

Le bouleau, *(Betula pendula ROTH et B. pubescens EHRH.)* **essence d'avenir en Europe** **occidentale ?**

Héloïse DUBOIS



COMMUNAUTÉ FRANÇAISE DE BELGIQUE
UNIVERSITÉ DE LIÈGE – GEMBLoux AGRO-BIO TECH

Le bouleau
(*Betula pendula* Roth et *B. pubescens* Ehrh.),
essence d'avenir en Europe occidentale ?

Héloïse DUBOIS

Dissertation originale présentée en vue de l'obtention du grade de docteur en
sciences agronomiques et ingénierie biologique

Promoteur : Pr Hugues Claessens

Année civile : 2022

Copyright

© DUBOIS Héloïse le 05/09/2022

Citation : DUBOIS Héloïse, 2022. Le bouleau (*Betula pendula* Roth et *B. pubescens* Ehrh.), essence d'avenir en Europe occidentale ? Thèse de doctorat, Gembloux Agro-Bio Tech – Université de Liège, Gembloux, 178 p.

Crédits photographiques :

Héloïse DUBOIS sauf autre mention.

Page de garde : photo cadre inférieur gauche ©Geoffroy Arnould ;

Photo cadre inférieur droit ©Didier Vieuxtemps.

Cette œuvre est sous licence Creative Commons. Vous êtes libre de reproduire, de modifier, de distribuer et de communiquer cette création au public selon les conditions suivantes :

- Paternité (BY) : vous devez citer le nom de l'auteur original de la manière indiquée par l'auteur de l'œuvre ou le titulaire des droits qui vous confère cette autorisation (mais pas d'une manière qui suggérerait qu'ils vous soutiennent ou approuvent votre utilisation de l'œuvre) ;
- Pas d'utilisation commerciale (NC) : vous n'avez pas le droit d'utiliser cette création à des fins commerciales ;
- Partage des conditions initiales à l'identique (SA) : si vous modifiez, transformez ou adaptez cette création, vous n'avez le droit de distribuer la création qui en résulte que sous un contrat identique à celui-ci. À chaque réutilisation ou distribution de cette création, vous devez faire apparaître clairement au public les conditions contractuelles de sa mise à disposition. Chacune de ces conditions peut être levée si vous obtenez l'autorisation du titulaire des droits sur cette œuvre. Rien dans ce contrat ne diminue ou ne restreint le droit moral de l'auteur.

Résumé

Cinq essences, souvent en peuplement monospécifique, composent près de 80 % du volume de bois sur pied des forêts d'Europe occidentale. Celles-ci souffrent de plus en plus du changement climatique et de bioagresseurs, confirmant la nécessité de les diversifier. Dans ce contexte, un nombre croissant de forestiers s'interroge sur l'intérêt du bouleau, qui colonise les trouées forestières, notamment après les coupes rases et chablis. L'objectif de la thèse est d'analyser quelles pourraient être les voies de valorisation des bouleaux verruqueux (*Betula pendula* Roth) et pubescent (*B. pubescens* Ehrh.) dans la gestion forestière et sur le marché du bois et, en regard des résultats, de proposer des recommandations sylvicoles.

Premièrement, la ressource en bouleau (**Chapitre 2**) a été décrite au niveau : a) de sa distribution et de son abondance par l'intermédiaire des inventaires forestiers disponibles ; b) de sa façon d'occuper les peuplements, à travers l'exemple de la Wallonie, avec les données de l'Inventaire Permanent des Ressources Forestières de Wallonie (IPRFW) ; c) de son évolution sur base de la littérature et des données de l'IPRFW. L'aire de distribution du bouleau est très étendue à l'échelle de l'Eurasie, principalement à base de bouleau pubescent dans le nord, où le bouleau est le principal feuillu, et de bouleau verruqueux dans les climats plus tempérés. En Europe occidentale, le bouleau représente de 0,5 à 6 % du volume forestier total selon le pays. En Wallonie, la boulaie pure concerne 30 % du volume de bouleau, et le restant se répartit dans des peuplements d'autres essences, surtout à base de chênes indigènes, dans les régénérations naturelles, les taillis et taillis sous futaie. Les bouleaux sans défaut apparent (nœud et branche) et de plus de 38 cm de diamètre sont rares (moins de 0,3 % du volume de bouleau). D'autre part, la ressource en bouleau s'accroît rapidement en volume et en surface occupée.

