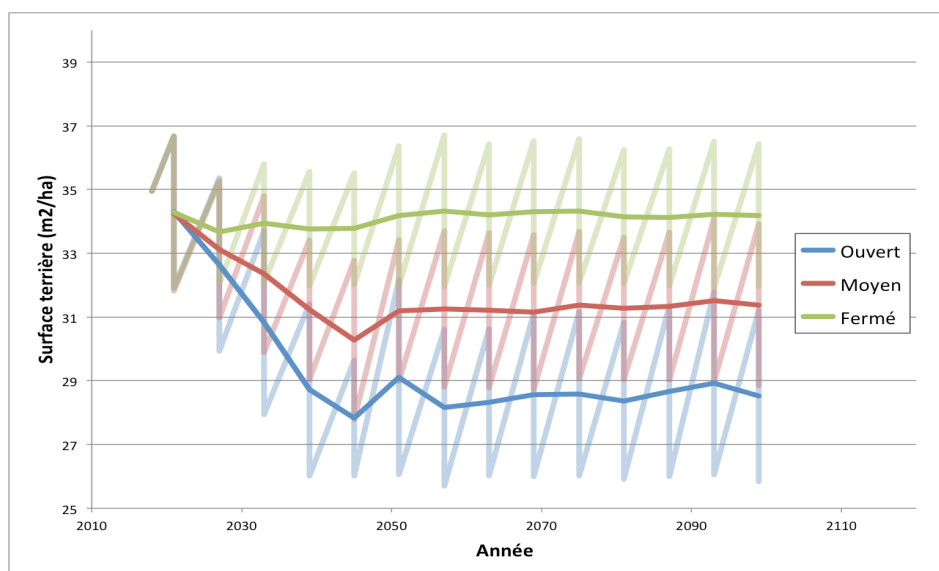


Figure 41

Evolution de la surface terrière à mi-rotation pour les trois scénarios de Bêchefa.

Au niveau des effectifs, les trois cas prélèvent dans des gros voire très gros bois, donc les densités diminuent d'abord assez peu, et de manière semblable (figure 42). Vers 2050, des recrutements proportionnels à l'ouverture du couvert font se différencier les trois peuplements. Le nombre de tiges dans le peuplement ouvert continue ensuite à augmenter graduellement, alors qu'il semble stable dans les deux autres cas. Toutefois, les trois simulations se terminent par une légère hausse d'effectifs durant les deux dernières rotations.

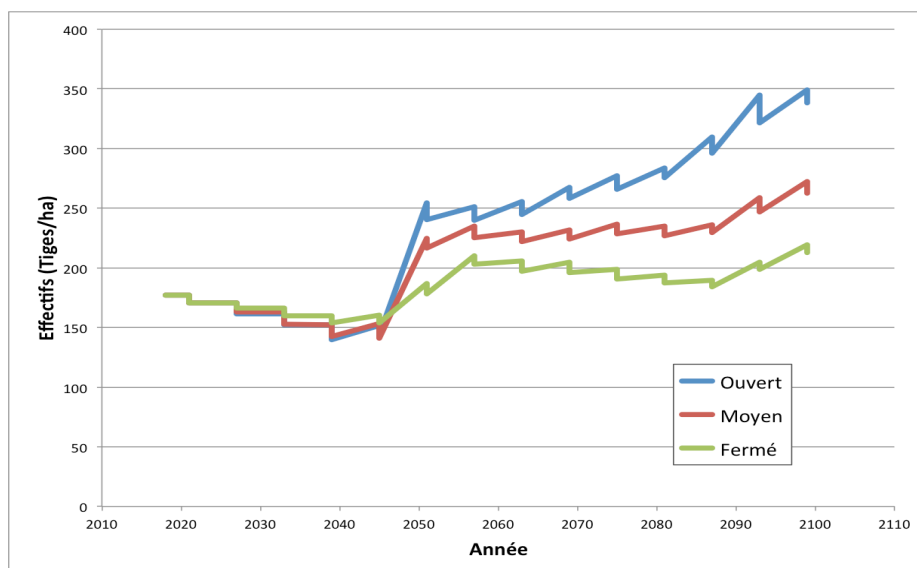


Figure 42

Evolution des effectifs pour les trois scénarios de Bêcheffa.

Le scénario moyen a été choisi pour observer l'évolution du peuplement, au travers de la répartition des tiges dans les classes de grosseur (figure 43). Les très grosses catégories (jusqu'à 400 cm de circonférence) sont bien présentes dans le peuplement initial, mais la récolte progressive de ces bois a permis d'en diminuer les effectifs, sans toutefois s'en débarrasser. La place occupée par ces gros bois en 2018 semble se faire au détriment des petits et moyens bois, mais ce déficit semble s'estomper avec le temps sans trop d'impact, du fait de la récolte par le haut. A partir de 2050, les recrutements permettent d'emplir progressivement les petites classes, jusqu'à obtenir une répartition finale semblant équilibrée.

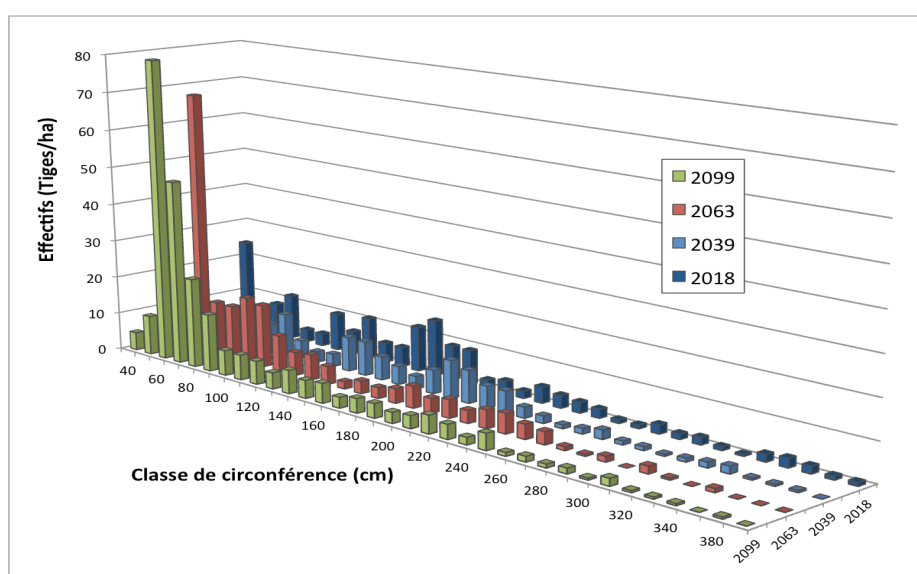


Figure 43

Evolution de la répartition des tiges par classes de circonférence durant le scénario moyen

La figure 44 à la page suivante présente la répartition des effectifs par classe de circonférence dans les trois peuplements finaux, en comparaison avec la répartition équilibrée de Liocourt (1898), pour un peuplement de surface terrière équivalente et répartie dans les tiges allant de 40 à 300 cm de circonférence. La proportion des différentes essences est donnée au sein des classes de grosseur, ainsi que pour le peuplement en entier dans les graphes de type secteur.

Dans les trois cas, la distribution des tiges suit sensiblement l'exponentielle décroissante, bien qu'on retrouve un déficit autour de 100 cm de circonférence dont l'ampleur est d'autant plus grande que les prélèvements ont été faibles. La proportion de bois moyens et de gros bois semble suffisante pour les trois scénarios, mais les très gros bois peuvent encore être considérés en excès pour le scénario moyen, et surtout fermé où les bois de plus de 300 cm de circonférence occupent toujours 6,9 m²/ha. Comparativement aux courbes d'équilibre, les petits bois semblent le mieux dosés dans le scénario moyen, ce qui indiquerait que le taux de prélèvement des gros bois est compatible avec une régénération adéquate, alors que cette dernière semble quelque peu excessive dans le scénario ouvert.

Au niveau de la composition spécifique globale, la fraction de Hêtre diminue avec l'intensité de prélèvement, car cette essence n'est pas comprise dans la régénération mais uniquement dans les gros bois inventoriés dès le départ. Pour ce qui est des trois autres essences, la proportion en nombre de tiges varie finalement assez peu d'un scénario à l'autre, ce qui indiquerait un faible impact du climat lumineux sur la composition spécifique de la régénération, ou que son effet met du temps à se traduire sur le peuplement adulte. Les effectifs d'Épicéa, qui occupent près de 2/3 des peuplements, sont présents principalement dans les petites catégories et donc proportionnellement plus dans les peuplements ouverts où la régénération a été plus abondante. Les Douglas sont quant à eux plus présents dans les moyens à gros bois et représentent donc une plus grosse fraction en termes de surface terrière que d'effectifs. Dans le scénario ouvert, cette essence est très majoritaire dans les grosses catégories et presque absente des petites, tandis que dans le scénario fermé elle est moyennement présente dans toutes les classes de circonférence. Le Sapin est relativement minoritaire dans les trois scénarios et il n'est présent presque qu'en dessous de 110 cm de circonférence. En terme d'abondance relative, il compose une plus grande fraction de la surface terrière du peuplement fermé, mais c'est vraisemblablement dû à sa présence dans les très gros bois non récoltés, et non pas à sa meilleure tolérance à l'ombrage.

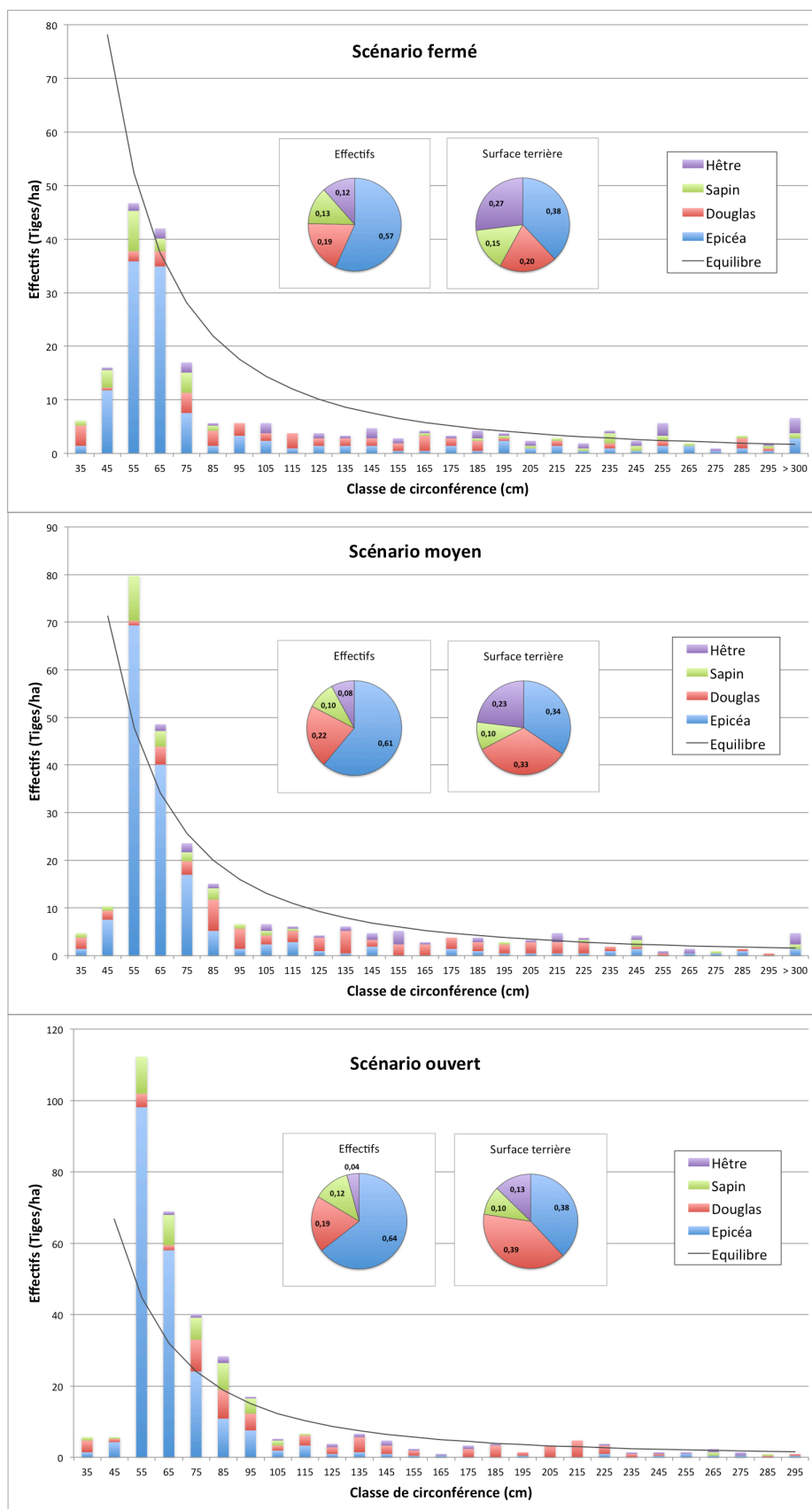


Figure 44

Compositions spécifiques et répartitions des grosseurs dans les peuplements finaux des trois scénarios de Bêcheffa comparées à une situation d'équilibre des classes.

La figure 45 à la page suivante présente l'évolution du recrutement des trois essences régénérées pour les trois scénarios, ainsi que la distribution de la régénération par classe de circonférence lors de l'année finale de ces scénarios. Comme cela a déjà été observé plus tôt, le nombre global de recrûs est inversement proportionnel au niveau de capital sur pied, même si leur apparition dans le temps a la même allure dans les trois cas.

Le premier pic à partir de 2045 est composé exclusivement d'Epicéa et de Douglas, car il provient du sous-bois initial généré sur base de la régénération observée *in situ*. La différence d'effectifs entre les scénarios est donc exclusivement liée à la mortalité et non à l'apparition de nouveaux semis. Durant les quatre premières rotations, la différence de prélèvement entre le scénario ouvert et fermé ($1,5 \text{ m}^2/\text{ha}/\text{rotation}$ en plus) a donc eu pour conséquence un taux de survie environ deux fois plus élevé dans les gaules et les perches. Suite à ce premier pic, les recrutements de Douglas ont presque cessé pendant 20 à 30 ans dans les trois cas, puis ont repris légèrement lors des dernières années. L'Epicéa suit le même schéma, mais son recrutement n'est pas nul au milieu de la simulation, et il est supérieur au Douglas à tout moment. Le recrutement du Sapin est assez faible et débute directement après le premier pic d'effectifs. Il est ensuite assez stable dans le scénario ouvert, alors que dans les deux autres, il devient nul quelques années avant de repartir fortement à la hausse. Comme la tolérance à l'ombrage du Sapin fait qu'il peut apparaître dans des zones où le Douglas est exclu, il est possible que lors de la mise en lumière de ces zones, la germination ou la survie du Douglas soient alors compromises par les jeunes Sapins ayant quelques années d'avance.

Arrivé l'année finale des simulations, les trois peuplements présentent toujours une régénération mélangée, bien que les effectifs de Douglas soient bien inférieurs aux deux autres essences. La répartition du Sapin suit clairement une exponentielle négative ce qui indique la stabilité des taux de germination et mortalité. C'est le cas aussi pour l'Epicéa dans le peuplement ouvert, mais dans les deux autres, la présence de bosses et de creux pourrait indiquer une apparition de semis plus erratique au gré des trouées. De nouveaux Douglas apparaissent peu dans les trois cas, mais leur mortalité semble moindre, surtout dans le scénario moyen. Cela pourrait être dû au fait qu'il est généré de manière moins dense que l'Epicéa et subit donc moins de compétition. Le Sapin aussi est généré selon des densités plus faibles, mais sa mortalité plus élevée pourrait être due à son apparition dans des conditions d'éclairement moins favorables à la croissance de cohortes complètes.

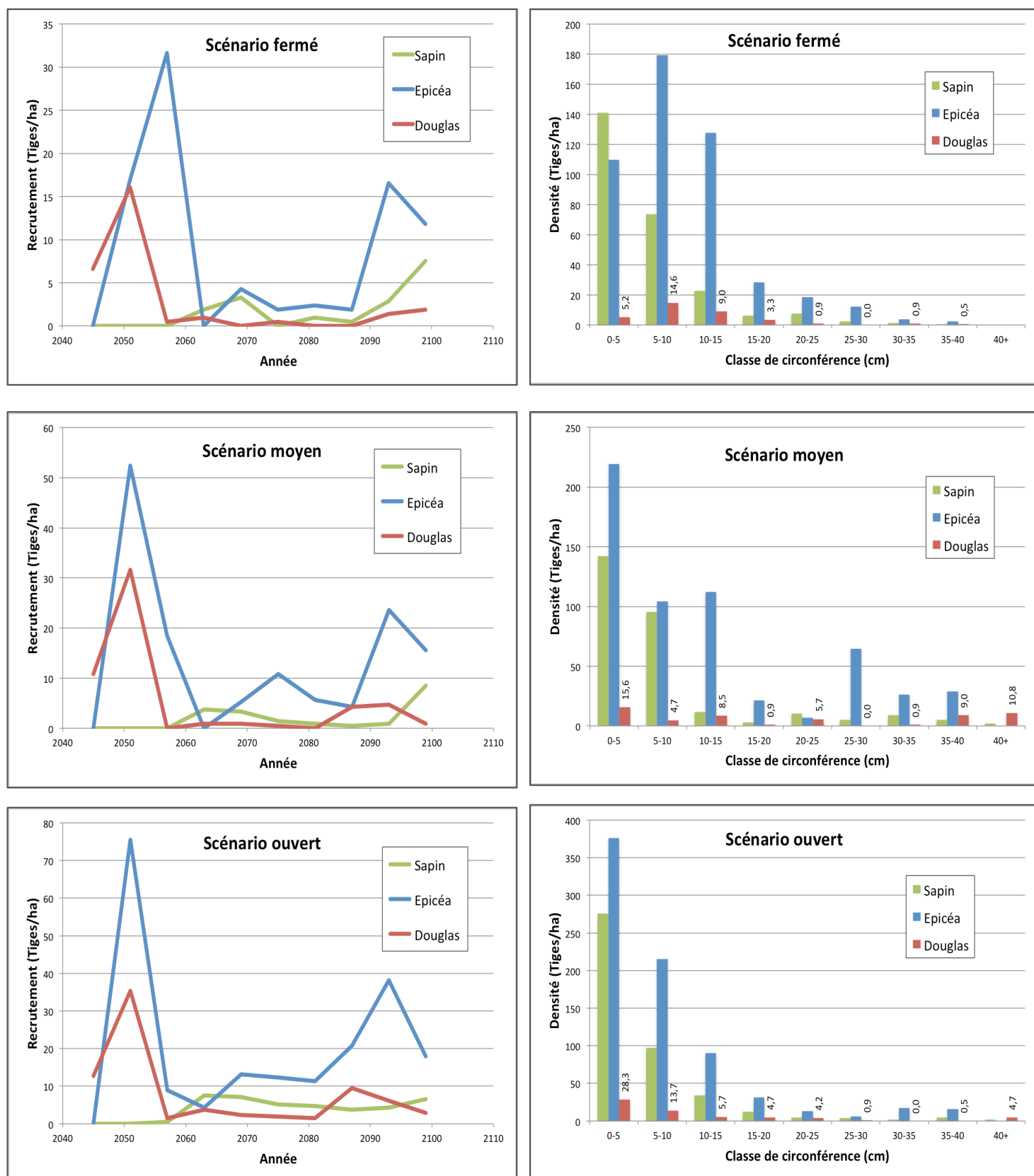


Figure 45

Evolution du nombre et de la composition des tiges recrutées lors des trois scénarios de Bêchefa (gauche). Répartition dans les différentes classes de grosseur et par essence de la régénération finale pour les trois scénarios de Bêchefa (droite).

5.4 Indicateurs

Les valeurs obtenues pour les différents indicateurs de type économique sont données pour tous les scénarios dans le tableau 8 à la page suivante.

Pour le peuplement de Honsfeld, la productivité du scénario avec coupe rase est légèrement supérieure à celle renseignée par Perin et al. (2016), qui est de 17,5 m³/ha/an pour un peuplement en classe de fertilité I, cela peut s'expliquer par une fertilisation due à l'augmentation des concentrations en CO₂. Dans les deux derniers scénarios, un effet supplémentaire semble être attribuable aux recrutements massifs qui ont eu lieu suite à l'enlèvement brusque du couvert. Cette productivité a un impact direct sur le bénéfice annuel moyen (BAM) car les prix ne sont pas modulés par la qualité des tiges dans le modèle, mais ce bénéfice est tout de même inférieur pour scénario par bandes car le peuplement y a été régénéré avant que les bois moyens n'aient pu produire de la valeur. Le BASI diffère du BAM par le fait que les flux monétaires ont moins de poids s'ils ont lieu loin dans le temps. Le fait que le BASI soit plus élevé pour le scénario d'irrégularisation par dimension cible que pour les deux scénarios traditionnels, vient donc possiblement du fait que les premières éclaircies s'y font par le haut et engrangent donc plus rapidement des recettes. Les valeurs faibles obtenues pour la rente sont probablement dues au coût élevé de la plantation initiale en 1994, et des dégagements et élagage qui ont suivi. Ainsi, dans le cas de la coupe rase, ces coûts ont eu lieu deux fois, alors que pour les coupes progressives la régénération naturelle n'a pas impliqué de coût.

Pour les deux peuplements âgés, les indicateurs de valeur financière sont plus élevés, car il n'y a pas eu de coûts liés à la plantation mais seulement aux éclaircies. De plus, les BASI ont été calculés pour les peuplements initiaux et non pour un fond nu, ils intègrent donc la valeur des arbres en croissance. Parmi les trois scénarios de Buchholtz, celui qui prélève les gros bois en cinq fois semble être celui qui maximise la productivité, et donc le bénéfice annuel moyen. Le fait que ce soit le cas du scénario médian signifie qu'une bonne productivité nécessite un équilibre entre la croissance des gros bois, et la régénération du peuplement. Le BASI et la Rente sont d'autant plus élevés que la récolte des gros bois se fait de manière précoce, car le coût de l'immobilisation de l'argent est pris en compte, et le fait de maintenir ces gros bois sur pied équivaut à l'immobilisation de capitaux potentiels.

Concernant le peuplement de Bêchefa, la productivité est bien moindre qu'à Buchholtz, ce qui pourrait être dû à la plus grande présence de gros et très gros bois, dont la croissance finit par plafonner (circonférence de la tige moyenne initiale : 50,2 cm contre 35,4 cm à Buchholtz). Cela explique certainement l'obtention de valeurs inférieures pour tous les autres indicateurs par rapport à Buchholtz, étant donné que les coûts sont sensiblement équivalents. Parmi les trois scénarios, celui dont le matériel sur pied est le plus faible obtient de meilleurs résultats, probablement pour différentes raisons. Premièrement, l'enlèvement des gros bois ayant dépassé leur maximum de croissance en volume et en valeur permet de libérer de la place pour les tiges situées dans leur optimum de croissance. Ensuite, le temps supplémentaire mis pour refermer le couvert après coupe mène à la germination et à la survie d'une régénération abondante, dont le recrutement ultérieur produit de gros volumes de petits bois partant en éclaircies. Enfin, il est possible que la productivité soit améliorée par la composition plus riche en Epicéa et en Douglas, dont la croissance est plus rapide que le Sapin et le Hêtre.

Tableau 8 Synthèse des indicateurs économiques pour les différents scénarios des trois peuplements

Scénario	Productivité (m ³ /ha/an)	Bénéfice annuel moyen (€/ha/an)	BASI (€/ha)	Rente (€/ha/an)
Honsfeld				
Traditionnel - Coupe rase	18,6	758	5.027	156
Traditionnel - Coupes progressives	22,6	769	6.147	191
Irrégularisation - Dimension cible	18,8	644	6.220	169
Irrégularisation - Bandes	20	505	5.601	162
Buchholtz				
Prélèvement en 1 x	21,2	959	47.706	1.554
Prélèvement en 5 x	22,2	1.012	41.929	1.352
Prélèvement en 9 x	21,4	987	32.844	1.064
Bêchefa				
Scénario fermé (G ± 34)	14,2	753	23.209	723
Scénario moyen (G ± 31)	15,4	854	26.874	841
Scénario ouvert (G ± 28)	15,5	922	29.409	918

Une estimation de la quantité de carbone séquestrée dans le tronc et les branches des peuplements finaux des différents scénarios est donnée dans le tableau 9 ci-dessous. Le choix de se limiter à la situation finale représente bien entendu une simplification par rapport au cycle du carbone sur le long terme, comme en témoignent les valeurs contrastées obtenues pour les deux scénarios de sylviculture traditionnelle. En toute logique, la biomasse de carbone est intimement liée à la surface terrière, comme en témoigne la valeur inférieure pour le scénario n°3 de Buchholtz ainsi que l'ordre des scénarios à Bêchefa. Toutefois, les surfaces terrières dans les scénarios irréguliers d'Honsfeld sont supérieures à celles de Buchholtz, mais leurs plus faibles biomasses sont vraisemblablement dues à leurs effectifs moindres dans les grandes catégories de grosseur. En effet, le calcul de la biomasse est basé sur la grosseur, mais aussi la hauteur des tiges, deux grandeurs qui sont bien entendu positivement corrélées entre elles. La forte présence de gros et très gros bois dans le scénario fermé de Bêchefa et sa surface terrière élevée seraient donc les raisons pour lesquelles le carbone séquestré y atteint une telle valeur.

Tableau 9 *Estimation du carbone séquestré dans les tronc et branches des arbres sur pied lors de la dernière année des différents scénarios*

Scénario	Honsfeld				Buchholtz			Bêchefa		
	Coupe rase	Coupes prog.	Dimension cible	Bandes	N°1	N°2	N°3	Fermé	Moyen	Ouvert
Carbone séquestré (Mg/ha)	0	58,8	90,7	87,8	107,6	106,9	98,3	152,7	128,6	100,4

Bien que les peuplements irréguliers conservent en permanence des bois sur pied, ceux-ci se renouvellent en permanence et ne peuvent donc séquestrer du carbone bien au delà de leur durée de vie. De par ce fait, la nature des produits ligneux qu'ils fournissent est de la première importance car elle dicte la durée de service pendant laquelle le carbone sera immobilisé. Le bois d'œuvre constitue le produit dont cette durée de service attendue est la plus élevée, mais il ne peut être produit qu'avec des grumes d'une certaine dimension. Le rendement de sciage étant de plus directement fonction de la dimension (Chalayer 2015), la répartition des tiges récoltées par classe de circonférence constitue une information importante, tant pour la séquestration du carbone que pour l'adéquation avec la demande de la filière de transformation (et donc les prix de vente attendus).

La répartition des tiges récoltées dans les scénarios de Honsfeld montre que dans les quatre cas, les petits bois sont les plus nombreux à être récoltés, bien que ce soit moins le cas en irrégularisation par dimension cible (figure 46). Le nombre de tiges totales y est d'ailleurs plus faible, car celles-ci ont un volume moyen plus élevé du fait des éclaircies par le haut, puis de la récolte par dimension cible. Dans les deux derniers scénarios, le très grand nombre de tiges dans la catégorie 50 à 60 cm est dû aux mises à distance dans les recrutements denses causés par l'ouverture forte du couvert. Dans les deux scénarios traditionnels, la récolte des bois mûrs est visible autour de 100 à 150 cm de circonférence, ce qui correspond à un peu plus de tiges dans le cas des coupes progressives car une deuxième récolte a pu avoir lieu en fin de scénario, et le maintien de semenciers pendant deux rotation de plus a permis leur croissance supplémentaire. Dans le cas des coupes en bandes, les dimensions produites correspondent à l'optimum recherché par les scieurs, mais en l'absence d'éclaircies sélectives la qualité des tiges sera en moyenne moins bonne.

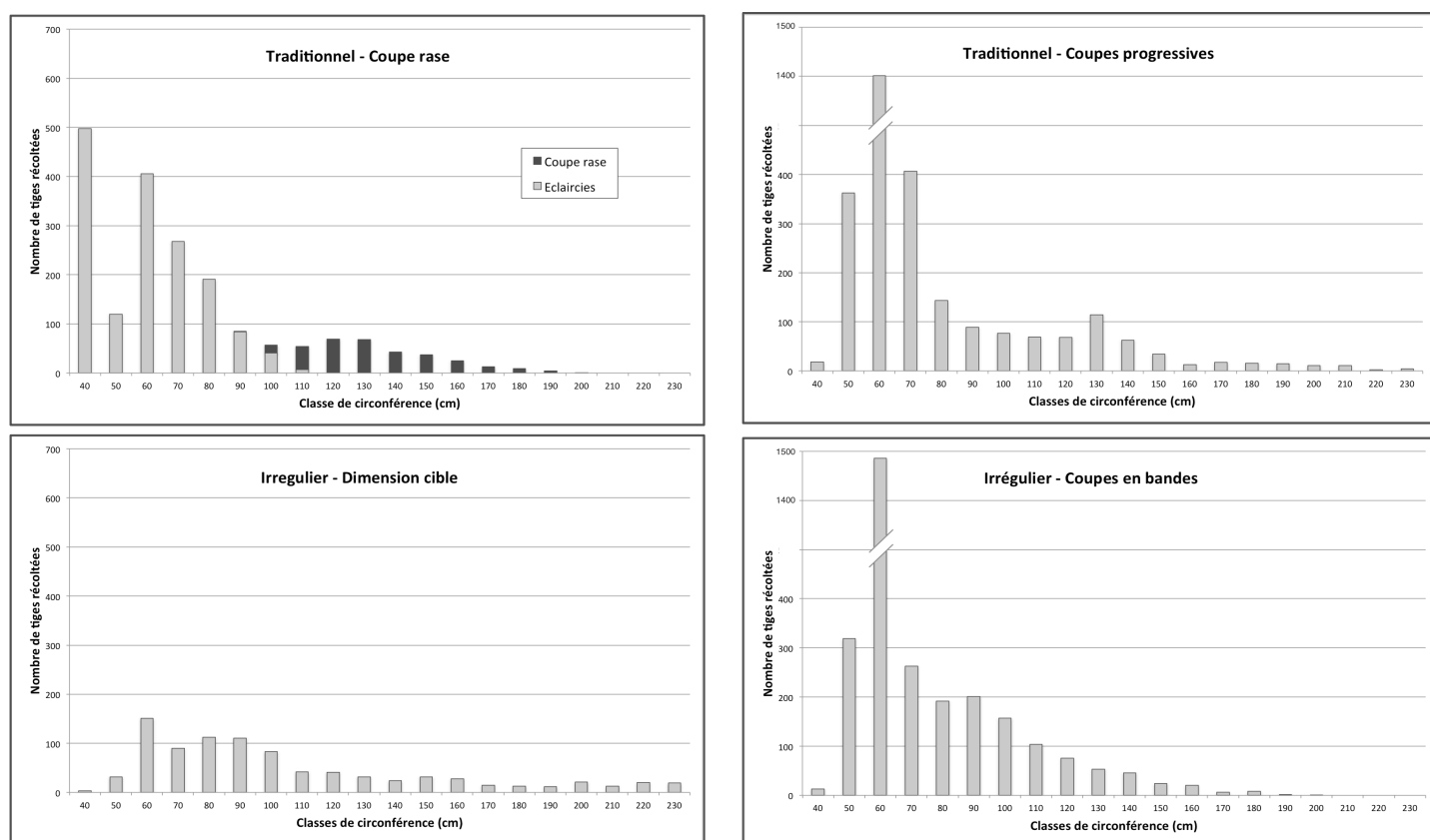


Figure 46

Comparaison de la dimension des bois récoltés au cours
des différents scénarios de Honsfeld

Dans le premier scénario de Buchholtz, les gros Epicéa de l'inventaire initial ont été récoltés directement, lorsque leurs dimensions étaient alors comprises entre 190 et 290 cm de circonférence (figure 47). Dans les deux autres cas, le choix d'une récolte progressive a amené ceux-ci à atteindre des dimensions encore plus élevées. En rouge, les prélèvements plus intenses et concentrés sur les plus grosses tiges ont mené à un pic dans les catégories de 260 à 280 cm, tandis qu'en vert le prolongement d'une récolte sans distinction sur la taille a causé un étalement des dimensions, qui atteignent alors jusqu'à 380 cm de circonférence. De telles dimensions trouvent difficilement acheteur, du fait d'une incompatibilité entre ces bois et les machines utilisées pour l'exploitation et la transformation, surtout depuis que les scieries résineuses planchent sur la maximisation du rendement horaire via des lignes canters excluant les gros diamètres. Au delà des gros bois, la répartition des tiges récoltées inférieures à 250 cm de circonférence est due au passage à une récolte systématique au delà de 65 cm de diamètre combinée à des éclaircies mixtes de 15 % des tiges. Au plus le passage à cette modalité de coupe a été précoce, au plus les effectifs de tiges concernées sont élevés. Ainsi, selon les arbres que l'on décide de laisser sur le peuplement, la production ligneuse de celui-ci peut être allouée dans quelques gros bois vieillissants, ou au contraire dans de nombreuses tiges de petites et moyennes dimensions, qui correspondent mieux aux demandes du marché.

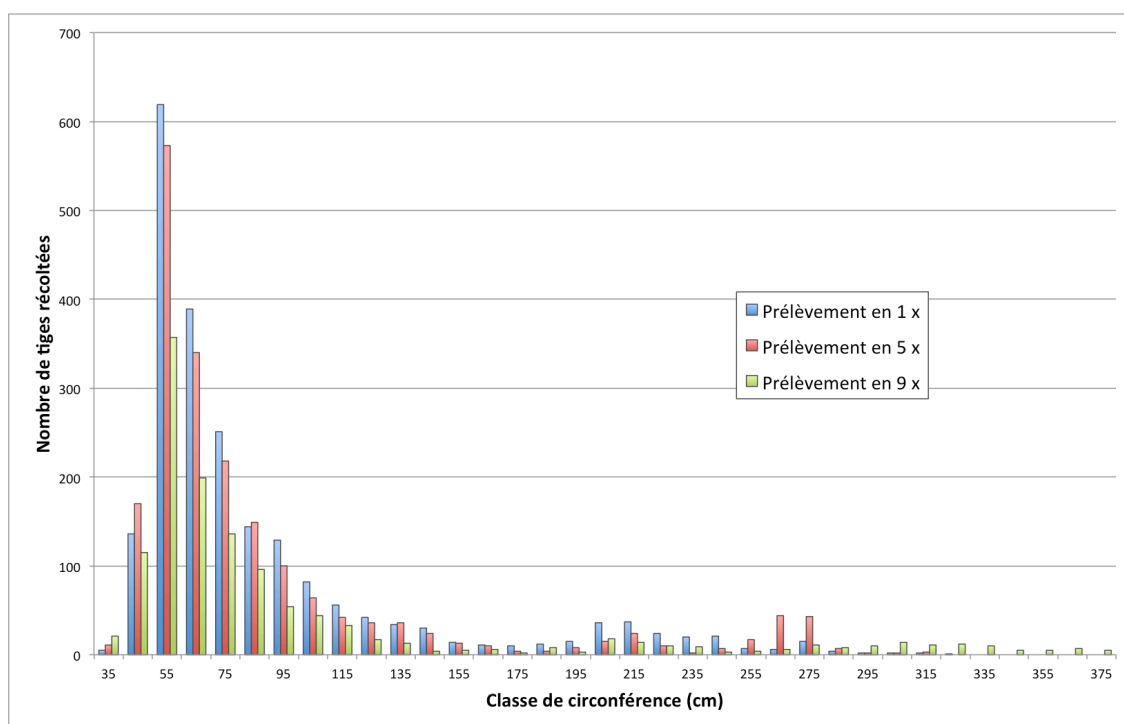


Figure 47

Comparaison de la dimension des bois récoltés au cours
des différents scénarios de Buchholtz

Le peuplement de Bêchefa comprenant initialement beaucoup de gros et très gros bois au delà de leur dimension optimale d'exploitabilité, les prélèvements ont été réalisés par le haut, ce qui explique que les tiges récoltées se distribuent autour de 250 cm de circonférence (figure 48). On remarque que dans les trois cas, le nombre de très gros bois récoltés est sensiblement équivalent, mais que le choix d'ouvrir plus le peuplement a mené à une augmentation des récoltes en dessous de 220 cm de circonférence. Cela s'explique pour ces deux scénarios par une réduction progressive du capital de très gros bois, ce qui mène à une récolte de plus en plus précoce dans des catégories où l'exploitation et la vente sont plus aisées.

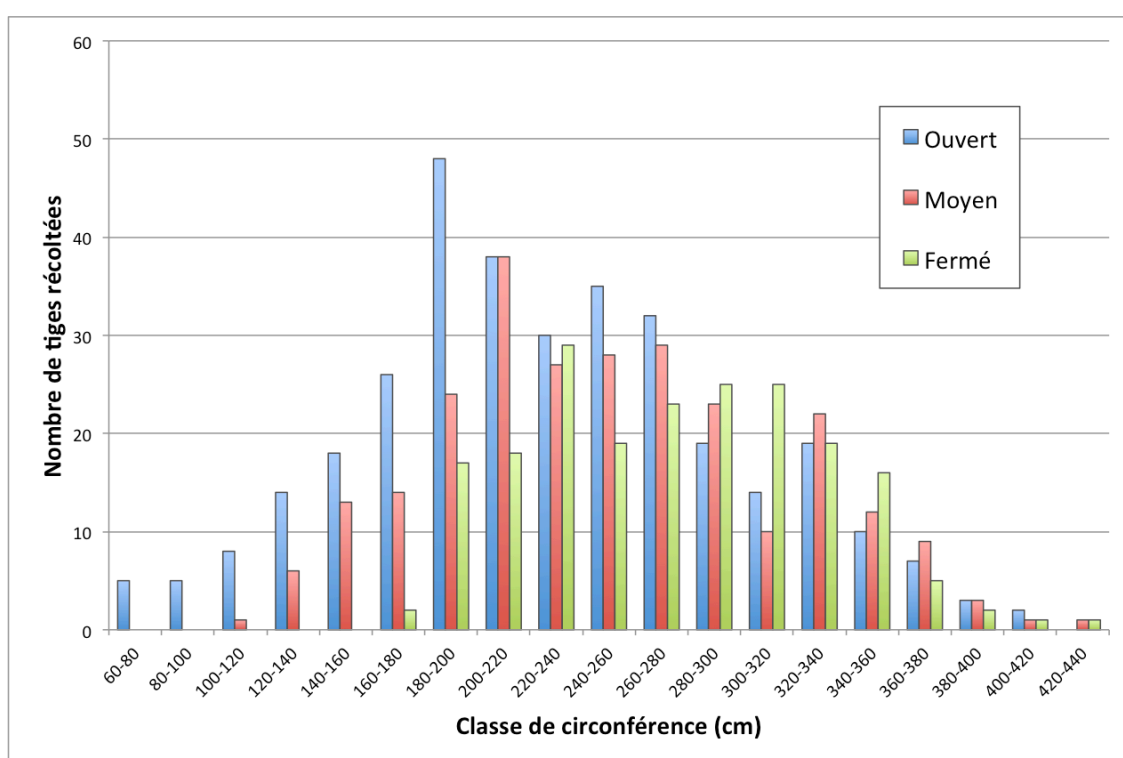


Figure 48

Comparaison de la dimension des bois récoltés au cours
des différents scénarios de Bêchefa

Etant donné que la régénération générée pour les deux premiers peuplements était monospécifique, les indicateurs ayant trait au mélange d'essence n'indiquent rien d'autre que le taux de maintien de la diversité déjà présente à l'inventaire initial. Pour le peuplement de Bêchefa, c'est aussi le cas pour le prélèvement du Hêtre qui n'a pas été régénéré, mais le scénario fermé a aussi une moins forte prépondérance du Douglas et de l'Epicéa, ce qui a laissé plus de place au Sapin. L'indicateur spatial du mélange est également meilleur pour ce scénario, car il est possible que la plus faible taille des ouvertures ait mené à un mélange par pied et moins par plage. L'indice de diversité structurale est bien entendu le plus faible pour les deux scénarios traditionnels, surtout pour la coupe rase régénérée par plantation, mais la sensibilité de l'indice ne semble pas suffisamment forte pour différencier les peuplements irréguliers entre eux. Au niveau de la répartition des couronnes, l'irrégularisation par bandes n'a pas mené à la détection d'une répartition en bouquets, par rapport à la récolte par dimension cible. Pour le peuplement de Bêchefa, les différences dans cet indicateur semblent encore dues à la présence de très gros bois, mais ce n'est pas problématique car ceux-ci jouent effectivement un rôle très important dans la structuration du peuplement, et ils ont tendance à présenter plus de microhabitats favorables à la biodiversité.

Tableau 10 *Synthèse des indices de diversité spécifique et structurale calculés pour les différents scénarios des trois peuplements*

Scénario	Diversité spécifique	Diversité structurale	Répartition des espèces	Répartition des couronnes	Total
Honsfeld					
Traditionnel - Coupe rase	0	0,75	0	0,12	0,87
Traditionnel - Coupes progressives	0	0,81	0	0,19	1
Irrégularisation - Dimension cible	0,03	0,92	0,01	0,30	1,26
Irrégularisation - Bandes	0	0,91	0	0,27	1,18
Buchholtz					
Prélèvement en 1 x	0,07	0,90	0,02	0,31	1,30
Prélèvement en 5 x	0,08	0,91	0,02	0,30	1,31
Prélèvement en 9 x	0,17	0,93	0,06	0,31	1,47
Bêchefa					
Scénario fermé ($G \pm 34$)	0,72	0,96	0,35	0,35	2,38
Scénario moyen ($G \pm 31$)	0,71	0,96	0,30	0,30	2,27
Scénario ouvert ($G \pm 28$)	0,67	0,95	0,28	0,27	2,17

6 Synthèse et conclusion

L'intérêt de la modélisation pour l'expérimentation d'itinéraires sylvicoles a pu être illustré dans le cas d'Honsfeld, où l'application de modalités de coupes variables a mené à des peuplements on ne peut plus contrastés au départ d'une origine commune. Bien entendu, la précision ne peut que diminuer au plus l'horizon de prédiction est lointain, car des biais et approximations inévitables finissent par s'accumuler. L'exemple le plus évident en est le fort déficit de croissance constaté pour la plantation suivant la coupe rase, ce qui montre une fois de plus l'intérêt d'un scénario « contrôle » comparable à des normes documentées. Il reste à déterminer si ce biais est dû aux conditions de croissance particulières de la plantation (faibles densités en pleine lumière), ou s'il touche indifféremment tous les scénarios, ce qui aurait moins d'implications tant que l'on se borne à comparer ceux-ci entre eux. A l'opposé, l'apparition de recrutements massifs dans les scénarios de coupes progressives et coupes par bandes a causé une hausse perceptible de la productivité, dont l'ampleur est fonction de la manière dont cette étape est mise sous contrôle. Finalement, toutes ces incertitudes touchent à la régénération, qui représente encore aujourd'hui un compartiment difficilement quantifiable dans les peuplements irréguliers, malgré son importance capitale. Les valeurs stables obtenues à la fin du scénario de récolte par dimension cible pour l'ensemble des tiges allant de 0 à 15 m, sont de l'ordre de 3 à 4 m² pour environ 2.000 tiges par hectare, soit la densité d'une plantation traditionnelle mais agglomérée sur un peu moins de 60 % de la surface.

Pour comparer les itinéraires réguliers et irréguliers sur le plan économique, Hanewinkel (2001) conclut que les coûts de transformation associés à la période d'irrégularisation doivent être mis en perspective avec les futurs bénéfices perpétuels plus élevés. De la présente analyse économique il ressort en effet que les coûts engagés dans le jeune âge du peuplement tendent à impacter la rentabilité de manière démesurée par rapport aux différences de revenus à l'horizon d'un siècle. Bruciamacchie & de Turckheim (2005) argumentent que la rentabilité d'une futaie irrégulière est supérieure car les travaux y sont moindres, bien que plus techniques, et que les revenus y sont portés par la récolte d'arbres qualitativement supérieurs. Macdonald et al. (2010) nuancent toutefois ce dernier point en soulignant à la fois les incertitudes sur la productivité des futaies résineuses irrégulière, et la plus grande variabilité dans la qualité de leurs produits ligneux. En effet, le bois de qualité produit par des tiges élaguées et éduquées naturellement, pour lesquelles des éclaircies sélectives sont réalisées et

dont le moment de récolte est choisi sur mesure, peut être contrebalancé par des effets de bordure le long des trouées, des cernes gros et irréguliers au gré des ouvertures ou encore une moindre emprise sur la génétique du peuplement. Concernant la comparaison de la séquestration de carbone dans le bois, l'estimation via le stock sur pied s'est révélée insuffisante car extrêmement variable dans le temps pour les peuplements équiennes. Pour une analyse équivalente, la vision doit passer à un stock de carbone croissant avec la productivité, et dont le temps de séjour se prolonge au delà de la vie de l'arbre dans le bois mort ou façonné. De ce fait, si leur productivité est équivalente, il devient plus évident que les peuplements irréguliers séquestrent plus de carbone, par la plus grande durée de croissance des arbres, et par l'éventuelle meilleure qualité du bois qu'ils produisent. Egalement, l'analyse doit s'élargir aux autres compartiments, dont le carbone organique dans le sol qui s'avère décliner en cas de coupe rase, ou de plantation comparativement à la régénération naturelle (Augusto et al., 2019).

Pour le peuplement de Buchholtz, l'enjeu réside dans les gros et très gros Epicéas, dont la récolte est une priorité car elle engendrera de manière certaine des dégâts dans les tiges résiduelles. De plus, leur maintien sur pied accapare une partie de la productivité du peuplement, qui pourrait être redirigée dans des classes de tailles produisant une ressource mieux valorisable. En effet, les scieries résineuses fonctionnent aujourd'hui en maximisant le rendement horaire via des lignes automatisées alliant canters et scies circulaires, qui requièrent des calibres de grumes faibles et normalisés. Au delà de 60 cm de diamètre, les billons nécessitent d'être traités à l'aide d'une scie à ruban dont la cadence inférieure fait chuter de 5 à 10 fois la productivité (Chopard et al, 2013). Historiquement, l'atout des gros bois résidait dans la possibilité d'en tirer de longues pièces de fortes sections, mais aujourd'hui des technologies telles que le lamellé-collé permettent un même résultat au départ de bois de diamètre faible, dont la purge des nœuds permet en plus d'optimiser la résistance finale. En foresterie, les exploitants et scieurs finissent toutefois par s'adapter à la ressource disponible (en l'occurrence la ressource croissante en gros bois résineux), comme en témoigne l'augmentation des diamètres moyens acceptés par les nouvelles têtes d'abattages et canters mis sur le marché (Hermeline & Lavarde, 2020) Ainsi, s'ils ne doivent plus occuper une telle place dans le peuplement futur, des gros bois de qualité peuvent toutefois continuer à y être produits, surtout lorsqu'on prend en compte leur plus-value en termes de stabilité et d'abri pour la biodiversité.

Les trois scénarios de Buchholtz ont donc différé par la vitesse avec laquelle les gros bois ont été prélevés, et de manière générale, les résultats étaient optimaux pour le scénario intermédiaire qui les récolte en cinq fois. Le prélèvement moyen était dès lors de $8,5 \text{ m}^2/\text{ha}/\text{rotation}$, ce qui dépasse la « borne » maximale de $7 \text{ m}^2/\text{ha}/\text{rotation}$ renseignée par Baumeister et al (2020) pour les pessières irrégulières, mais le fait que ces arbres croissent déjà selon des densités assez faibles porte à croire que cela ne portera pas atteinte à la stabilité du peuplement. Toutefois, il faut souligner que le modèle ne tient compte ni des risques de chablis, ni de l'impact d'une mise en lumière brutale sur la qualité des semis. Sur le plan quantitatif, ce scénario intermédiaire est le seul qui permette la continuité et la stabilité dans le temps du recrutement. Dans le scénario de récolte en une fois, l'intensité de la perturbation mène à une oscillation forte et prolongée de la surface terrière du peuplement, du fait de recrutements massifs qui appellent à d'autres éclaircies fortes perpétuant plus qu'il ne le faut le déséquilibre. A l'inverse, un prélèvement trop précautionneux repousse l'échéance du renouvellement du peuplement, en risquant à chaque rotation la destruction des quelques perches durement acquises. Le modèle prévoit que pour ce scénario médian, la récolte par le haut des gros bois mènerait à des produits d'environ 260 à 280 cm de circonférence.

Initialement, le dernier peuplement situé à Bêchefa présente lui aussi beaucoup de très gros bois, qu'il convient de récolter pour ramener la situation vers un équilibre des classes. Au sein du modèle, cette opération a duré environ 50 ans, durant lesquels un passage à la futaie constant et suffisant a nécessité de stabiliser le niveau de matériel sur pied à des valeurs engendrant une luminosité adéquate. Différents niveaux au sein de cette fourchette de possibilités ont permis d'évaluer la capacité du modèle à gérer l'impact du niveau d'éclairement sur la compétition interspécifique au sein de la régénération. Une étude au sein de l'ensemble du dispositif IRRES a déjà montré que les trois espèces modélisées (Epicéa, Douglas et Sapin) semblent croître à des vitesses comparables sous un éclaircissement faible, mais que leur croissance se différencie à la fois avec la hauteur et la mise en lumière (Ligot et al., 2019). Au vu de la dimension des houppiers des arbres composant l'étage dominant du peuplement, même une récolte précautionneuse mènera à des trouées d'une taille conséquente, au sein desquelles le gradient d'éclairement radial devrait permettre à chaque essence de trouver son optimum de croissance. Les résultats obtenus semblent corroborer cette hypothèse, car une récolte plus intense a principalement mené à plus de recrutements, sans pour autant modifier sensiblement la composition spécifique.

Ainsi, si le recrutement au sein des trois scénarios présente une évolution semblable, il n'en suit pas moins pour autant un schéma particulier, portant à croire qu'il est lié à des phénomènes intrinsèques au modèle. En effet, le caractère systématique de la germination et de la croissance en fonction de l'éclairement fait que le recrutement est toujours monospécifique au sein d'une cellule de sol. Ce déterminisme lié à la luminosité prend une importance qui rendrait difficile la croissance simultanée d'essences supplémentaires, sans caricaturer d'autant plus les tolérances à l'ombrage. De plus, d'autres facteurs déterminants pour la compétition ne sont pas pris en compte par le modèle, tels que la pression des ongulés ou l'envahissement constaté localement par le Tsuga (indépendamment des conditions lumineuses). Toutes ces incertitudes soulignent la difficulté de modéliser le compartiment complexe qu'est la régénération mélangée, et rendent dès lors hypothétiques les compositions spécifiques obtenues pour les peuplements futurs. Au delà de la modélisation, le mélange d'essence et le maintien de celui-ci ajoute une complexité certaine à la gestion des peuplements irréguliers. Heureusement, l'observation réelle des dynamiques dans le jeune âge permet une gestion fine de la compétition via des travaux simples de réalisation, tant que ceux-ci sont réalisés au moment opportun, et que les essences souhaitées sont présentes.

Pour conclure, l'intérêt du modèle HETEROFOR pour la compréhension des pessières irrégulières et mélangées a pu être démontré, du fait de la diversité de cas qu'il est capable de gérer et de l'exhaustivité des résultats fournis. En modélisation, l'analyse critique des résultats suite à une mise en pratique permet de déceler les points qui nécessitent des améliorations, et d'ouvrir des pistes sur comment celles-ci peuvent être apportées. Dans les trois cas traités, la régénération s'est avérée être le compartiment où la plus grande part d'incertitude demeure, alors qu'elle constitue en futaie irrégulière le socle sans lequel le futur du peuplement ne peut être anticipé. Le monitoring de la régénération au sein du dispositif IRRES permettra à l'avenir de vérifier la bonne calibration de la croissance des différentes espèces, mais la diversité des situations de blocage pouvant être rencontrées (stationnelles, génétiques, cynégétiques, sanitaires), nécessitera d'adapter la simulation au cas par cas. Parmi les autres améliorations possibles, on pourrait citer une prise en compte des dégâts d'exploitation inévitables en traitement irrégulier, ou encore de la qualité des tiges qui permettrait de moduler individuellement les dimensions optimales d'exploitabilité ainsi que les prix. Pour finir, l'utilisation du modèle pour la réalisation de prédictions économiques poussées nécessiterait une estimation bien plus fine des coûts et revenus, bien que le futur marché du bois restera toujours entaché d'incertitudes, au même titre que les projections climatiques.

7 Références bibliographiques

- Alderweireld M., Burnay F., Pitchugin M., Lecomte H. (2015). *Inventaire Forestier Wallon. Résultats 1994-2012*. SPW, DGO3, DNF, Direction des Ressources forestières, Jambes, 236 p.
- Ameztegui, A., & Coll, L. (2013). *Unraveling the role of light and biotic interactions on seedling performance of four pyrenean species along environmental gradients*. Forest Ecology and Management, n°303, p 25-34.
- André, F., de Wergifosse, L., & Jonard, M. (2019). *Amélioration des itinéraires sylvicoles pour une foresterie durable dans un environnement changeant*. Forêt Nature, n°152, p 44-51.
- Annighöfer, P., Petritan, A. M., Petritan, I. C., & Ammer, C. (2017). *Disentangling juvenile growth strategies of three shade-tolerant temperate forest tree species responding to a light gradient*. Forest Ecology and Management, n°391, p 115-126.
- Augusto, L., Saint-André, L., Bureau, F., Derrien, D., Pousse, N., & Cécillon, L. (2019). *Séquestration de carbone organique dans les sols forestiers : impacts de la gestion sylvicole*. Forêt entreprise. n°245, p 62-66
- Baar F. (2005). *Alternative à la futaie régulière monospécifique, ou comment transformer une pessière en peuplement irrégulier mélangé plus proche de la nature ?* Forêt Wallonne, n° 77, p 37-53.
- Baar F. (2013). *Le martelage en futaie irrégulière feuillue ou résineuse*. SPW-DGO3-DGARNE/Forêt Wallonne. 60 p.
- Baumeister, M., Lechine, P., Cacot, D., Sylvestre, P., Riou Nivert, P., (2020). *Fiches itinéraires techniques par essence : L'Epicéa commun*. Centre National de la Propriété Forestière. 6 p.
- Boden, S., Kahle, H., Wilpert, K. v., & Spiecker, H. (2014). *Resilience of norway spruce (picea abies (L.) karst) growth to changing climatic conditions in southwest germany*. Forest Ecology and Management, n° 315, p 12-21.
- Boldrini, S., (2011). *Le secteur du sciage en Belgique. Besoins en matière première et production*. Fédération nationale des scieries. 36 p.
- Bruciamacchie, M., & de Turckheim, B. (2005). *La futaie irrégulière: Théorie et pratique de la sylviculture irrégulière, continue et proche de la nature*. Édisud. 284 p.
- Brūna, L., Kļaviņa, D., Korhonen, K., Zaļuma, A., Burņeviča, N., & Gaitnieks, T. (2019). *Effect of soil properties on the spread of heterobasidion root rot*. Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B, Natural Sciences, n°73(6), p 466-471.
- Chalayer, M. (2015). *Le sciage du gros bois résineux, héritage du passé ou technique d'avenir ?* Forêt-entreprise, n°224, p 37-40.

Chopard, B., Deleuze, C., François, D., Collet, R., Boudey, A., Moureau, T., Fenart, P., & Lanvin J. D., (2013). *Comprendre et objectiver les attentes des scieurs résineux industriels*. Rendez-Vous Techniques de l'ONF n° 39-40, p 13-21.

Claessens, H., Lecomte, H., Lejeune, P., & Rondeux, J. (2001). *Plante-t-on l'épicéa n'importe où ? L'apport d'une analyse objective de la pessière wallonne*. Forêt Wallonne n°49-50, p 45-51.

Courbaud, B., de Coligny, F., & Cordonnier, T. (2003). *Simulating radiation distribution in a heterogeneous norway spruce forest on a slope*. Agricultural and Forest Meteorology, n°116(1), p 1-18.

De Vos, B., Cools, N., Ilvesniemi, H., Vesterdal, L., Vanguelova, E., & Carnicelli, S. (2015). *Benchmark values for forest soil carbon stocks in europe: Results from a large scale forest soil survey*. Geoderma, n°251-252, p 33-46.

de Wergifosse, L., André, F., Beudez, N., de Coligny, F., Goosse, H., Jonard, F., Ponette, Q., Titeux, H., Vincke, C., & Jonard, M. (2020). *HETEROFOR 1.0: A spatially explicit model for exploring the response of structurally complex forests to uncertain future conditions – Part 2: Phenology and water cycle*. Geoscientific Model Development, n°13(3), p 1459-1498.

Dufour-Kowalski, S., Courbaud, B., Dreyfus, P., Meredieu, C. & de Coligny, F. (2012). *Capsis: An open software framework and community for forest growth modelling*. Annals of Forest Science, n°69(2), p 221-233.

Dufrene, E., Davi, H., Francois, C., Le Maire, G., Le Dantec, V., & Granier, A. (2005). *Modelling carbon and water cycles in a beech forest. part I : Model description and uncertainty analysis on modelled NEE*. Ecological Modelling, n°185(2-4), p 407-436.

Dutcă, I. (2018). *Biomass data for young, planted norway spruce (picea abies (L.) karst.) trees in eastern carpathians of romania*. Data in Brief, n°19, p 2384-2392.

Edwards, D., Jay, M., Jensen, F. S., Lucas, B., Marzano, M., Montagné, C., Peace, A., & Weiss, G. (2012). *Public preferences for structural attributes of forests: Towards a pan-european perspective*. Forest Policy and Economics, n° 19, p 12-19.

Falster, D. S., Duursma, R. A., Ishihara, M. I., Barneche, D. R., FitzJohn, R. G., Vårhammar, A., Aiba, M., Ando, M., Anten, N., Aspinwall, M. J., Baltzer, J. L., Baraloto, C., Battaglia, M., Battles, J. J., Bond-Lamberty, B., van Breugel, M., Camac, J., Claveau, Y., Coll, L., . . . York, R. A. (2015). *BAAD: A biomass and allometry database for woody plants*. Ecology (Durham), n°96(5), p 1445-1445.

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, n°396, p 160-175.

Genet, H., Bréda, N., & Dufrêne, E. (2010). *Age-related variation in carbon allocation at tree and stand scales in beech (fagus sylvatica L.) and sessile oak (quercus petraea (matt.) Liebl.) using a chronosequence approach*. Tree Physiology, n°30(2), p. 177-192.

GIEC. (2014) *Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]*. GIEC, Genève, Suisse, 161 p.

Hanewinkel, M. (2001). *Economic aspects of the transformation from even-aged pure stands of norway spruce to uneven-aged mixed stands of norway spruce and beech*. Forest Ecology and Management, n°151(1), p. 181-193.

Hanewinkel, M., Frutig, F., & Lemm, R. (2014). *Economic performance of uneven-aged forests analysed with annuities*. Forestry (London), n°87(1), p. 49-60.

Henin, J., Lesire, C., Pollet, C., Hebert, J., & Jourez, B. (2019). *Épicéas scolytés : Impacts du bleuissement sur les caractéristiques de son bois et sa valorisation industrielle*. Forêt.Nature , n° 150, p 31-41.

Hermeline, M., & Lavarde, F. (2020). *Rapport n° 1130 - La valorisation des gros bois* Ministère de l'agriculture et de l'alimentation – CGAAER, 98 p.

Jactel, H., & Bockerhoff, E. G. (2007). *Tree diversity reduces herbivory by forest insects*. Ecology Letters, n°10(9), p 835-848.

Jaehne, S., & Dohrenbusch, A., (1997). *Ein Verfahren zur Beurteilung der Bestandesdiversität (A method to evaluate forest stand diversity)*. Forstwissenschaftliches Centralblatt, n°116, p. 333-345.

Jagodziński, A. M., Dyderski, M. K., Gęsikiewicz, K., & Horodecki, P. (2019). *Tree and stand level estimations of abies alba mill. aboveground biomass*. Annals of Forest Science., n°76(2), p 1-14.

Jagodziński, A. M., Dyderski, M. K., & Horodecki, P. (2020). *Differences in biomass production and carbon sequestration between highland and lowland stands of picea abies (L.) H. karst. and fagus sylvatica L.* Forest Ecology and Management, n°474, 118329.

Jakoby, O., Lischke, H., & Wermelinger, B. (2019). *Climate change alters elevational phenology patterns of the european spruce bark beetle (ips typographus)*. Global Change Biology, n° 25(12), p 4048-4063.

Jonard, M., André, F., de Coligny, F., de Wergifosse, L., Beudez, N., Davi, H., Ligot, G., Ponette, Q., & Vincke, C. (2020). *HETEROFOR 1.0: A spatially explicit model for exploring the response of structurally complex forests to uncertain future conditions – Part 1: Carbon fluxes and tree dimensional growth*. Geoscientific Model Development, n°13(3), p 905-935.

Kühne, C., Bauhus, J., Hörnig, T., & Oh, S. (2011). *Ein uss von Überschirmung, Dichtstand und P anzengröße auf die Wurzelentwicklung natürlich verjüngter Douglasien*. Forstarchiv, n°82, p 184-194.

Leuschner, C., & Meier, I. C. (2018). *The ecology of central european tree species: Trait spectra, functional trade-offs, and ecological classification of adult trees*. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, n°33, p. 89-103.

Ligot, G., Balandier, P., Courbaud, B., Jonard, M., Kneeshaw, D., & Claessens, H. (2015). *Dosage de la lumière pour maintenir la coexistence d'espèces d'ombre et de demi-ombre dans la régénération de la futaie irrégulière*. Revue Forestière Française, n°3, p 195-211.

Ligot, G., Balandier, P., Schmitz, S., & Claessens, H. (2020). *Transforming even-aged coniferous stands to multi-aged stands: An opportunity to increase tree species diversity?* Forestry (London), n°93(5), p 616-629.

Liocourt, F. (1898) *De l'aménagement des sapinières*. Bulletin de la société forestière, n°6, p369-405.

Longuetaud, F., Rivoire, M., Santenoise, P., Mothe, F., Caraglio, Y., & Deleuze, C. (2014). *Mesures de volume, biomasse, minéralomasse : Peut-on généraliser par groupes d'essences de même architecture et structure interne ?* Rendez-Vous Techniques De l'ONF, n°44, p. 18-21.

Lu, H., Condés, S., del Río, M., Goudiaby, V., den Ouden, J., Mohren, G. M. J., Schelhaas, M., de Waal, R., & Sterck, F. J. (2018). *Species and soil effects on overyielding of tree species mixtures in the netherlands*. Forest Ecology and Management, n°409, p 105-118.

Lundmark, T., Bergh, J., Nordin, A., Fahlvik, N., & Poudel, B. C. (2016). *Comparison of carbon balances between continuous-cover and clear-cut forestry in sweden*. Ambio, n°45(S2), p 203-213.

Meilby, H., & Nord-Larsen, T. (2012). *Spatially explicit determination of individual tree target diameters in beech*. Forest Ecology and Management, n°270, p 291-301.

Mohr, C. H., Coppus, R., Iroumé, A., Huber, A., & Bronstert, A. (2013). *Runoff generation and soil erosion processes after clear cutting*. Journal of Geophysical Research. Earth Surface, n° 118(2), p 814-831.

Moss, R., Babiker, M., Brinkman, S., Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J., Elgizouli, I., Emori, S., Erda, L., Hibbard, K., Jones, R., Kainuma, M., Kelleher, J., Lamarque, J.F., Manning, M., Matthews, B., Meehl, J., Meyer, L., Mitchell, J., Nakicenovic, N., O'Neill, B., Pichs, R., Riahi, K., Rose, S., Runci, P., Stouffer, R., van Vuuren, D., Weyant, J., Wilbanks, T., van Ypersele, J.P. & Zurek, M. (2008). *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Genève, 132 p.

Nilsson, U., Gemmel, P., Johansson, U., Karlsson, M., & Welander, T. (2002). *Natural regeneration of norway spruce, scots pine and birch under norway spruce shelterwoods of varying densities on a mesic-dry site in southern sweden*. Forest Ecology and Management, n°161(1), p 133-145.

OEWB. (2019). *PanoraBois Wallonie Edition 2019*. Marche-en-Famenne, Office Economique Wallon du Bois, 104 p.

Perin, J., Hebert, J., Lejeune, P., & Claessens, H. (2016). *De nouvelles normes sylvicoles pour les futaies pures équiennes d'épicéa et de douglas en appui à la gestion de la forêt publique en wallonie*. Forêt.Nature , n° 129, p 57-67.

Petrișan, A. M., von Lüpke, B. & Petrișan, I. C. (2009). *Influence of light availability on growth, leaf morphology and plant architecture of beech (fagus sylvatica L.), maple (acer pseudoplatanus L.) and ash (fraxinus excelsior L.) saplings*. European Journal of Forest Research, n°128(1), p 61-74.

Petrișan, I. C., von Lüpke, B., & Petrișan, A. M. (2011). *Effects of root trenching of overstorey norway spruce (picea abies) on growth and biomass of underplanted beech (fagus sylvatica) and douglas fir (pseudotsuga menziesii) saplings*. European Journal of Forest Research, n°130(5), p 813-828.

Peura, M., Burgas, D., Eyvindson, K., Repo, A., & Mönkkönen, M. (2018). *Continuous cover forestry is a cost-efficient tool to increase multifunctionality of boreal production forests in fennoscandia*. Biological Conservation, n°217, p 104-112.

Portsmouth, A., & Niinemets, Ü. (2006). *Interacting controls by light availability and nutrient supply on biomass allocation and growth of betula pendula and B. pubescens seedlings*. Forest Ecology and Management, n°227(1), p 122-134.

Pretzsch, H., & Biber, P. (2016). *Tree species mixing can increase maximum stand density*. Canadian Journal of Forest Research, n°46(10), p 1179-1193.

Pretzsch, H., & Zenner, E. K. (2017). *Toward managing mixed-species stands: From parametrization to prescription*. Forest Ecosystems, n°4(1), p 1-17.

Pukkala, T. (2014). *Does biofuel harvesting and continuous cover management increase carbon sequestration?* Forest Policy and Economics, n°43, p 41-50.

Pukkala, T., Laiho, O., & Lähde, E. (2016). *Continuous cover management reduces wind damage*. Forest Ecology and Management, n°372, p 120-127.

Pykälä, J. (2004). *Immediate increase in plant species richness after clear-cutting of boreal herb-rich forests*. Applied Vegetation Science, n° 7(1), p 29-34.

Richards, A. E., Forrester, D. I., Bauhus, J., & Scherer-Lorenzen, M. (2010). *The influence of mixed tree plantations on the nutrition of individual species: A review*. Tree Physiology, n°30(9), p 1192-1208.

Rondeux J. (1993) *La mesure des arbres et des peuplements forestiers*. Presses agronomiques de Gembloux. 521 p.

Rosén, K., Aronson, J., & Eriksson, H. M. (1996). *Effects of clear-cutting on streamwater quality in forest catchments in central sweden*. Forest Ecology and Management, n° 83(3), p 237-244.

Ryelandt, B. (2019). *Modeling oak and beech regeneration in mixed and uneven-aged forests : a process-based approach for changing environments [Mémoire non publié]*. UCLouvain, 59 p.

Sanchez C. (2012). *Synthèse des méthodes d'irrégularisation des pessières pour la Wallonie : Vers une sylviculture durable, des écosystèmes diversifiés et des revenus soutenus*. Forêt Wallonne asbl, 48 p.

Sanchez C. (2013). *La sylviculture Pro Silva en Wallonie : mesures et recommandations du DNF - document en complément à la circulaire n° 2718 du 24.09.2013 relative aux mesures sylvicoles à suivre pour une gestion selon la sylviculture Pro Silva*. Forêt Wallonne – SPW, 60p.

Schall, P., Lödige, C., Beck, M., & Ammer, C. (2012). *Biomass allocation to roots and shoots is more sensitive to shade and drought in european beech than in norway spruce seedlings*. Forest Ecology and Management, n°266, p 246-253.

Schall, P., Gossner, M. M., Heinrichs, S., Fischer, M., Boch, S., Prati, D., Jung, K., Baumgartner, V., Blaser, S., Böhm, S., Buscot, F., Daniel, R., Goldmann, K., Kaiser, K., Kahl, T., Lange, M., Müller, J., Overmann, J., Renner, S. C., ... Mori, A. (2018). *The impact of even-aged and uneven-aged forest management on regional biodiversity of multiple taxa in european beech forests*. The Journal of Applied Ecology, n°55(1), p 267-278.

Schepaschenko, D., Shvidenko, A., Usoltsev, V., Lakyda, P., Luo, Y., Vasylyshyn, R., Lakyda, I., Myklush, Y., See, L., McCallum, I., Fritz, S., Kraxner, F., & Obersteiner, M. (2017). *A dataset of forest biomass structure for eurasia*. Scientific Data, n°4(1), 170070-170070.

Tallier P. A. (1996). *Forêts et propriétaires forestiers en belgique, 1814-1914: Histoire de l'évolution de la superficie forestière, des peuplements, des techniques sylvicoles et des débouchés offerts aux produits ligneux (Thèse de doctorat)* Université libre de Bruxelles, Faculté de Philosophie et Lettres, Bruxelles. 433 p.

Tan, J. Y., Wainhouse, D., Day, K. R., & Morgan, G. (2010). *Flight ability and reproductive development in newly-emerged pine weevil hylobius abietis and the potential effects of climate change*. Agricultural and Forest Entomology, n° 12(4), p 427-434.

U.S.D.A. (1951) *Soil Survey Manual*. United States Department of Agriculture, Manuel n°18, Washington D.C., 503 p.

Vejpustková, M., & Čihák, T. (2019). *Climate response of douglas fir reveals recently increased sensitivity to drought stress in central europe*. Forests, n°10(2), 17 p.

Veullen, L., Malabeux, L., Riond, C., Cornevin, D. (2020) *Le travail du sol en montagne : Enjeux, expérimentations passées et pratiques actuelles*. ONF – RenDez-Vous techniques, n°67-68, p 16-21.

Vitali, V., Forrester, D. I., & Bauhus, J. (2018). *Know your neighbours: Drought response of norway spruce, silver fir and douglas fir in mixed forests depends on species identity and diversity of tree neighbourhoods*. *Ecosystems*, n°21(6), p 1215-1229.

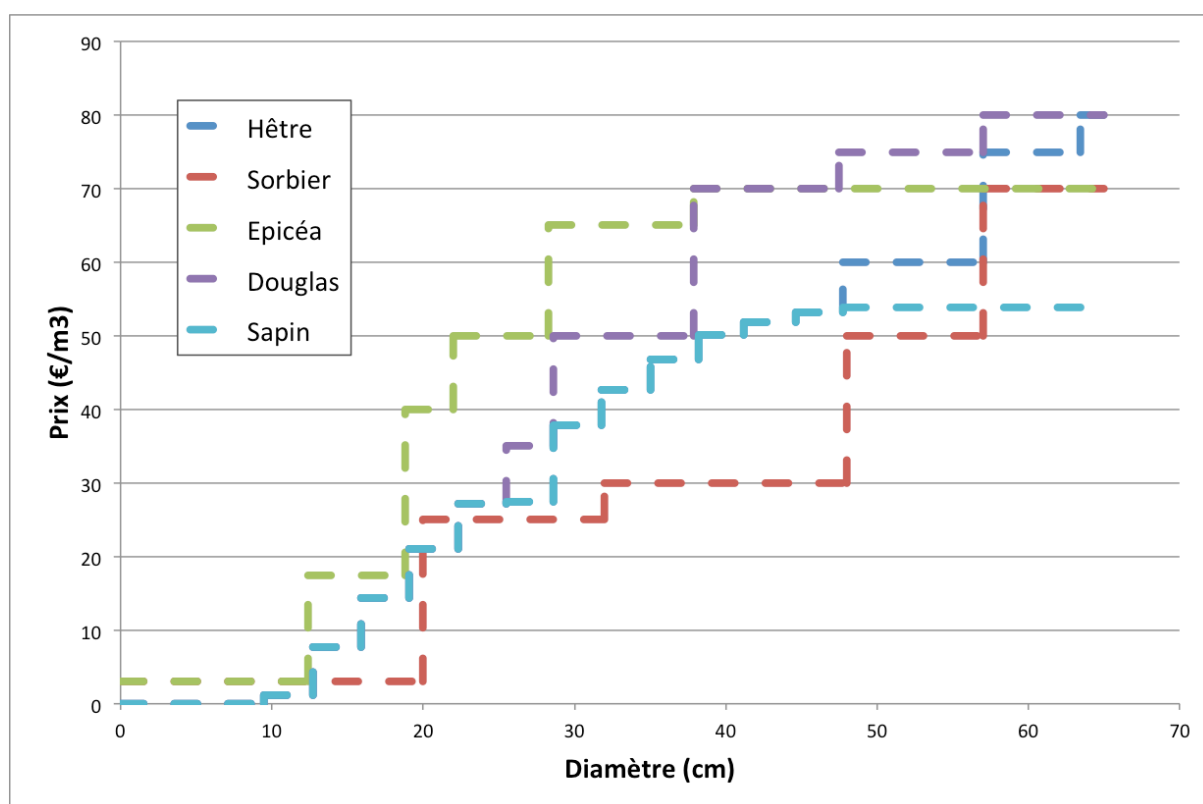
Wilson, E., San Martin, G., & Ligot, G. (2020). *The douglas fir needle midge (contarinia pseudotsugae) A potential threat to douglas fir in the united kingdom and ireland?* *Royal Forestry Society*, n°114(4), p 244-250.

Xu, Y., Röhrig, E., & Fölster, H. (1997). *Reaction of root systems of grand fir (abies grandis lindl.) and norway spruce (picea abies karst.) to seasonal waterlogging*. *Forest Ecology and Management*, n° 93(1), p 9-19.

Zeng, H., Peltola, H., Talkkari, A., Venäläinen, A., Strandman, H., Kellomäki, S., & Wang, K. (2004). *Influence of clear-cutting on the risk of wind damage at forest edges*. *Forest Ecology and Management*, n° 203(1), p 77-88.

8. Annexes

Annexe 1 : Evolution des prix de vente des différentes essences avec le diamètre



Annexe 2 : Tarification appliquée pour les différents travaux sylvicoles

Intervention	Prix (€/ha)	Détail
Plantation	3.500	
Dégagement	700	Trois fois pendant les six ans qui suivent la plantation
Eclaircie	200	Comprend le prix du martelage, mais pas de l'exploitation ni de la vidange
Elagage en plein	1500	
Jardinage	240 - 275	Comprend un martelage et l'élagage de 8 à 15 tiges par hectare (5 €/tige)
Exploitation complexe	variable	Décote de 10 % sur le prix du bois lorsque celui-ci doit être récolté en peuplement irrégulier
Casse	variable	Fixée au revenu issu de l'éclaircie, pour l'annuler

Annexe 3 : Valeurs obtenues et tests statistiques pour la paramétrisation de la relation $Dbh = a + b \cdot d_{collet}$

Dbh = a + b. d _{collet}						
Espèce	Paramètres	n	Intercepte [I.C.]	Pente [I.C.]	Erreur absolue moyenne	t- test R ²
Chêne pédonculé	a = -0.166 b = 0.627	987	[-0.119 ; -0.040]	[1.030 ; 1.099]	0.193	1 0.852
Hêtre	a = -0.349 b = 0.695	1153	[-0.169 ; -0.082]	[1.059 ; 1.127]	0.207	1 0.894
Charme	a = -0.430 b = 0.678	294	[-0.150 ; -0.056]	[1.066 ; 1.181]	0.174	1 0.945
Bouleau verruqueux	a = -0.326 b = 0.703	77	[-0.172 ; 0.122]	[0.931 ; 1.090]	0.248	0.990 0.978
Épicéa commun	a = -0.681 b = 0.789					
Douglas	a = -0.681 b = 0.789					
Pin sylvestre	a = -0.500 b = 0.830					
Sapin pectiné	a = -0.681 b = 0.789	25	[-0.270 ; 0.653]	[0.885 ; 1.049]	0.420	1 0.950
Erable sycomore	a = -0.132 b = 0.882	184	[-0.030 ; 0.308]	[0.942 ; 1.013]	0.387	1 0.972
Mélèze du Japon	a = -0.500 b = 0.830	37	[-0.185 ; 0.220]	[0.974 ; 1.033]	0.277	0.994 0.991
Chêne rouge	a = -0.529 b = 0.804	32	[-0.108 ; 0.249]	[0.958 ; 1.022]	0.344	0.874 0.984
Frêne	a = -0.717 b = 0.889	25	[-0.739 ; 0.298]	[0.935 ; 1.146]	0.274	0.990 0.962

Annexe 4 : Valeurs obtenues et tests statistiques pour la paramétrisation de la relation $R_{\text{couronne}_{\text{max}}} = a + b \cdot \text{Hauteur}$

Rcouronne _{max} = a + b.Hauteur									
Espèce	Paramètres régression	Rc max	Paramètres Rc max	n	Intercepte [I.C.]	Pente [I.C.]	Erreur absolue moyenne	t- test	R ²
Chêne pédonculé	a = 0 (fixé) b = 0.182	x 1.8	a = 0 (fixé) b = 0.328	319	[-77.23 ; -54.63]	[1.320 ; 1.562]	69.081	1	0.747
Hêtre	a = 9.169 b = 0.160	x 1.7	a = 15.587 b = 0.272	707	[-75.22 ; -47.88]	[1.231 ; 1.381]	66.766	1	0.540
Charme	a = 0 (fixé) b = 0.232	x 1.8	a = 0 (fixé) b = 0.418	71	[-74.40 ; 49.82]	[0.813 ; 1.244]	90.496	1	0.375
Bouleau verruqueux	a = 15.684 b = 0.150	x 1.5	a = 23.526 b = 0.225	51	[-29.04 ; 16.23]	[0.791 ; 1.329]	23.404	1	0.709
Epicéa commun	a = 58.243 b = 0.053	x 1.4	a = 81.540 b = 0.074	452	[-87.76 ; -49.31]	[1.412 ; 1.742]	27.026	0.914	0.381
Douglas	a = 33.561 b = 0.130	x 1.3	a = 42.629 b = 0.169	146	[-25.94 ; -5.248]	[1.021 ; 1.150]	27.697	1	0.846
Pin sylvestre	a = 0 (fixé) b = 0.099	x 1.8	a = 0 (fixé) b = 0.178	1908	[-18.72 ; -5.800]	[1.049 ; 1.199]	37.459	1	0.371
Sapin pectiné	a = 28.817 b = 0.060	x 1.4	a = 40.344 b = 0.084	126	[-32.96 ; -8.870]	[1.108 ; 1.397]	17.773	0.934	0.677
Erable sycomore	a = 7.676 b = 0.131	x 1.5	a = 11.514 b = 0.196	218	[-16.65 ; -0.198]	[0.987 ; 1.166]	22.950	1	0.714
Mélèze du Japon	a = 28.432 b = 0.187	x 1.4	a = 39.805 b = 0.262	38	[-28.44 ; 15.09]	[0.869 ; 1.207]	22.877	1	0.783
Chêne rouge	a = 1.011 b = 0.323	x 1.4	a = 1.416 b = 0.452	36	[-56.80 ; 6.080]	[0.858 ; 1.288]	50.550	0.883	0.734
Frêne	a = 0 (fixé) b = 0.180	x 1.4	a = 0 (fixé) b = 0.252	122	[-25.49 ; -3.483]	[0.992 ; 1.360]	19.631	1	0.834

Annexe 5 : Valeurs obtenues et tests statistiques pour la paramétrisation de la relation Biomasse = a. (d_{collet}²·H)^(b)

Biomasse = a. (d _{collect} ² .H) ^(b)							
Espèce	Paramètres	n	Intercepte [I.C.]	Pente [I.C.]	Erreur absolue moyenne	t-test	R ²
Chêne pédonculé	a = 0.1175	17	[-3537 ; 14592]	[0.827 ; 1.310]	11906.52	1	0.958
Hêtre	a = 0.136	366	[-5069 ; -1684]	[1.001 ; 1.088]	7818.636	1	0.982
Bouleau verruqueux	a = 0.1039	198	[-403 ; -32]	[0.951 ; 1.118]	560.881	1	0.987
Épicéa commun	a = 0.1079	822	[262 ; 942]	[0.944 ; 1.007]	4125.425	1	0.949
Douglas	a = 0.1068	211	[46 ; 688]	[0.752 ; 1.178]	1265.977	1	0.971
Pin sylvestre	a = 0.116	1988	[-7410 ; -2784]	[1.074 ; 1.244]	5340.326	1	0.948
Sapin pectiné	a = 0.1009	76	[-5084 ; 3742]	[0.818 ; 1.187]	9001.844	1	0.895
Erable sycomore	a = 0.371 b = 0.895	76	[-8.130 ; 6.900]	[0.935 ; 1.042]	28.091	0.494	0.977
Mélèze du Japon	a = 0.1226	51	[-1383 ; 1776]	[0.948 ; 1.028]	3800.246	1	0.987
Chêne rouge	a = 0.1824	172	[-21617 ; -4919]	[1.003 ; 1.189]	20687.22	1	0.967
Frêne	a = 0.1815	45	[12 ; 36]	[0.924 ; 1.002]	44.533	1	0.989

Annexe 6 : Valeurs obtenues et tests statistiques pour la paramétrisation de la relation Biomasse foliaire = a. d_{collet}^b

Biomasse foliaire = a. d _{collet} ^b						
Espèce	Paramètres	n	Intercepte [I.C.]	Pente [I.C.]	Erreur absolue moyenne	t- test
Chêne pédonculé	a = 4.795 b = 2.030	17	[-85.78 ; 157.66]	[0.826 ; 1.149]	230.742	0.874
Hêtre	a = 9.811 b = 1.895	112	[-217 ; -8.449]	[0.729 ; 1.123]	211.913	0.011
Bouleau verruqueux	a = 7.040 b = 2.003	198	[-62.58 ; -10.65]	[0.935 ; 1.232]	83.784	0.423
Epicea commun	a = 39.664 b = 1.737	920	[-767 ; -375]	[1.085 ; 1.230]	1441.1	0.557
Douglas	a = 15.312 b = 2.088	250	[-267 ; 46]	[0.803 ; 1.179]	443.321	0.400
Pin sylvestre	a = 12.967 b = 1.967	2738	[-430 ; 30]	[0.980 ; 1.208]	1080.578	0.334
Sapin pectiné	a = 106.601 b = 1.394	151	[-925 ; -203]	[1.013 ; 1.295]	1120.394	0.852
Erable sycomore	a = 8.993 b = 2.098	84	[-3.060 ; 2.792]	[0.871 ; 1.127]	8.863	0.812
Mélèze du Japon	a = 48.979 b = 1.452	51	[-1251 ; -64]	[1.013 ; 1.478]	752.879	0.978
Chêne rouge	a = 6.203 b = 2.107	73	[-90.07 ; 6.777]	[0.772 ; 1.421]	110.994	0.772
Frêne	a = 12.654 b = 2.098	90	[-6.974 ; 1.476]	[0.910 ; 1.124]	15.672	0.581

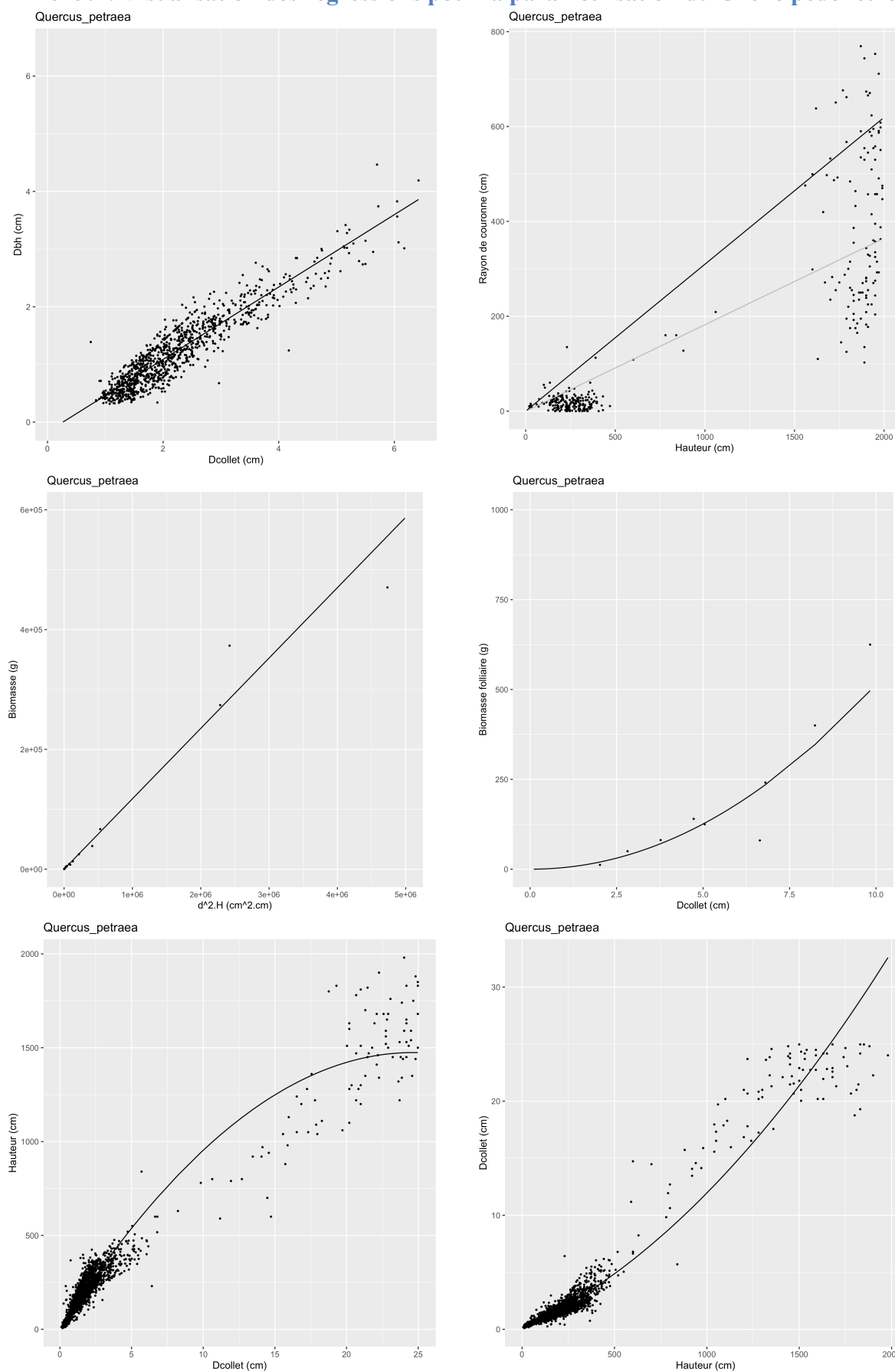
Annexe 7 : Valeurs obtenues et tests statistiques pour la paramétrisation de la relation Hauteur = a + b. d_{collet} + c. d_{collet}²

Hauteur = a + b. d _{collet} + c. d _{collet} ²						
Espèce	Paramètres	n	Intercepte [I.C.]	Pente [I.C.]	Erreur absolue moyenne	t- test R ²
Chêne pédonculé	a = 0.073 b = 119.649 c = -2.427	1808	[-9.410 ; 3.304]	[0.982 ; 1.049]	43.771	1 0.936
Hêtre	a = 36.177 b = 97.252 c = -1.266	3670	[-41.04 ; -29.68]	[1.036 ; 1.055]	127.482	1 0.909
Charme	a = 26.538 b = 103.856 c = -1.636	769	[-4.754 ; 7.930]	[0.968 ; 1.028]	67.246	0.739 0.918
Bouleau verruqueux	a = -12.072 b = 132.328 c = -2.422	330	[-1.421 ; 10.16]	[0.880 ; 1.013]	29.917	0.183 0.949
Epicéa commun	a = -16.854 b = 64.713 c = 0.624	1070	[-31.68 ; -17.31]	[1.023 ; 1.073]	87.260	1 0.906
Douglas	a = 40.138 b = 43.967 c = 0.307	273	[-33.83 ; 1.086]	[0.986 ; 1.164]	40.413	1 0.890
Pin sylvestre	a = -9.125 b = 100.668 c = -1.393	3185	[-141.7 ; -110.3]	[1.119 ; 1.158]	184.169	0.952 0.766
Sapin pectiné	a = -9.800 b = 57.390 c = 1.288	426	[-26.92 ; -9.159]	[1.005 ; 1.105]	69.793	1 0.890
Erable sycomore	a = -24.356 b = 160.188 c = -3.436	675	[-1.061 ; 10.86]	[0.966 ; 1.008]	77.743	0.859 0.935
Mélèze du Japon	a = 50.351 b = 97.309 c = -1.579	74	[-138.8 ; -2.025]	[0.986 ; 1.181]	116.331	0.984 0.846
Chêne rouge	a = -31.813 b = 129.410 c = -2.292	117	[-16.26 ; 0.508]	[0.972 ; 1.072]	52.517	1 0.961
Frêne	a = 35.610 b = 151.331 c = -3.223	122	[-57.25 ; 1.123]	[0.973 ; 1.143]	57.062	0.874 0.919

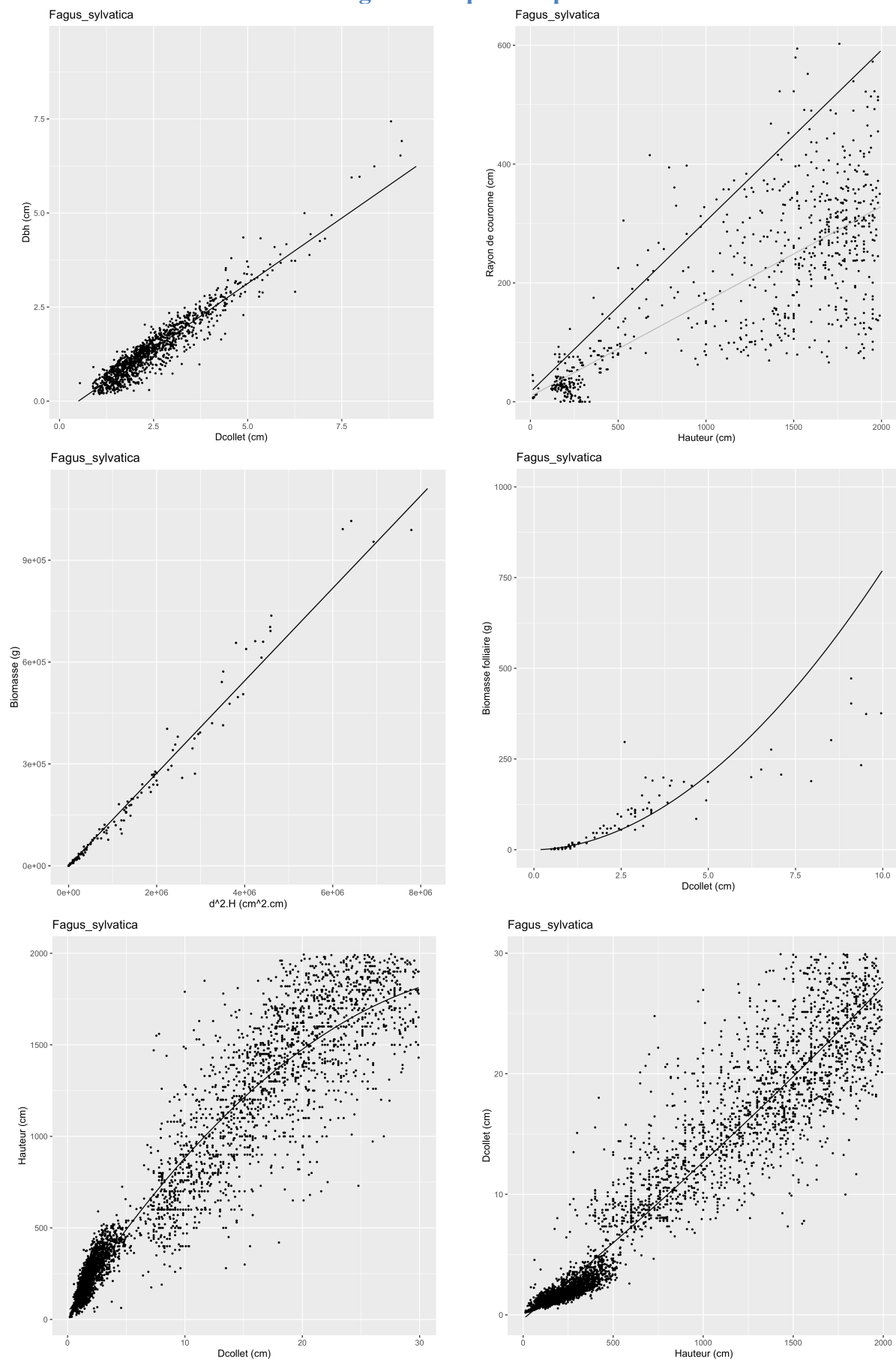
Annexe 8 : Valeurs obtenues et tests statistiques pour la paramétrisation de la relation $d_{collet} = a + b.Hauteur + c.Hauteur^2$

$d_{collet} = a + b.Hauteur + c.Hauteur^2$						
Espèce	Paramètres	n	Intercepte [I.C.]	Pente [I.C.]	Erreur absolue moyenne	t- test R ²
Chêne pédonculé	a = 1.184e-01 b = 7.180e-03 c = 4.655e-06	1808	[-0.120 ; 0.028]	[0.971 ; 1.060]	0.478	1 0.940
Hêtre	a = -3.379e-01 b = 1.223e-02 c = 7.792e-07	3670	[-0.609 ; -0.450]	[1.041 ; 1.066]	1.917	1 0.897
Charme	a = -1.591e-01 b = 9.743e-03 c = 1.593e-06	769	[-0.283 ; -0.131]	[1.009 ; 1.084]	0.851	1 0.901
Bouleau verruqueux	a = 1.150e-01 b = 7.026e-03 c = 2.802e-06	330	[-0.105 ; 0.064]	[0.915 ; 1.119]	0.273	0.883 0.930
Épicéa commun	a = 2.583e-01 b = 1.778e-02 c = -4.424e-06	1021	[-0.373 ; -0.186]	[1.020 ; 1.061]	1.038	1 0.924
Douglas	a = -2.098e-01 b = 1.921e-02 c = -1.187e-06	273	[-0.516 ; 0.100]	[0.966 ; 1.139]	0.813	0.953 0.889
Pin sylvestre	a = 1.261e-01 b = 1.490e-02 c = -2.040e-06	3185	[-1.875 ; -1.486]	[1.128 ; 1.165]	2.383	0.973 0.763
Sapin pectiné	a = 1.982e-01 b = 1.874e-02 c = -4.711e-06	496	[-0.018 ; 0.219]	[0.910 ; 0.971]	1.249	0.0003 0.909
Erable sycomore	a = 3.397e-01 b = 4.250e-03 c = 3.355e-06	675	[0.002 ; 0.123]	[0.931 ; 0.988]	0.724	0.013 0.907
Mélèze du Japon	a = -6.661e-01 b = 1.272e-02 c = 2.549e-07	74	[-1.350 ; 0.185]	[0.948 ; 1.137]	1.612	0.556 0.837
Chêne rouge	a = 2.637e-01 b = 8.705e-03 c = 5.417e-07	117	[-0.182 ; 0.010]	[0.958 ; 1.083]	0.534	0.971 0.954
Frêne	a = -2.506e-01 b = 7.304e-03 c = 1.557e-07	122	[-0.332 ; 0.049]	[0.956 ; 1.130]	0.474	1 0.913

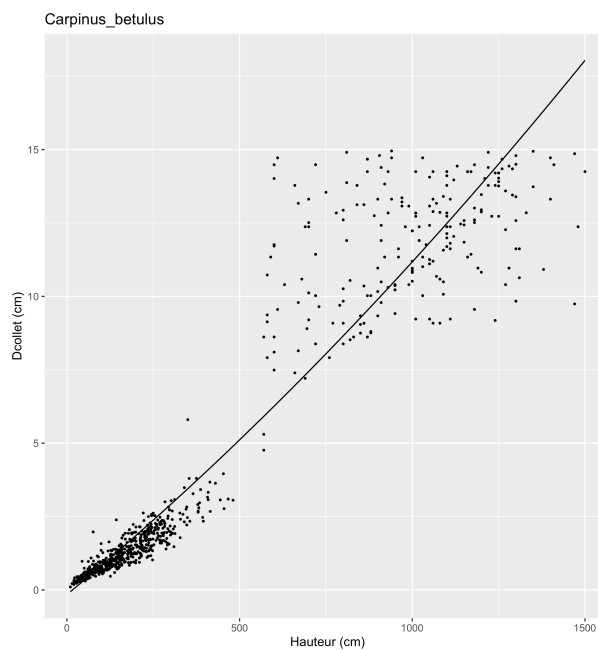
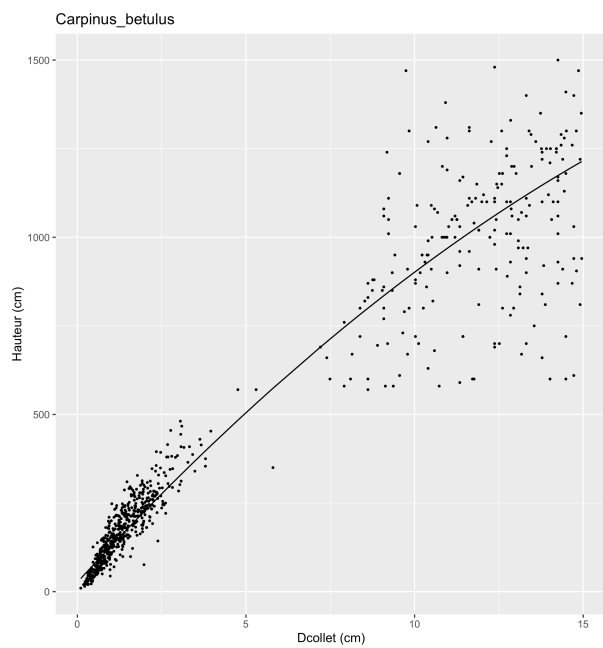
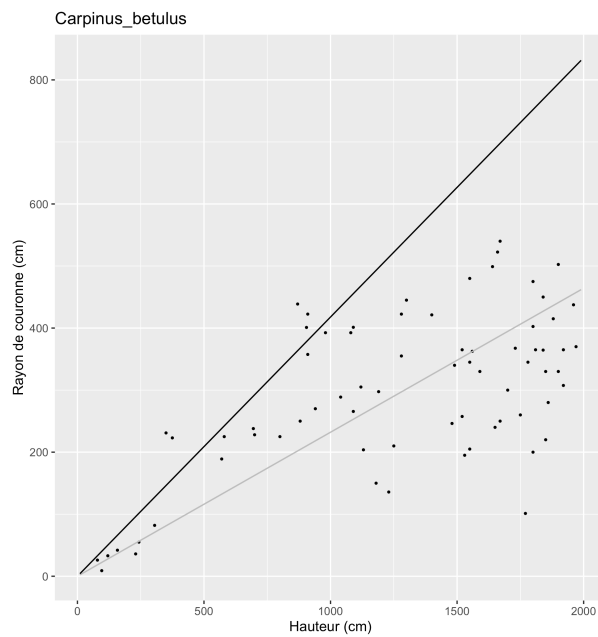
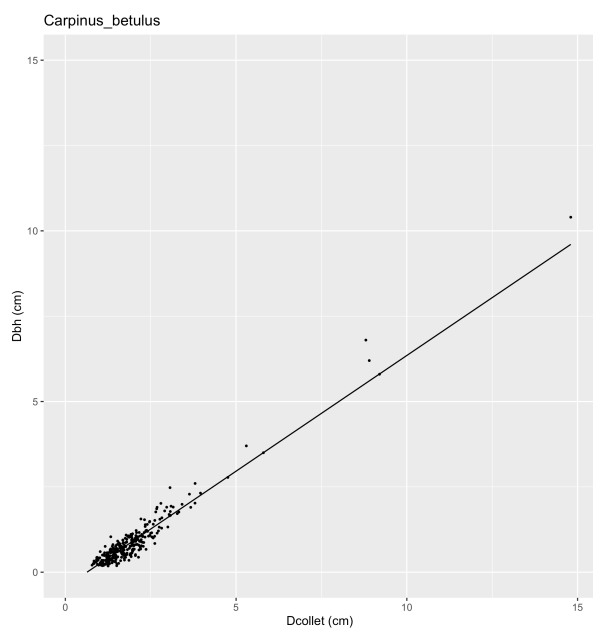
Annexe 9 : Visualisation des régressions pour la paramétrisation du Chêne pédonculé



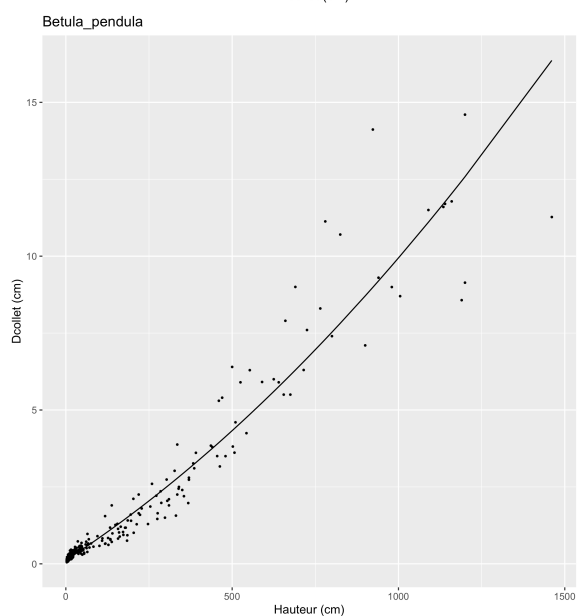
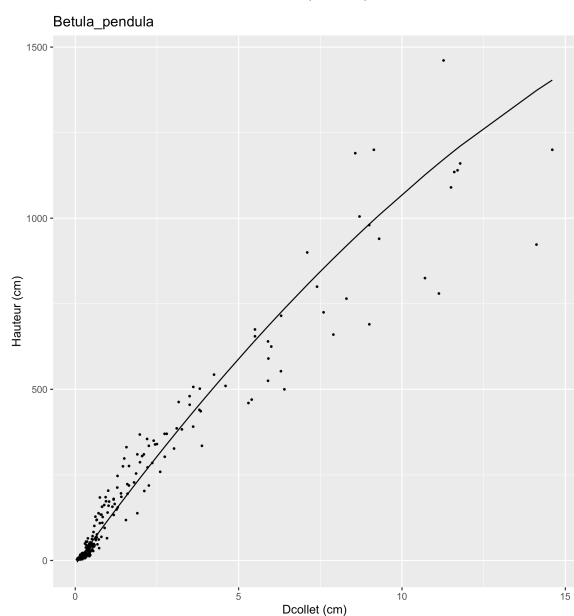
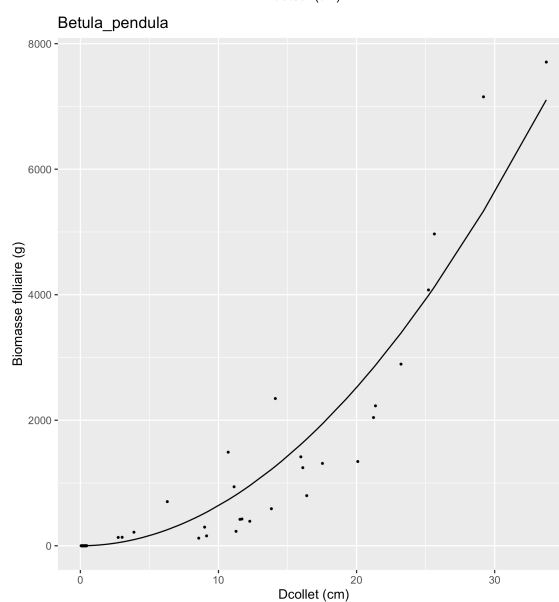
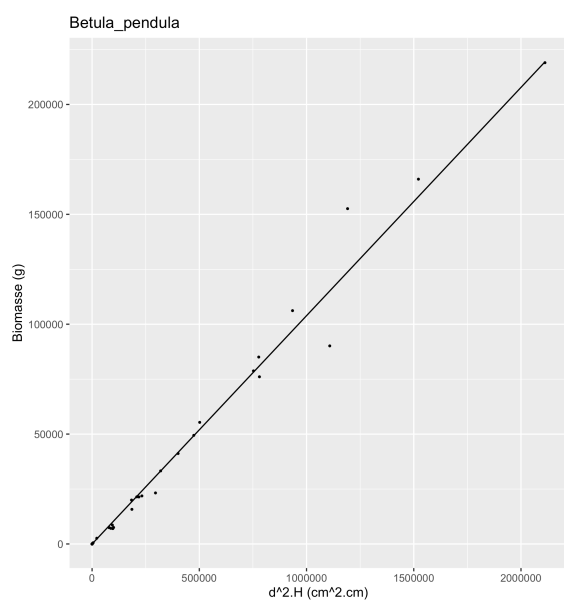
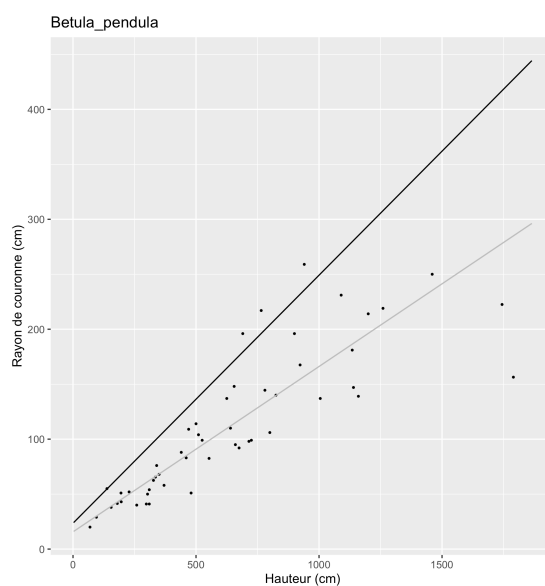
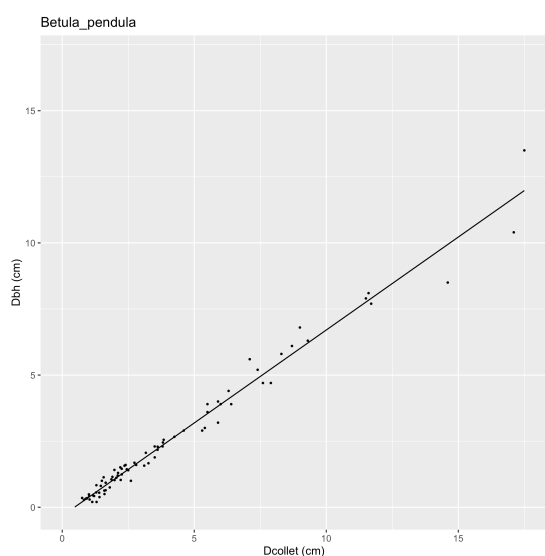
Annexe 10 : Visualisation des régressions pour la paramétrisation du Hêtre



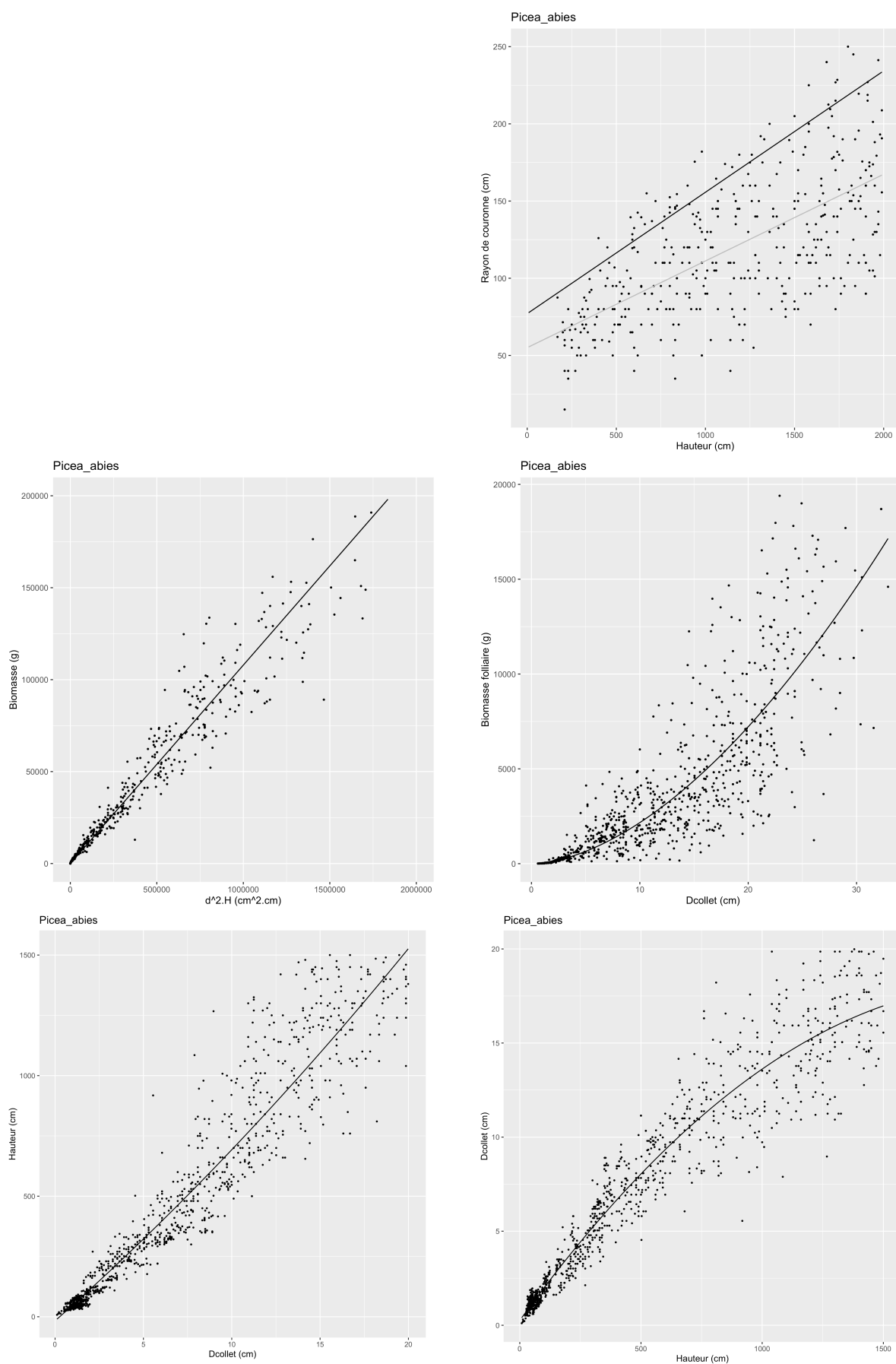
Annexe 11 : Visualisation des régressions pour la paramétrisation du Charme



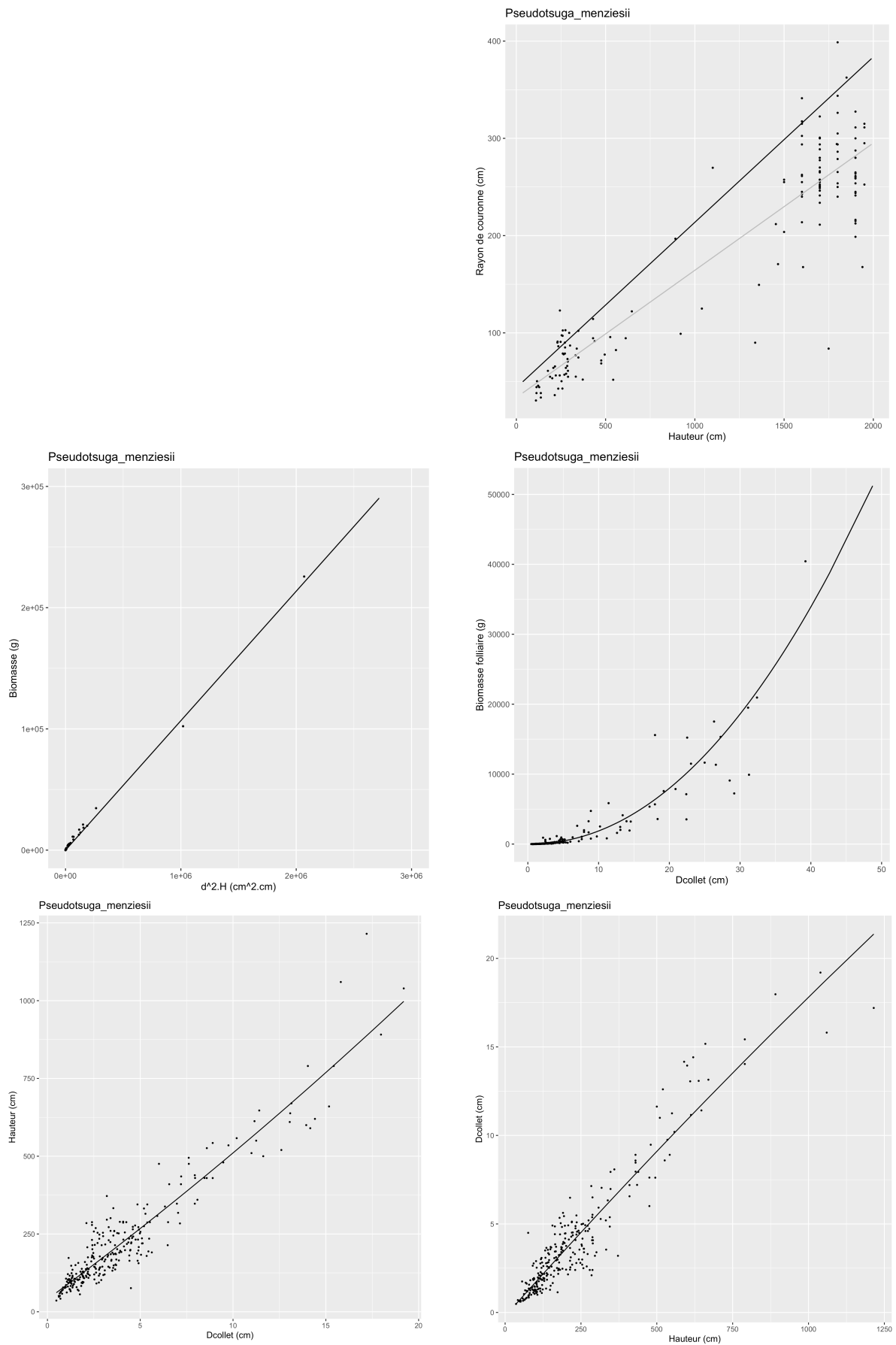
Annexe 12 : Visualisation des régressions pour la paramétrisation du Bouleau



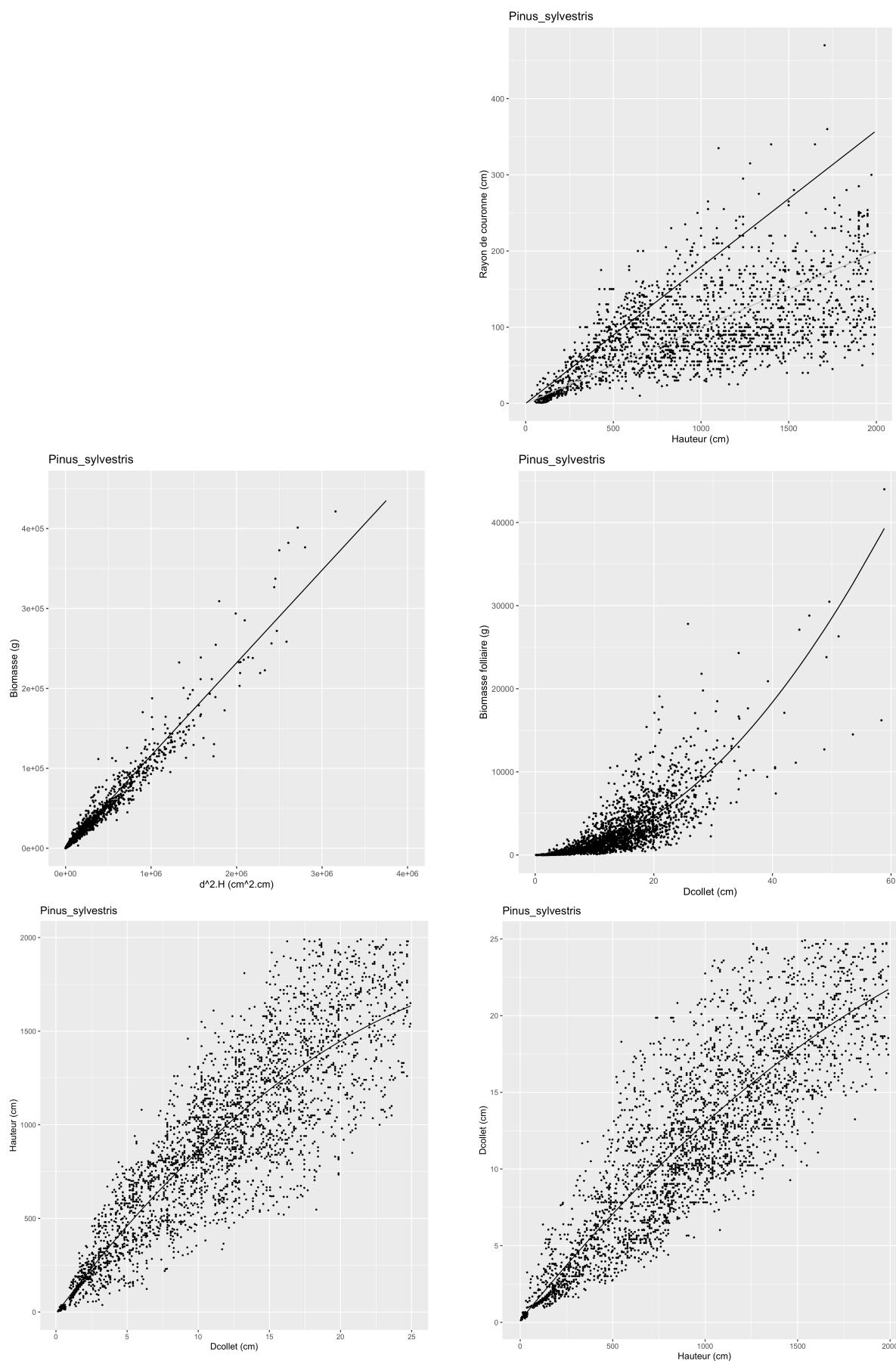
Annexe 13 : Visualisation des régressions pour la paramétrisation de l'Epicéa



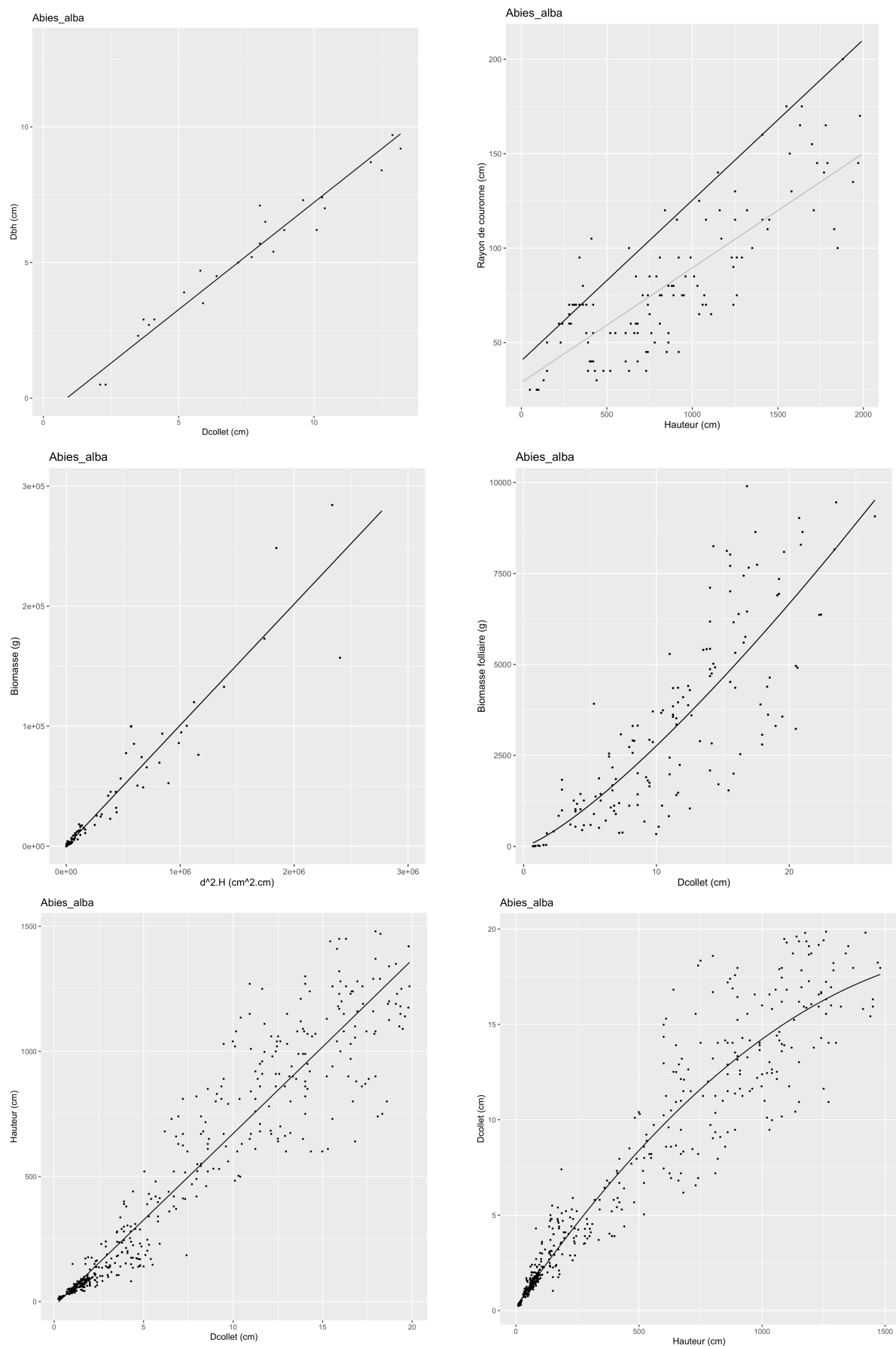
Annexe 14 : Visualisation des régressions pour la paramétrisation du Douglas



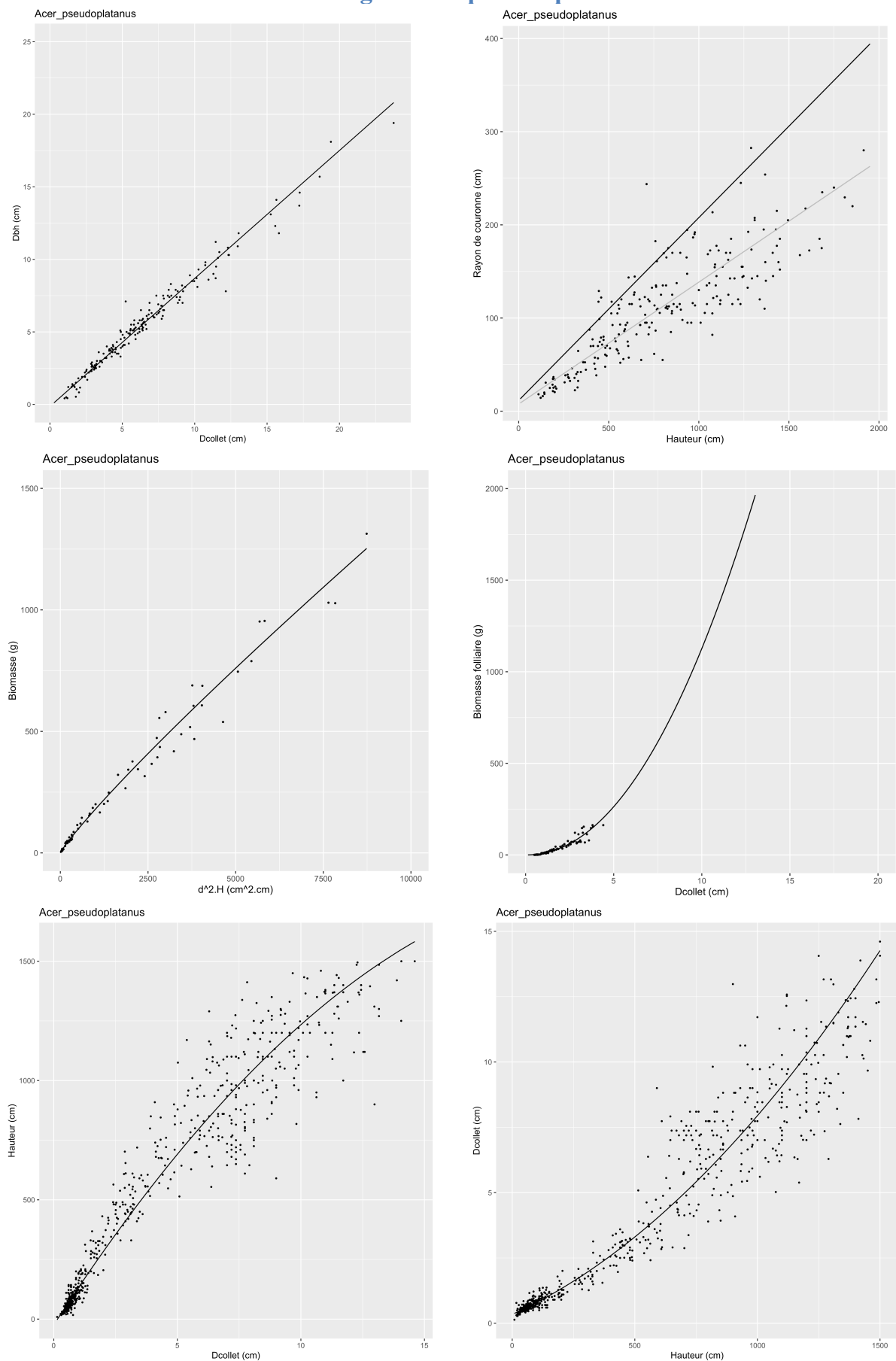
Annexe 15 : Visualisation des régressions pour la paramétrisation du Pin sylvestre



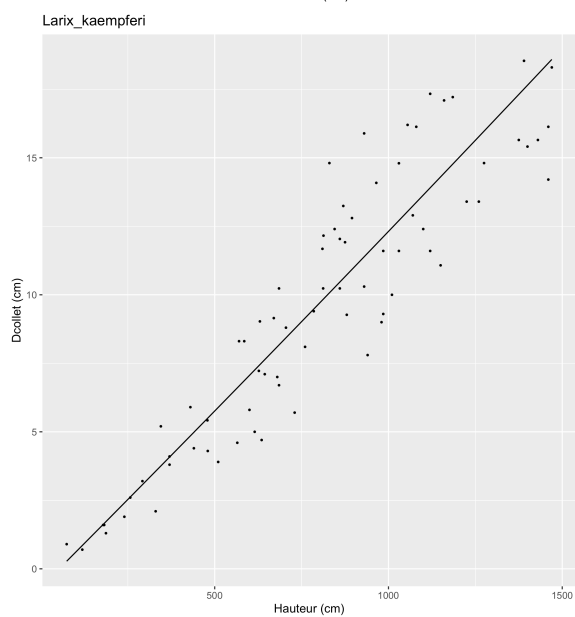
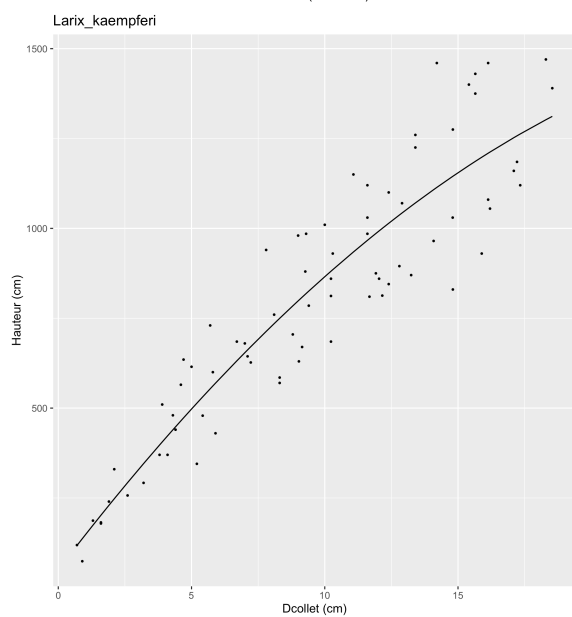
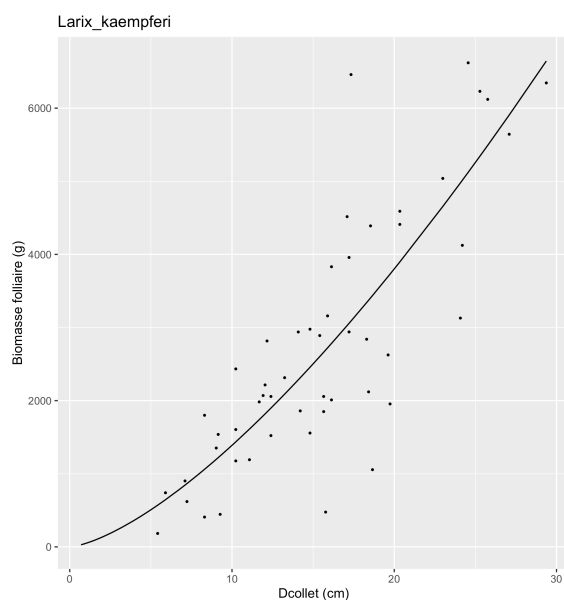
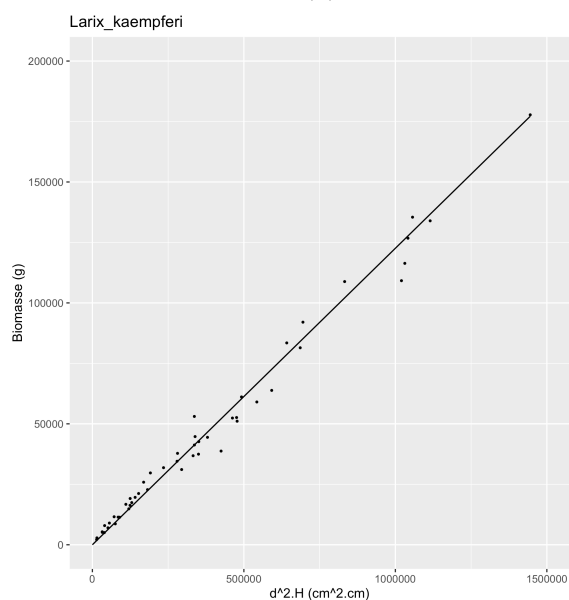
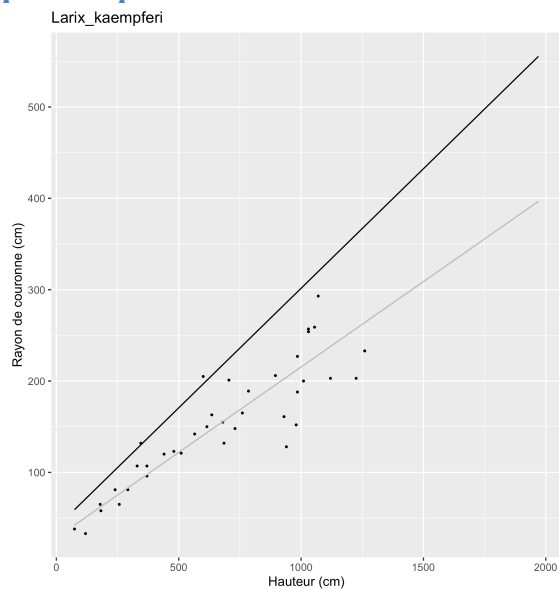
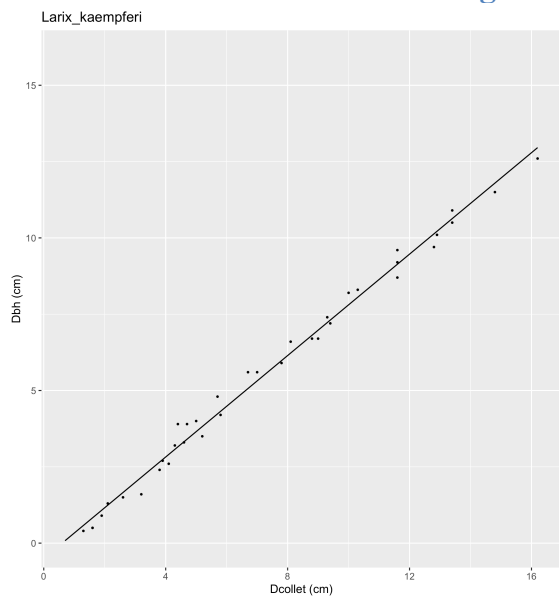
Annexe 16 : Visualisation des régressions pour la paramétrisation du Sapin pectiné



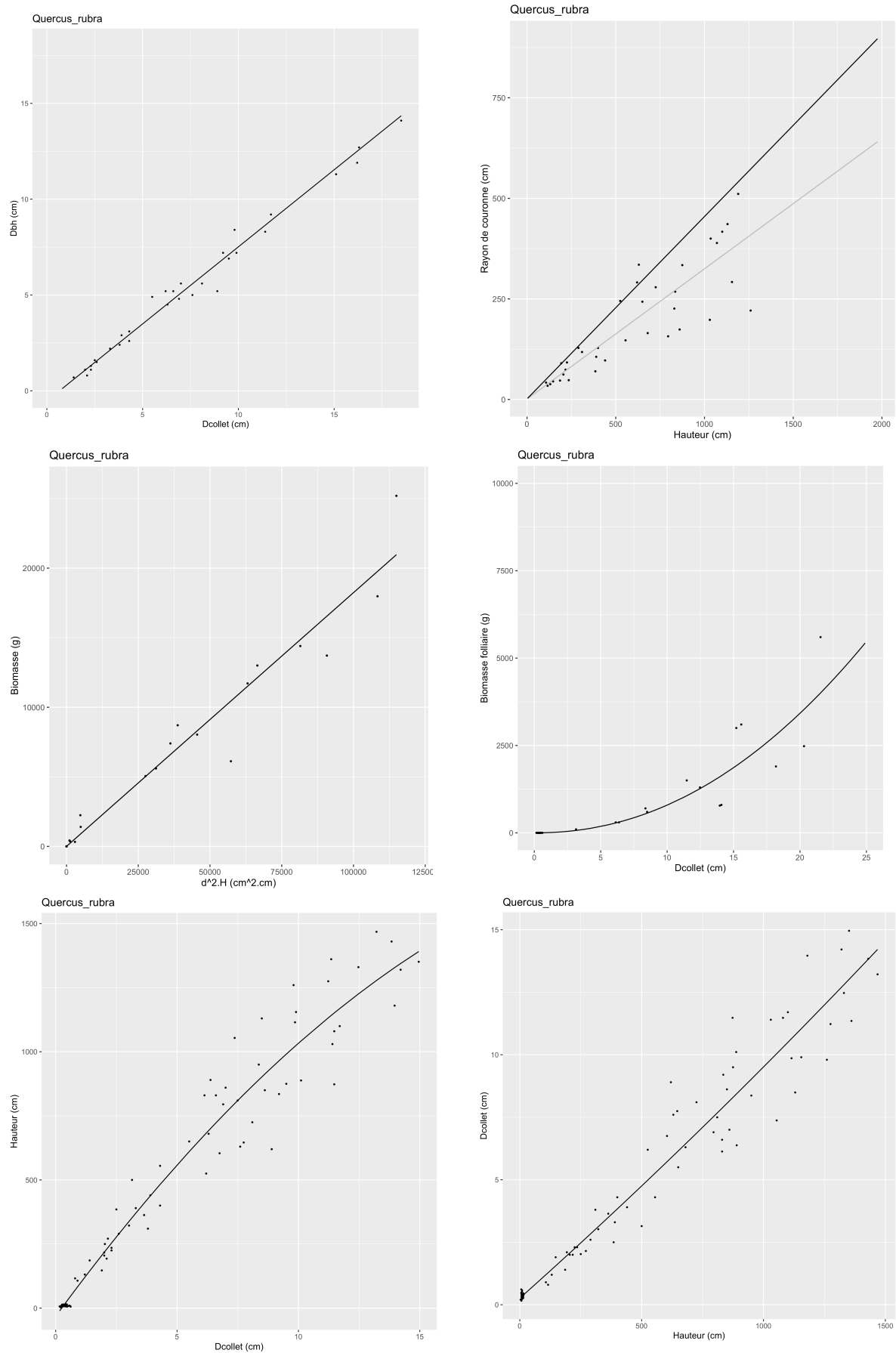
Annexe 17 : Visualisation des régressions pour la paramétrisation de l'Erable



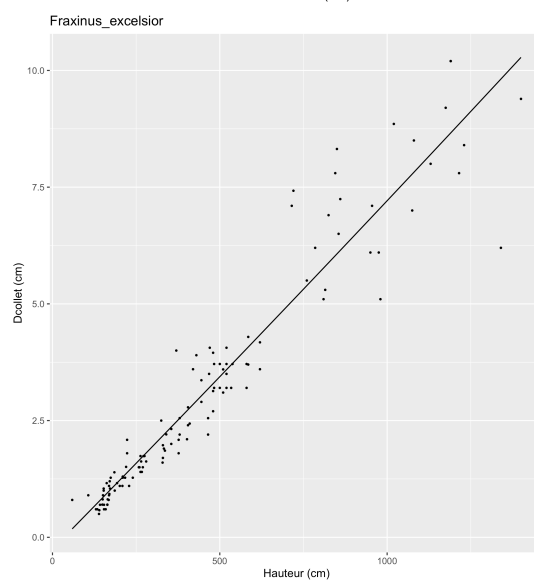
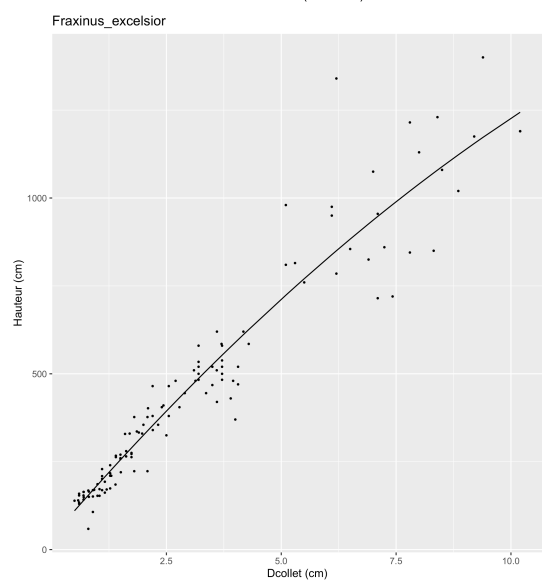
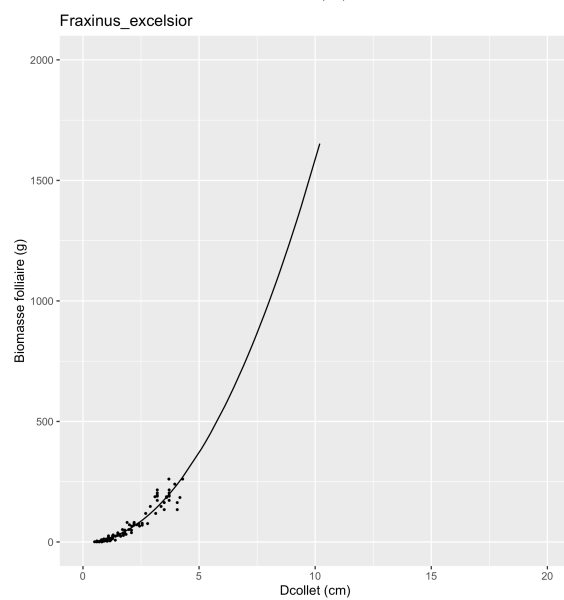
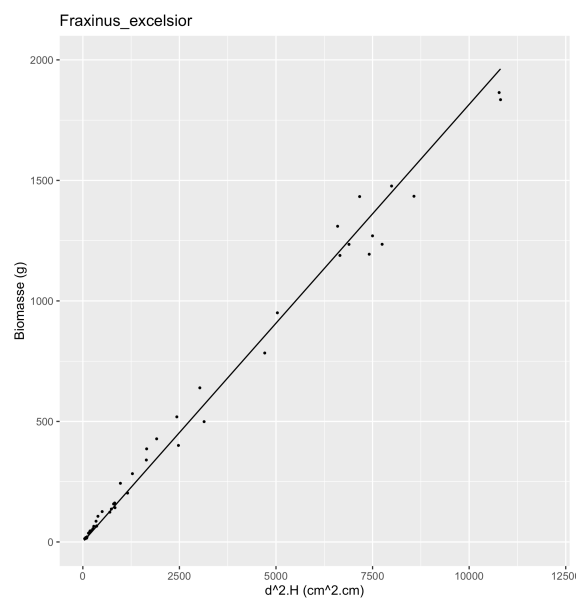
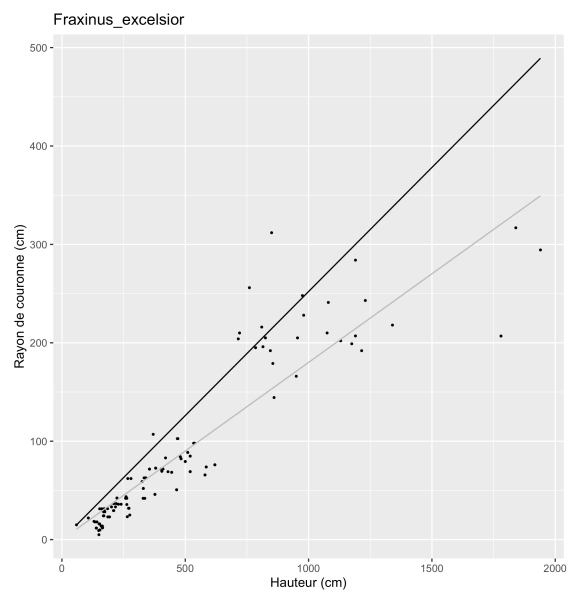
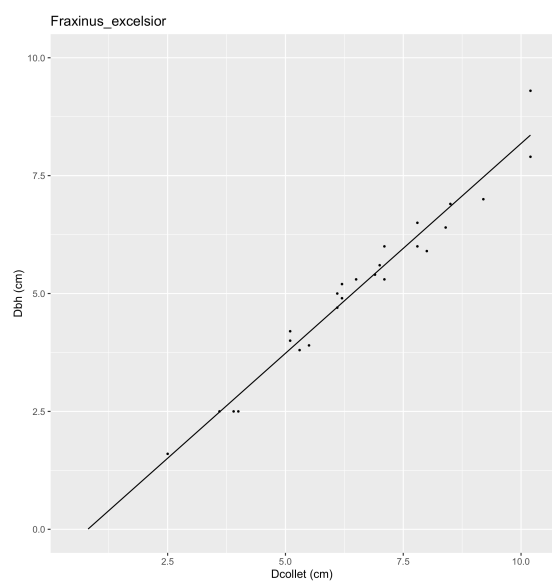
Annexe 18 : Visualisation des régressions pour la paramétrisation du Mélèze



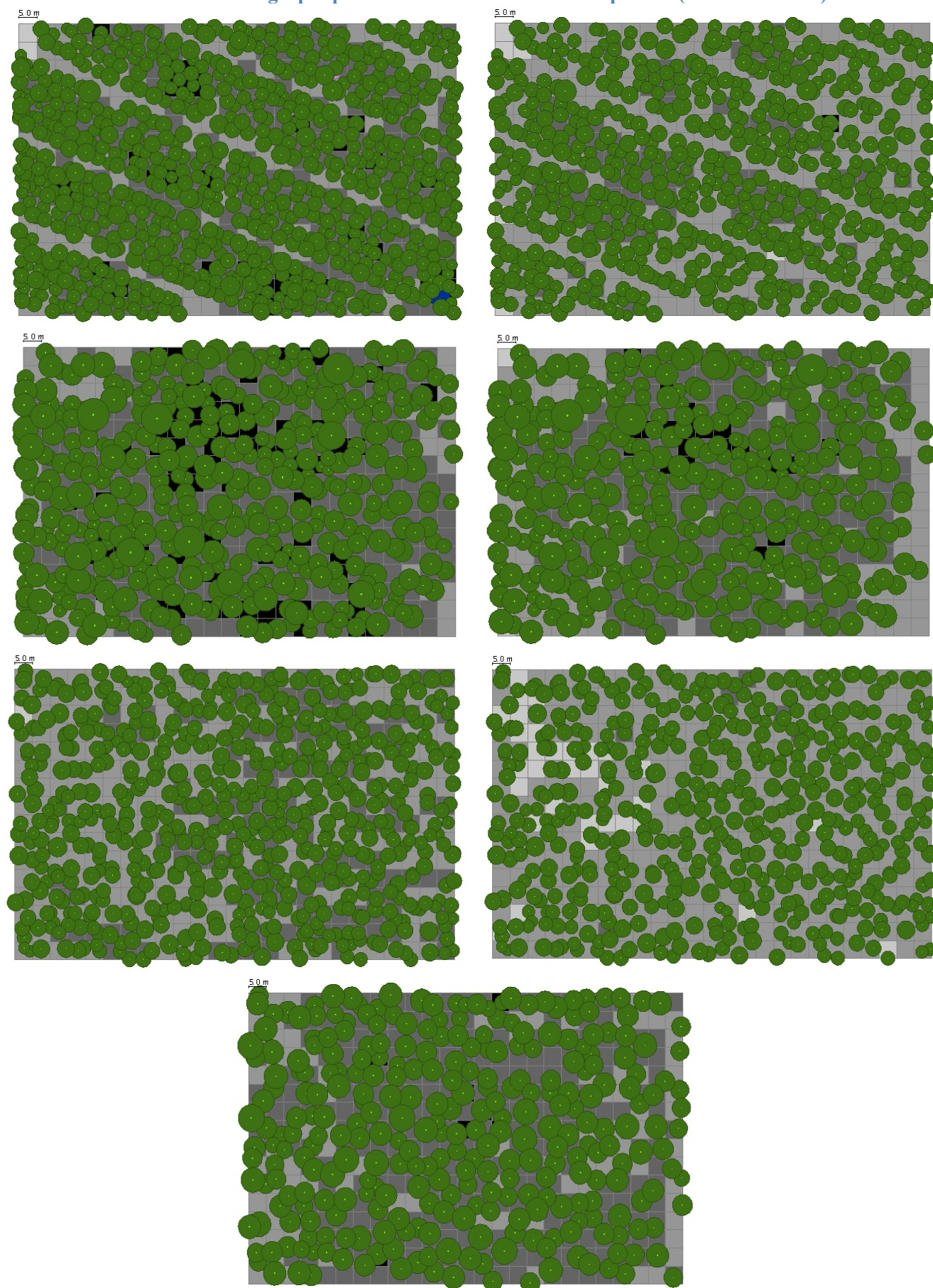
Annexe 19 : Visualisation des régressions pour la paramétrisation du Chêne rouge



Annexe 20 : Visualisation des régressions pour la paramétrisation du Frêne



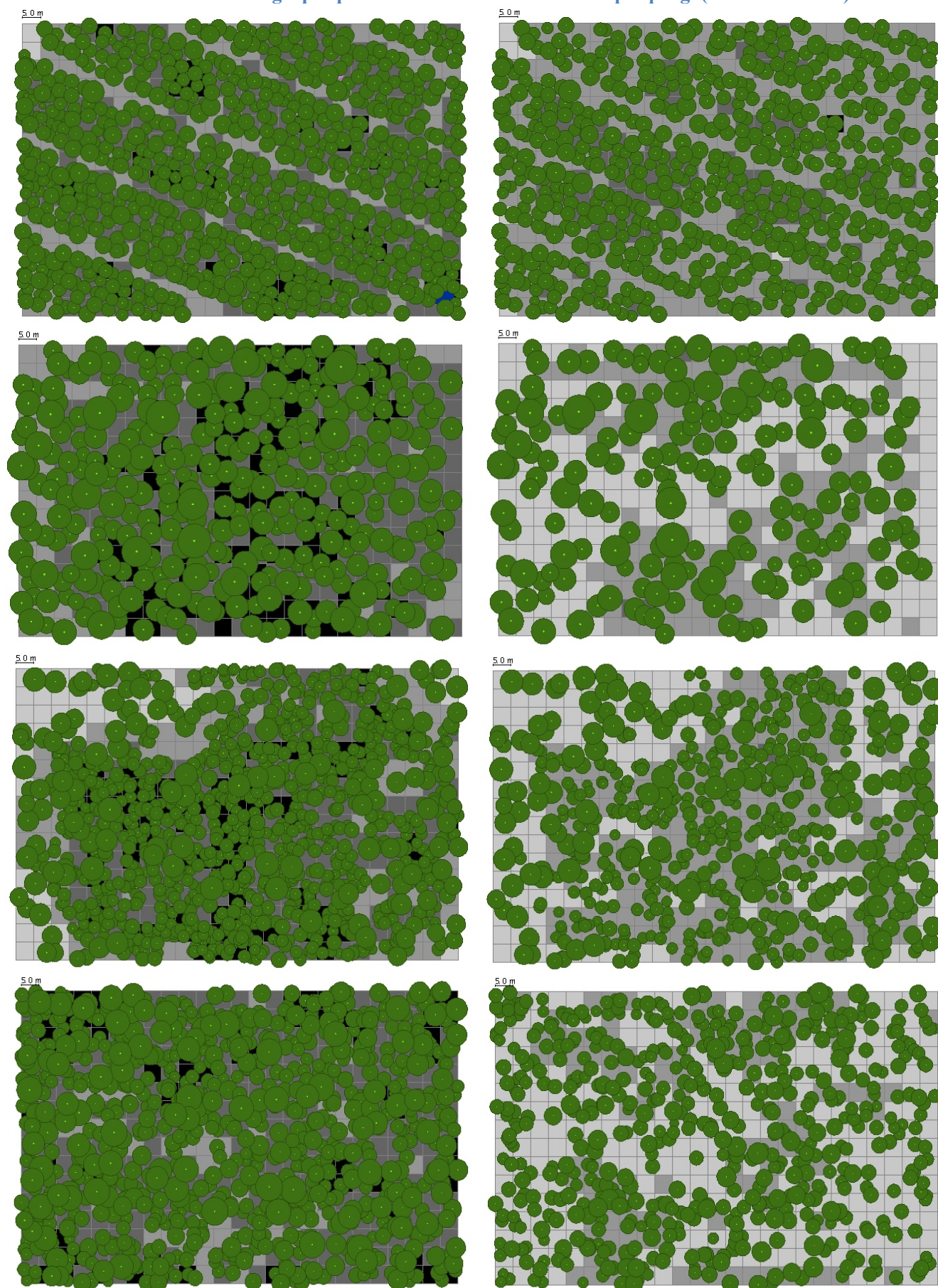
Annexe 21 : Visualisation graphique du scénario Honsfeld – Coupe rase (2021–39–75–99)



Annexe 22 : Table de production pour le scénario Honsfeld – Coupe rase

Année	N _{Avant} Eclaircie	G _{Avant} Eclaircie	Dg _{Avant} Eclaircie	N _{Après} Eclaircie	G _{Après} Eclaircie	Dg _{Après} Eclaircie	N _{Eclaircie}	G _{Eclaircie}	Dg _{Eclaircie}
2018	763	25,3	20,54						
2021	763	31,5	22,92	573	27,3	24,62	190	4,2	16,79
2027	573	36,6	28,51	459	32,0	29,80	114	4,6	22,57
2033	459	40,2	33,38	391	36,5	34,44	68	3,7	26,50
2039	391	42,9	37,40	333	38,9	38,60	58	4,0	29,62
2045	333	44,6	41,29	0	0	0	333	44,6	41,29
2051									
2057									
2063									
2069	1600	19,8	12,55	1120	13,9	12,55	480	5,9	12,55
2075	1120	23,7	16,41	784	16,6	16,40	336	7,1	16,43
2081	784	24,1	19,79	589	18,2	19,85	195	5,9	19,63
2087	589	24,5	23,01	472	19,6	22,98	117	4,9	23,15
2093	472	24,5	25,72	402	22,6	26,75	70	1,9	18,74
2099	402	27,5	29,54	342	24,9	30,49	60	2,6	23,42

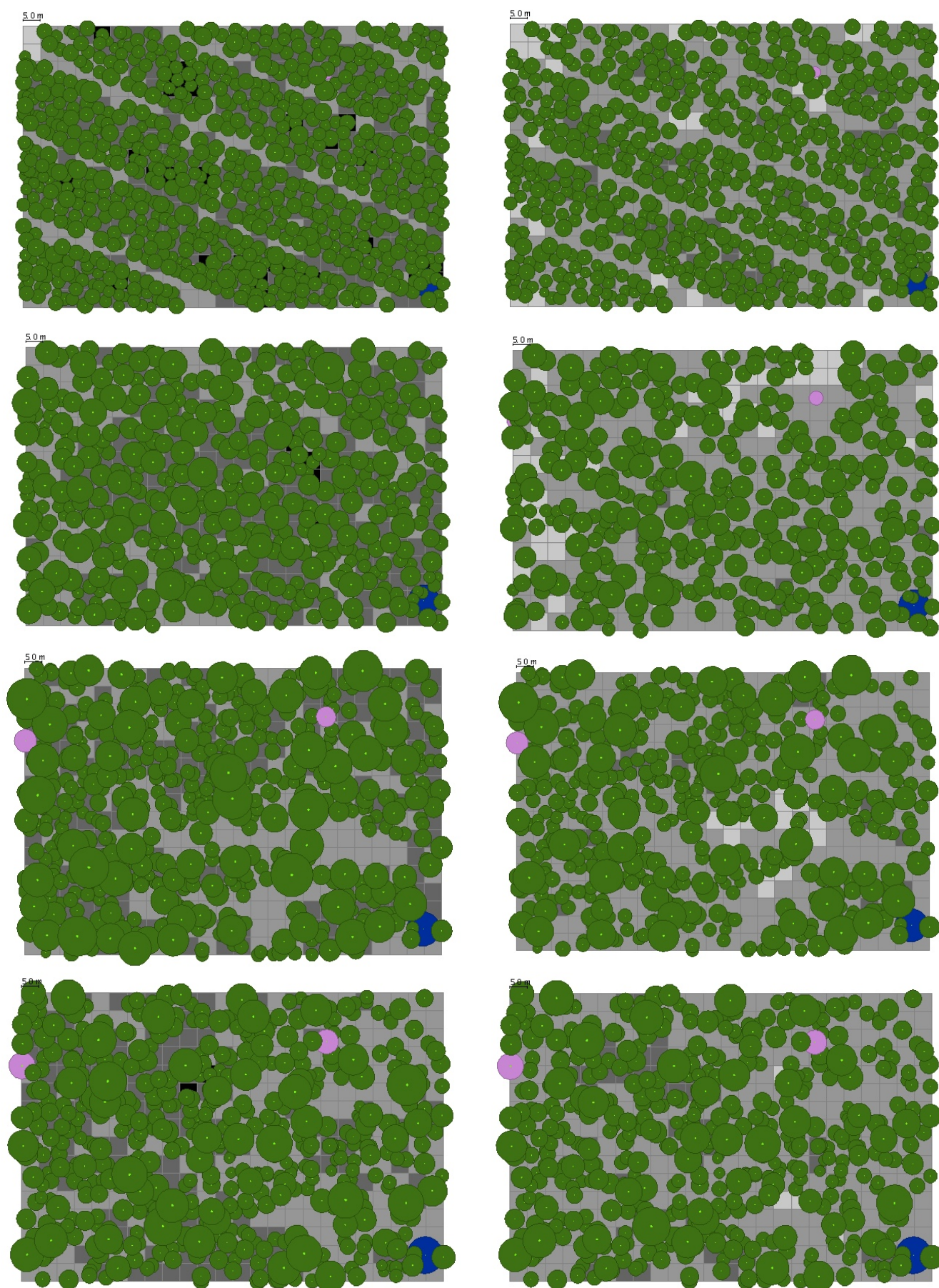
Annexe 23 : Visualisation graphique du scénario Honsfeld – Coupes prog. (2021–45–81–93)



Annexe 24 : Table de production pour le scénario Honsfeld – Coupe progressives

Année	N _{Avant} Eclaircie	G _{Avant} Eclaircie	Dg _{Avant} Eclaircie	N _{Après} Eclaircie	G _{Après} Eclaircie	Dg _{Après} Eclaircie	N _{Eclaircie}	G _{Eclaircie}	Dg _{Eclaircie}
2018	763	25,3	20,54						
2021	763	31,5	22,92	573	27,3	24,61	190	4,2	16,85
2027	573	36,5	28,47	459	32,0	29,80	114	4,5	22,35
2033	459	40,2	33,38	391	36,5	34,46	68	3,7	26,35
2039	391	43,0	37,43	333	39,1	38,66	58	3,9	29,39
2045	333	44,7	41,36	188	27,9	43,51	145	16,8	38,39
2051	195	32,8	46,30	68	15,8	54,48	127	17,0	41,25
2057	291	23,9	32,34	223	4,6	16,24	68	19,3	60,10
2063	696	19,5	18,87	140	3,9	18,66	556	15,6	18,93
2069	146	5,9	22,77	146	5,9	22,77			
2075	967	24,4	18,05	484	14,9	19,91	483	9,5	15,97
2081	1197	35,3	19,37	599	21,9	21,57	598	13,4	16,87
2087	900	34,5	22,08	765	30,4	22,49	135	4,1	19,64
2093	981	40,3	22,88	588	17,5	19,46	393	22,8	27,21
2099	631	24,2	22,08	631	24,2	22,08			

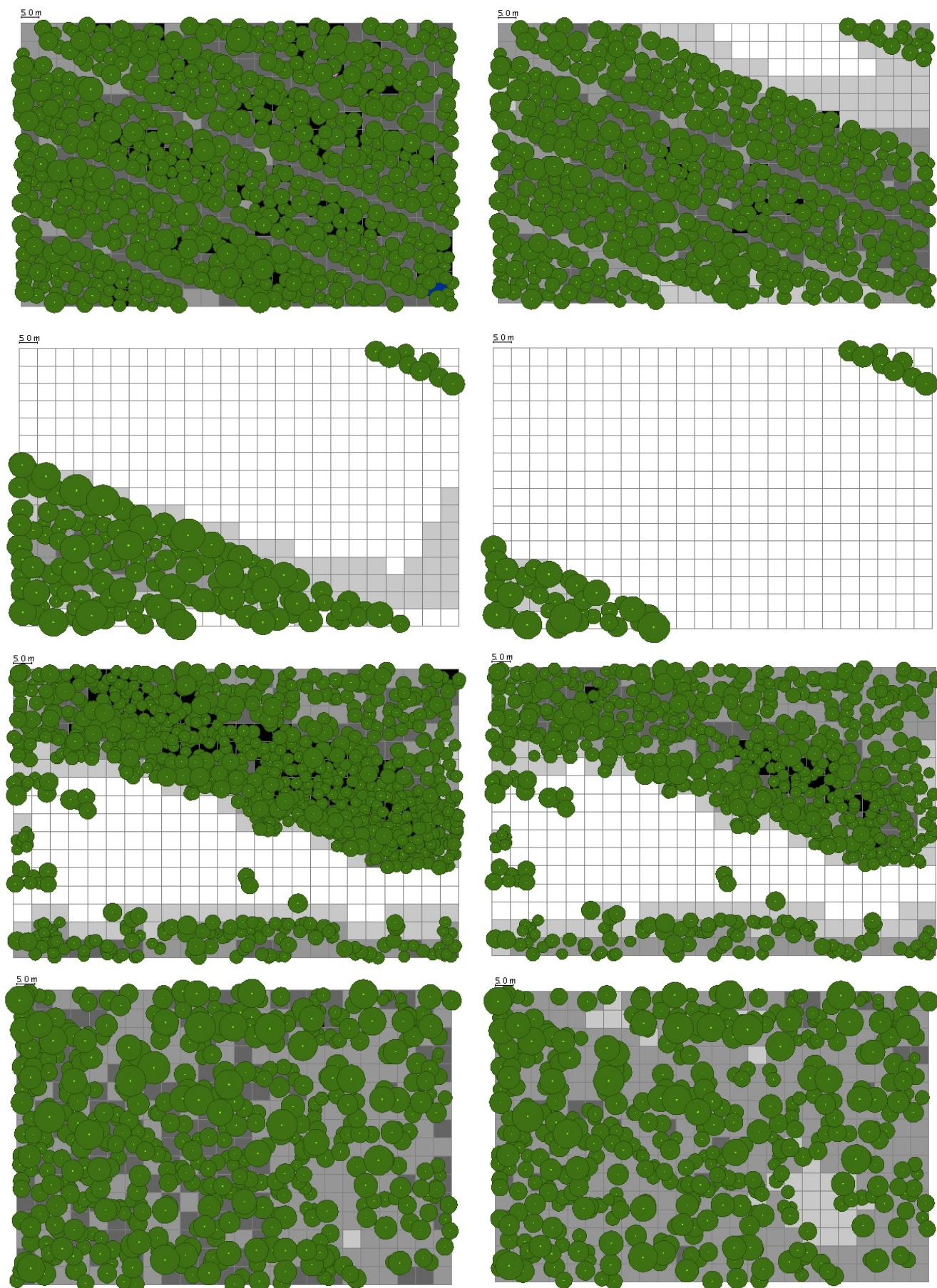
Annexe 25 : Visualisation graphique du scénario Honsfeld – Dim. cible (2021–39–75–99)



Annexe 26 : Table de production pour le scénario Honsfeld – Dimension cible

Année	N _{Avant} Eclaircie	G _{Avant} Eclaircie	Dg _{Avant} Eclaircie	N _{Après} Eclaircie	G _{Après} Eclaircie	Dg _{Après} Eclaircie	N _{Eclaircie}	G _{Eclaircie}	Dg _{Eclaircie}
2018	763	25,3	20,54						
2021	763	31,3	22,86	634	25,1	22,43	129	6,2	24,83
2027	634	34,3	26,25	518	27,5	25,99	116	6,8	27,38
2033	518	35,6	29,59	424	29,0	29,50	94	6,6	29,99
2039	424	35,5	32,67	346	27,8	31,98	78	7,7	35,56
2045	346	33,5	35,10	297	27,8	34,50	49	5,7	38,49
2051	297	32,8	37,48	267	27,8	36,39	30	5,0	46,05
2057	397	35,3	33,65	344	27,7	32,00	53	7,6	42,83
2063	517	36,2	29,88	442	27,7	28,27	75	8,5	38,01
2069	554	34,8	28,27	492	27,8	26,82	62	7,0	37,86
2075	574	34,3	27,57	501	27,9	26,60	73	6,4	33,50
2081	530	32,6	27,99	502	27,8	26,56	28	4,8	46,75
2087	520	32,5	28,22	484	27,8	27,06	36	4,7	40,71
2093	504	32,0	28,45	475	27,7	27,28	29	4,3	43,23
2099	520	32,3	28,12	478	27,8	27,21	42	4,5	36,91

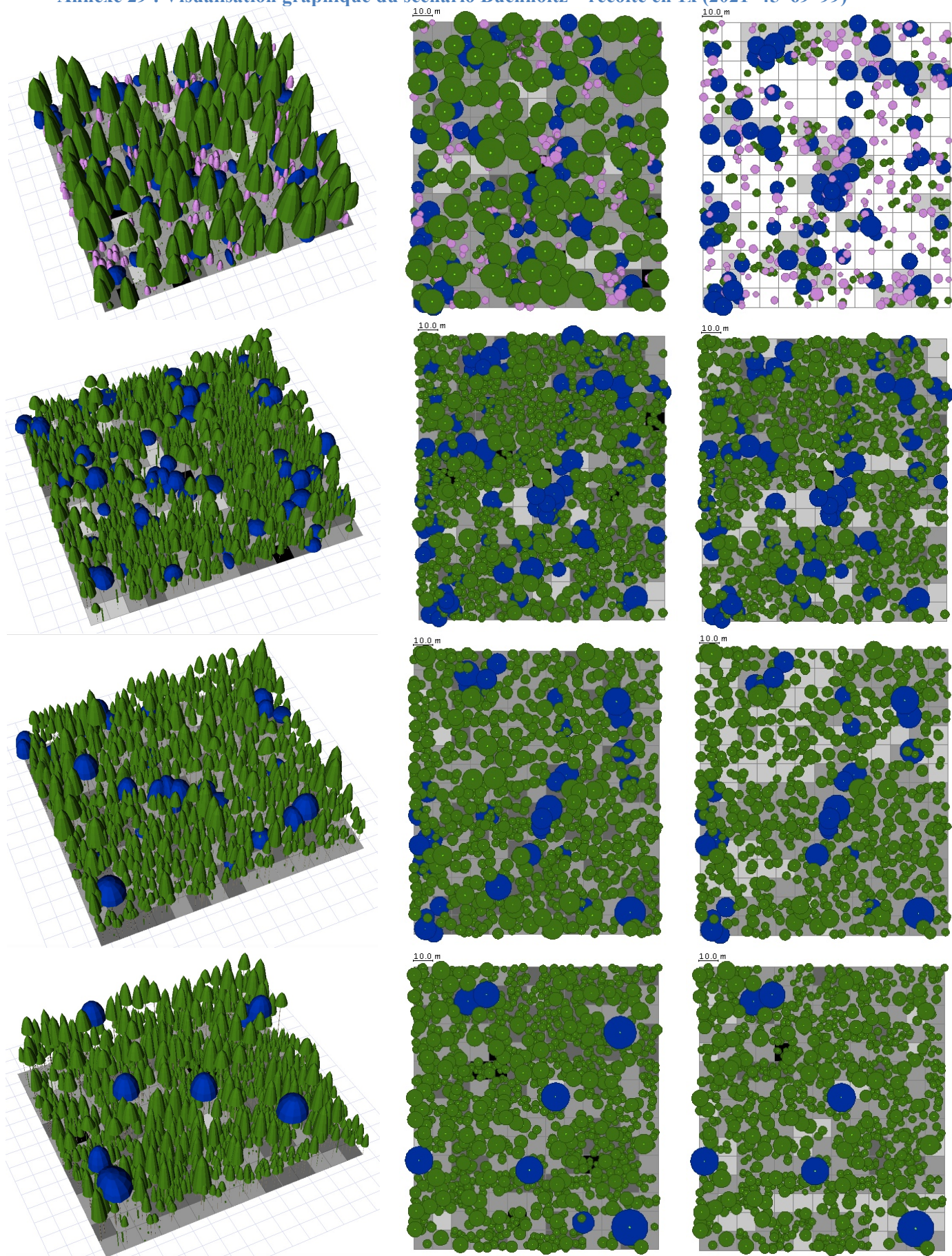
Annexe 27 : Visualisation graphique du scénario Honsfeld – Bandes (2027–45–63–99)



Annexe 28 : Table de production pour le scénario Honsfeld – Bandes

Année	N _{Avant} Eclaircie	G _{Avant} Eclaircie	Dg _{Avant} Eclaircie	N _{Après} Eclaircie	G _{Après} Eclaircie	Dg _{Après} Eclaircie	N _{Eclaircie}	G _{Eclaircie}	Dg _{Eclaircie}
2018	763	25,3	20,54						
2021	763	31,3	22,86						
2027	763	40,6	26,04	572	33,7	27,42	191	6,9	21,40
2033	572	41,1	30,26	353	27,6	31,54	219	13,5	28,07
2039	353	32,2	34,07	156	15,5	35,52	197	16,7	32,87
2045	156	18,0	38,38	44	5,4	39,75	112	12,6	37,83
2051	399	14,0	21,15	178	3,8	16,43	221	10,2	24,29
2057	758	18,2	17,50	379	10,2	18,54	379	8,0	16,40
2063	1131	29,8	18,33	792	22,6	19,09	339	7,2	16,43
2069	1567	44,0	18,90	877	26,9	19,75	690	17,1	17,75
2075	978	35,6	21,54	772	27,8	21,43	206	7,8	21,93
2081	790	33,8	23,35	644	27,7	23,42	146	6,1	23,06
2087	653	33,1	25,41	555	27,8	25,26	98	5,3	26,26
2093	579	32,7	26,81	487	27,8	26,98	92	4,9	25,93
2099	532	32,7	27,99	451	27,8	28,01	81	4,9	27,87

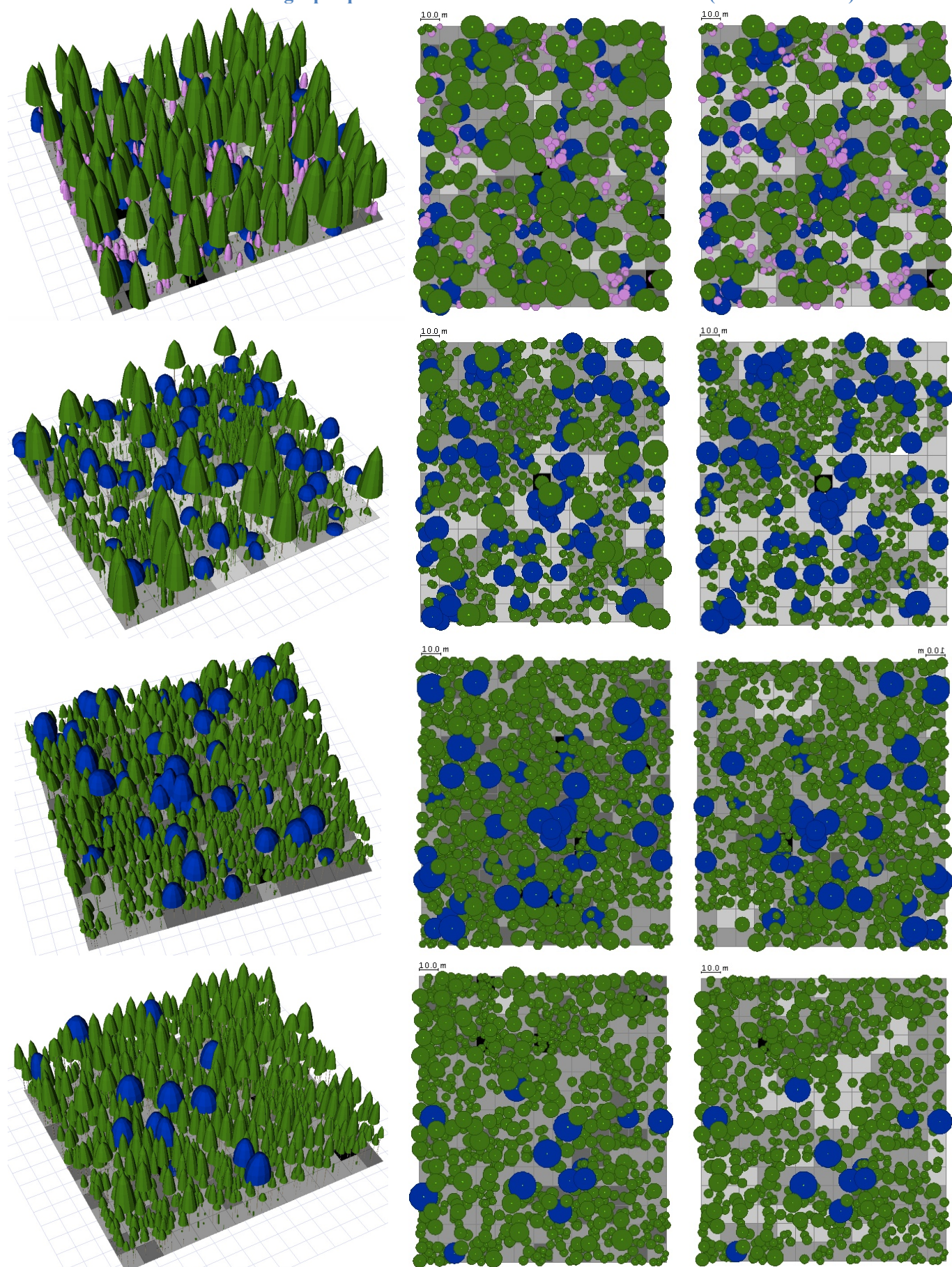
Annexe 29 : Visualisation graphique du scénario Buchholtz – récolte en 1x (2021–45–69–99)



Annexe 30 : Table de production pour le scénario Buchholtz – Récolte en 1x

Année	N _{Avant} Eclaircie	G _{Avant} Eclaircie	Dg _{Avant} Eclaircie	N _{Après} Eclaircie	G _{Après} Eclaircie	Dg _{Après} Eclaircie	N _{Eclaircie}	G _{Eclaircie}	Dg _{Eclaircie}
2018	355	35,0	35,44						
2021	355	37,1	36,47	289	6,4	16,71	66	30,7	76,93
2027	289	9,2	20,11						
2033	289	12,6	23,59						
2039	371	18,1	24,91	238	11,5	24,77	132	6,6	25,17
2045	806	28,3	21,15	685	24,0	21,11	121	4,3	21,35
2051	818	32,9	22,63	694	27,6	22,48	124	5,3	23,48
2057	862	36,9	23,35	731	30,6	23,08	131	6,3	24,80
2063	738	36,4	25,05	624	29,8	24,63	114	6,6	27,22
2069	630	34,6	26,44	531	27,6	25,74	99	7,0	29,87
2075	541	32,3	27,55	457	26,3	27,06	84	6,0	30,08
2081	457	29,9	28,88	384	23,7	28,04	73	6,2	32,90
2087	485	29,4	27,76	412	24,5	27,51	73	4,9	29,15
2093	598	31,6	25,96	506	26,1	25,66	92	5,5	27,54
2099	634	32,2	25,43	536	26,7	25,17	97	5,5	26,79

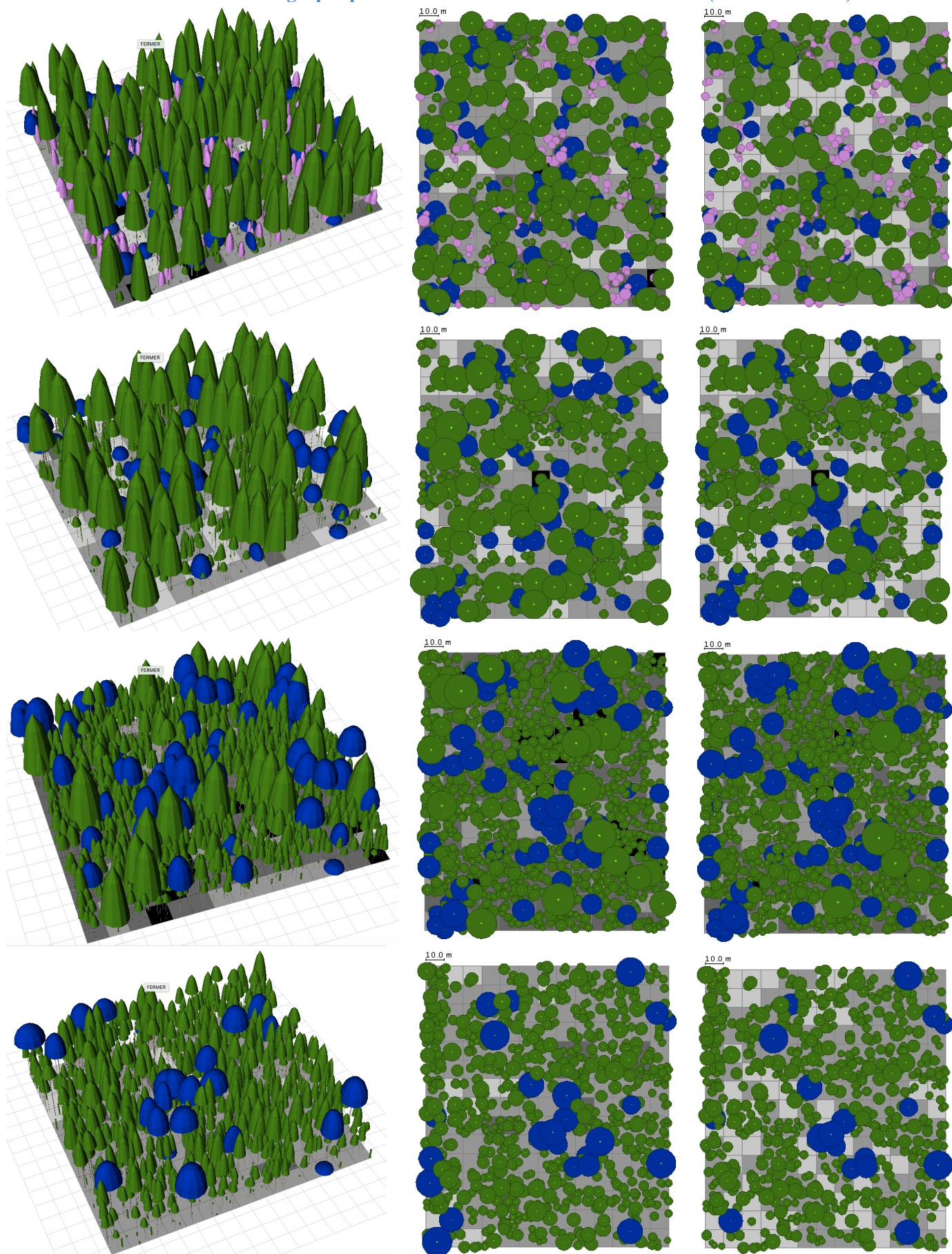
Annexe 31 : Visualisation graphique du scénario Buchholtz – récolte en 5x (2021–45–69–99)



Annexe 32 : Table de production pour le scénario Buchholtz – Récolte en 5x

Année	N _{Avant} Eclaircie	G _{Avant} Eclaircie	Dg _{Avant} Eclaircie	N _{Après} Eclaircie	G _{Après} Eclaircie	Dg _{Après} Eclaircie	N _{Eclaircie}	G _{Eclaircie}	Dg _{Eclaircie}
2018	355	35,0	35,44						
2021	355	37,1	36,47	342	28,5	32,56	13	8,6	90,82
2027	342	32,3	34,68	328	24,7	30,96	13	7,6	84,95
2033	328	28,7	33,40	315	21,1	29,27	13	7,6	85,03
2039	315	25,0	31,79	169	12,4	30,54	146	12,6	33,18
2045	454	21,4	24,51	441	14,8	20,68	13	6,6	79,51
2051	790	27,3	20,97	672	23,3	21,00	118	4,0	20,78
2057	759	30,7	22,68	645	25,8	22,56	114	4,9	23,34
2063	762	33,6	23,68	648	28,7	23,73	114	4,9	23,38
2069	699	34,5	25,07	593	28,6	24,78	106	5,9	26,66
2075	625	33,8	26,25	529	27,9	25,94	96	5,9	27,89
2081	568	32,6	27,06	477	25,3	26,03	91	7,3	31,91
2087	583	31,5	26,24	493	26,5	26,14	89	5,0	26,82
2093	590	32,0	26,29	498	25,8	25,68	91	6,2	29,36
2099	626	31,9	25,46	529	25,7	24,88	97	6,2	28,44

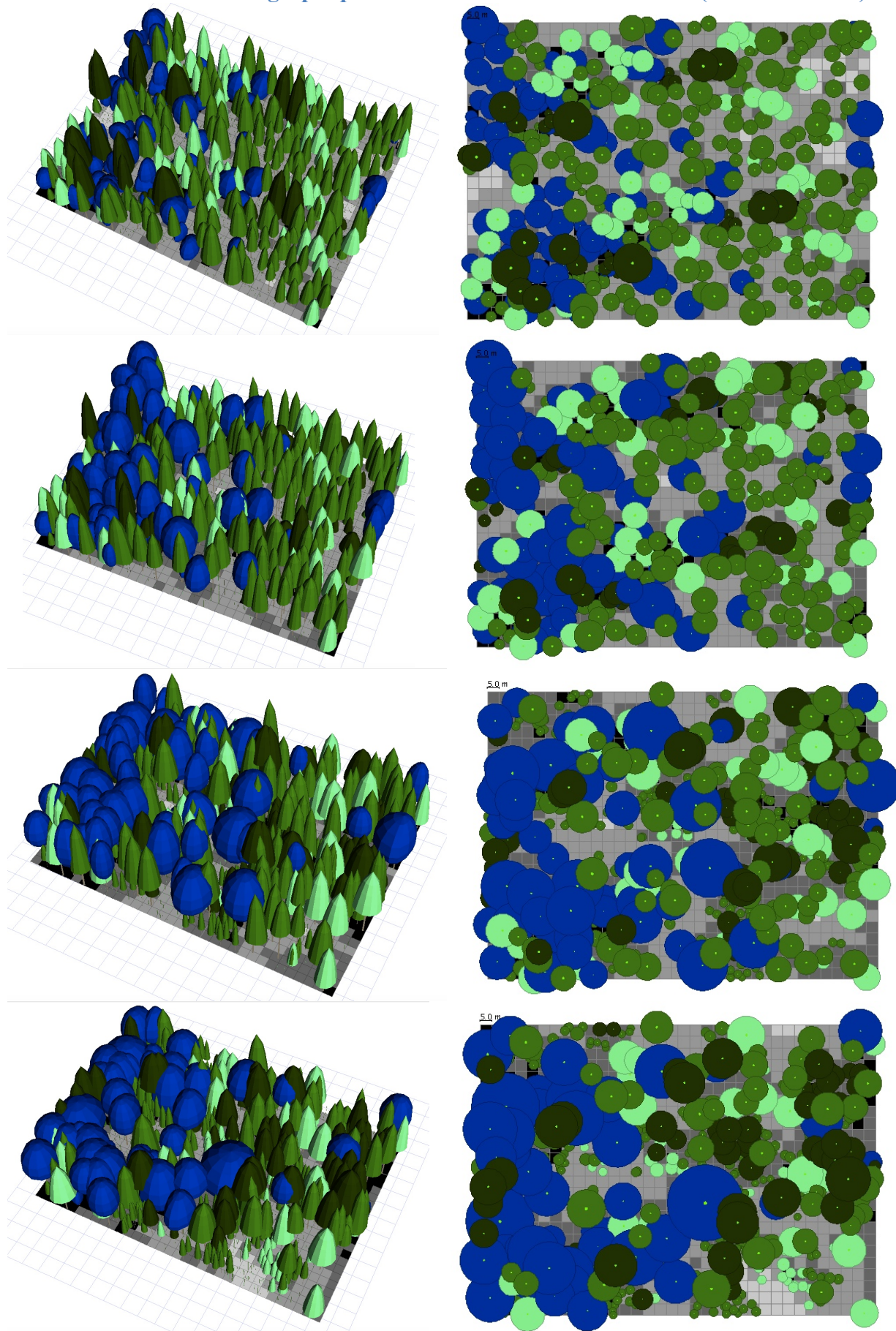
Annexe 33 : Visualisation graphique du scénario Buchholtz – récolte en 9x (2021–45–69–99)



Annexe 34 : Table de production pour le scénario Buchholtz – Récolte en 9x

Année	N _{Avant} Eclaircie	G _{Avant} Eclaircie	Dg _{Avant} Eclaircie	N _{Après} Eclaircie	G _{Après} Eclaircie	Dg _{Après} Eclaircie	N _{Eclaircie}	G _{Eclaircie}	Dg _{Eclaircie}
2018	355	35,0	35,44						
2021	355	37,1	36,48	327	32,1	35,39	28	4,9	47,26
2027	327	35,9	37,39	315	30,7	35,21	11	5,2	76,38
2033	315	34,8	37,49	308	29,9	35,16	8	4,9	90,42
2039	308	33,8	37,40	171	24,6	42,87	137	9,2	29,19
2045	298	30,7	36,21	291	25,6	33,46	7	5,1	98,39
2051	579	35,8	28,03	573	30,7	26,12	6	5,0	102,15
2057	625	36,6	27,29	619	31,6	25,49	6	4,9	105,68
2063	702	38,1	26,29	695	32,7	24,45	6	5,4	105,95
2069	723	37,7	25,77	717	32,8	24,14	6	4,9	104,97
2075	718	37,2	25,69	605	27,7	24,15	113	9,5	32,71
2081	614	31,6	25,61	521	26,8	25,62	93	4,8	25,56
2087	543	31,2	27,04	458	25,4	26,57	85	5,8	29,44
2093	491	29,5	27,67	413	23,1	26,68	78	6,4	32,38
2099	463	27,3	27,40	392	23,3	27,47	70	4,0	26,97

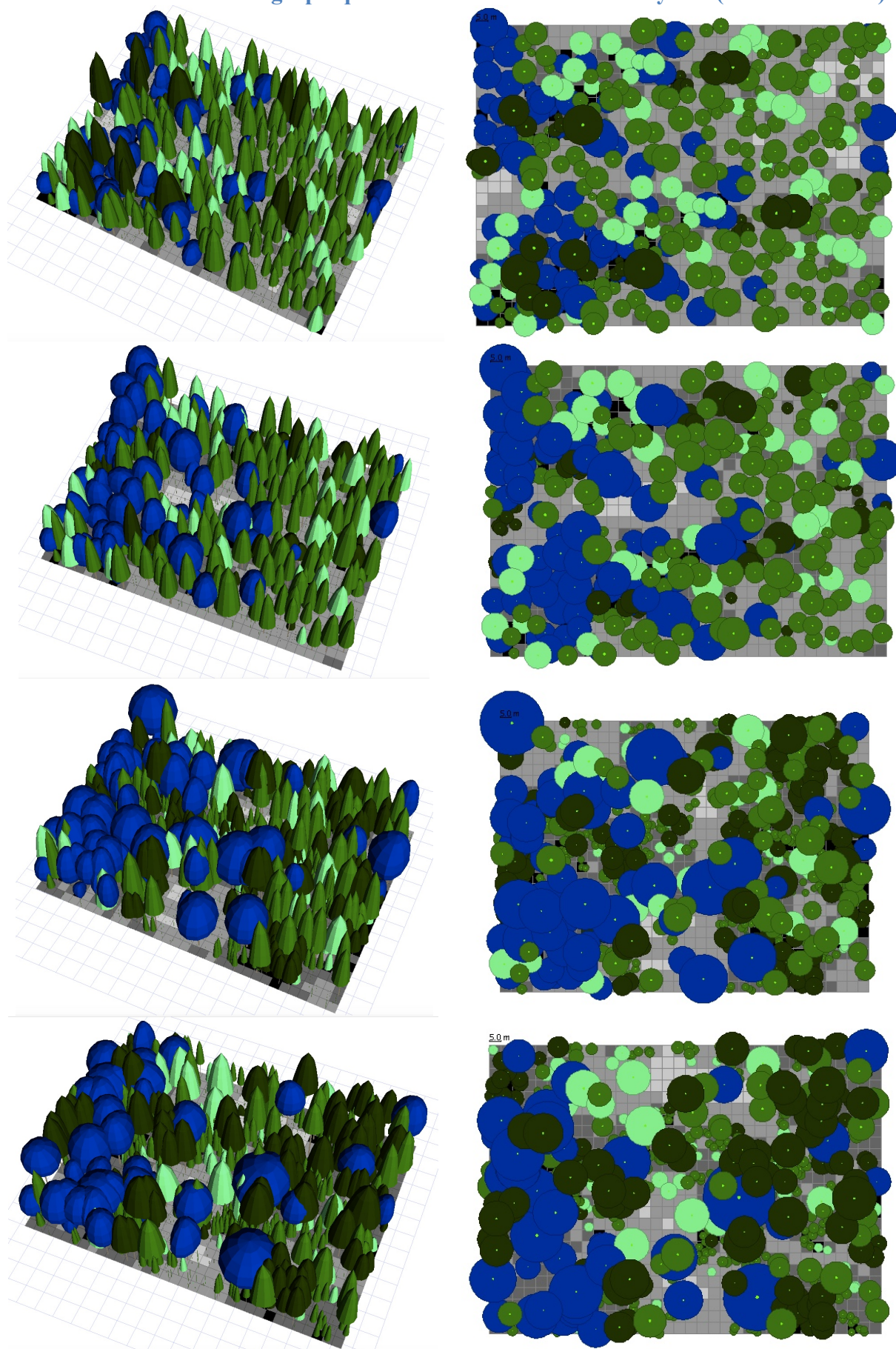
Annexe 35 : Visualisation graphique du scénario Bêchefa – « fermé » (2018–45–75–99)



Annexe 36 : Table de production pour le scénario Béchéfa – « fermé »

Année	N _{Avant} Eclaircie	G _{Avant} Eclaircie	Dg _{Avant} Eclaircie	N _{Après} Eclaircie	G _{Après} Eclaircie	Dg _{Après} Eclaircie	N _{Eclaircie}	G _{Eclaircie}	Dg _{Eclaircie}
2018	177	35,0	50,16						
2021	177	36,7	51,38	171	31,9	48,79	6	4,8	99,25
2027	171	35,3	51,30	166	32,0	49,57	5	3,3	93,84
2033	166	35,8	52,41	160	32,1	50,53	6	3,7	88,23
2039	160	35,6	53,21	154	32,0	51,45	6	3,6	86,28
2045	160	35,5	53,11	154	32,0	51,49	7	3,5	82,17
2051	187	36,4	49,79	178	32,0	47,80	8	4,4	81,05
2057	210	36,7	47,19	203	32,0	44,79	7	4,8	92,51
2063	206	36,4	47,50	197	32,0	45,45	8	4,4	81,68
2069	205	36,5	47,67	196	32,1	45,61	8	4,5	81,90
2075	199	36,6	48,43	191	32,1	46,29	8	4,5	84,61
2081	194	36,2	48,79	187	32,1	46,69	7	4,2	89,86
2087	190	36,3	49,34	184	32,0	47,05	6	4,3	98,08
2093	205	36,5	47,66	199	31,9	45,23	6	4,6	97,79
2099	219	36,4	45,98	213	31,9	43,73	7	4,5	92,88

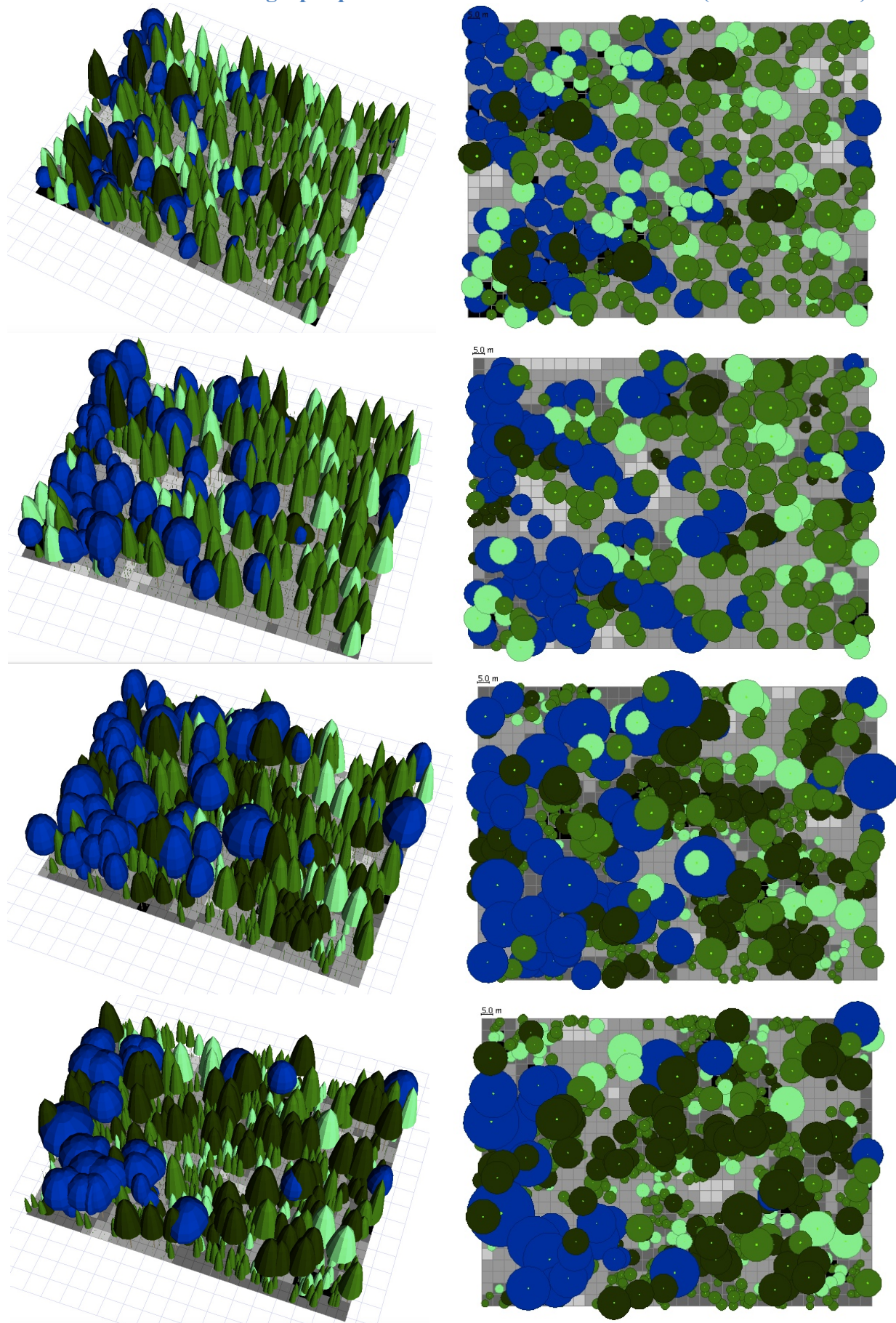
Annexe 37 : Visualisation graphique du scénario Bêchefa – « moyen » (2018–45–75–99)



Annexe 38 : Table de production pour le scénario Béchéfa – « moyen »

Année	N _{Avant} Eclaircie	G _{Avant} Eclaircie	Dg _{Avant} Eclaircie	N _{Après} Eclaircie	G _{Après} Eclaircie	Dg _{Après} Eclaircie	N _{Eclaircie}	G _{Eclaircie}	Dg _{Eclaircie}
2018	177	35,0	50,16						
2021	177	36,7	51,38	171	31,9	48,79	6	4,8	99,25
2027	171	35,3	51,29	163	31,0	49,16	8	4,3	85,12
2033	163	34,8	52,11	153	29,9	49,91	10	4,9	77,67
2039	152	33,4	52,86	142	29,1	50,96	10	4,4	74,97
2045	153	32,8	52,17	141	27,8	50,08	12	5,0	71,94
2051	225	33,4	43,48	217	29,0	41,28	8	4,4	81,52
2057	235	33,7	42,73	225	28,8	40,34	10	4,9	81,15
2063	230	33,6	43,14	222	28,8	40,61	8	4,9	87,90
2069	232	33,6	42,97	224	28,7	40,41	8	4,9	90,47
2075	237	33,7	42,56	228	29,1	40,26	9	4,6	83,24
2081	235	33,5	42,61	227	29,1	40,38	8	4,5	84,08
2087	236	33,7	42,63	230	29,0	40,11	6	4,6	98,08
2093	259	34,1	40,93	247	29,0	38,63	12	5,1	74,26
2099	272	33,9	39,83	263	28,8	37,38	9	5,1	82,81

Annexe 39 : Visualisation graphique du scénario Bêchefa – « ouvert » (2018–45–75–99)



Annexe 40 : Table de production pour le scénario Béchéfa – « ouvert »

Année	N _{Avant} Eclaircie	G _{Avant} Eclaircie	Dg _{Avant} Eclaircie	N _{Après} Eclaircie	G _{Après} Eclaircie	Dg _{Après} Eclaircie	N _{Eclaircie}	G _{Eclaircie}	Dg _{Eclaircie}
2018	177	35,0	50,16						
2021	177	36,7	51,38	171	31,9	48,79	6	4,8	99,25
2027	171	35,4	51,35	161	29,9	48,60	10	5,4	85,67
2033	161	33,7	51,58	152	27,9	48,32	9	5,8	90,57
2039	152	31,4	51,24	140	26,0	48,72	12	5,4	73,42
2045	152	29,6	49,85	143	26,0	48,06	9	3,6	73,78
2051	254	32,2	40,13	241	26,1	37,13	13	6,1	75,40
2057	251	30,6	39,37	240	25,7	36,92	11	4,9	74,29
2063	256	30,6	39,06	245	26,0	36,78	11	4,6	73,71
2069	267	31,1	38,49	258	26,0	35,82	9	5,1	83,17
2075	277	31,2	37,83	266	26,0	35,29	11	5,2	76,13
2081	283	30,8	37,21	275	25,9	34,61	8	4,9	88,36
2087	309	31,3	35,91	296	26,0	33,43	13	5,3	71,77
2093	345	31,8	34,26	322	26,1	32,12	23	5,7	56,19
2099	349	31,2	33,75	338	25,8	31,18	11	5,4	79,54

Simulation d'itinéraires sylvicoles innovants en vue de l'irrégularisation et la diversification des pessières ardennaises

Depuis la révolution industrielle, l'Epicéa est considéré en Europe tempérée comme l'essence de production par excellence. Pourtant, sa vulnérabilité face aux changements climatiques et la multifonctionnalité attendue aujourd'hui de la forêt font que sa sylviculture est de plus en plus décriée. Les multiples avantages de la futaie irrégulière mélangée en termes de résilience, font que la transformation dans ce sens d'une bonne partie des pessières ardennaise est à la fois prévisible et souhaitable. Toutefois, ce type de peuplement présente une complexité de gestion supérieure, qui associée au contexte futur incertain, rend utile le développement d'outils prévisionnels d'aide à la décision : les modèles forestiers. L'objectif de la présente étude est une mise en pratique d'Heterofor, un modèle basé sur les processus et individu-centré, pour simuler la croissance de pessières en voie d'irrégularisation. Le choix de trois cas d'étude réels, de structure et composition diverses, a permis d'aborder différentes problématiques d'intérêt (le choix de la méthode de transformation, la récolte de gros bois vieillissants et la gestion du mélange au sein de la régénération). L'apport de la modélisation a pu être démontré de par la diversité de scénarios qu'elle peut gérer, l'exhaustivité des comparaisons qu'elle permet entre ceux-ci, et la possibilité d'élargir facilement l'analyse à plusieurs dimensions (économie, stockage de carbone, résilience et biodiversité). La mise en pratique du modèle a également permis d'en détecter certains points nécessitant révision, tout en fournissant des pistes d'amélioration possibles.

Florent Raguzzi