Deuxièmement, le potentiel du bouleau pour la gestion forestière et l'industrie du bois est analysé sur base de la littérature, et les résultats sont organisés selon ses atouts, faiblesses, opportunités et menaces (AFOM)(**Chapitre 3**). Parmi ses atouts, de nombreuses conditions climatiques lui conviennent ; il est performant sur une large gamme de sols ; il a une capacité d'adaptation physique aux modifications de son environnement et une grande diversité génétique ; à ce jour, il n'est pas sérieusement affecté par des ravageurs ou maladies ; il favorise la biodiversité ; il optimise le fonctionnement du sol ; il peut intégrer une diversité de peuplements mélangés et, en essence d'abri, il facilite le développement d'autres essences ; ses propriétés permettent des utilisations polyvalentes, également en bois d'œuvre, comme illustré par le marché très développé dans le Nord de l'Europe, les Pays baltes et la Russie. Ses faiblesses, telles que la grande sensibilité de sa cime à la compétition et de son bois à la pourriture, et son abondance dans les mélanges avec d'autres essences, doivent être maîtrisées par une sylviculture adaptée. Le contexte socio-économique et climatique lui offre des opportunités de colonisation dans les trouées forestières non replantées, ou dans lesquelles il est l'une des seules essences à résister au gibier. Il bénéficie également des politiques promouvant la diversification des forêts, et d'une perception favorable du public pour ses rôles

écologiques. Les principaux obstacles au développement du bouleau en Europe occidentale sont le manque d'information sur ses atouts et sur les utilisations de son bois, et l'absence de consignes de sylviculture adaptées à ses faiblesses, ainsi que des normes pour son utilisation en construction. Sur base de la ressource et de l'organisation de l'industrie, le forestier devrait viser la production rapide de grumes de haute qualité (de grande dimension et sans défaut). La sylviculture d'arbres-objectif (AO) permet d'optimiser la croissance diamétrique des AO désignés par le détournage et de contrôler leur qualité par l'élagage.

Troisièmement, nous avons analysé le développement de 704 AO détournés dans 38 régénérations naturelles denses de bouleau dans le sud de la Belgique et le nord-est de la France (**Chapitre 4**). Il en résulte que le bouleau peut atteindre un diamètre de 50 cm en moins de 60 ans. La modélisation de l'évolution du diamètre de cime indique que les AO de 40, 50 et 60 cm de diamètre forment respectivement des cimes d'environ 8, 10 et 12 m de large. Dans 3 sites, l'accroissement diamétrique des AO en réponse à différentes précocités de détournage est comparé à celui de bouleaux témoins. Sans intervention, l'accroissement diamétrique décline à cause de la compétition dès que le peuplement atteint l'âge de 4 à 5 ans. Avec le détournage dès cet âge, il est doublé, et pourrait rester supérieur à celui de bouleaux détournés plus tardivement pendant au moins 20 ans. Les bouleaux détournés après 9-12 ans semblent amoindrir durablement leur accroissement diamétrique, et pourraient ne jamais atteindre les dimensions nécessaires pour une utilisation en bois d'œuvre.

La discussion (**Chapitre 5**) commence par une réflexion sur le lien entre la science et les connaissances empiriques pour cette recherche. Deuxièmement, elle articule les acquis des 3 chapitres sous forme d'une suite de questions que peut se poser le gestionnaire forestier quant aux essences à favoriser. Le bouleau semble être une essence forestière d'avenir, d'un point de vue autécologique, pour ses fonctions écologiques et sylvicoles au service des autres essences, et pour la production rapide de bois et de PFNL, dans une gestion globale basée sur le mélange d'essences. L'utilisation industrielle de son bois, également en bois d'œuvre, est réaliste dans le contexte de l'Europe occidentale. Dès lors, nous proposons des consignes de sylviculture pour produire des grumes de haute qualité, et des consignes générales de gestion des peuplements comportant du bouleau. Enfin, des perspectives sont proposées. Du point de vue pratique, il faut sensibiliser et informer les gestionnaires forestiers et l'industrie du bois sur le potentiel du bouleau. Il est nécessaire d'éditer un guide de sylviculture, de proposer des formations techniques, et de développer des normes pour l'utilisation de son bois. Du point de vue de la recherche, il faudrait étudier le lien entre la productivité du bouleau et la station, multiplier les dispositifs expérimentaux de mesure de l'accroissement diamétrique pour pouvoir le modéliser, et créer des groupes de travail incluant les scientifiques, les gestionnaires forestiers et l'industrie du bois.

Abstract

Five tree species comprise nearly 80% of the forest standing stock volume in Western Europe, often in monoculture. These forests are increasingly suffering from climate change and bio-aggressors, confirming the need for forest diversification. In this context, birch colonising forest gaps, e.g., after clear-cuts or windfalls, may be an interesting tree species. The aim of the thesis is to analyse the potential of silver (*Betula pendula* Roth) and downy (*B. pubescens* Ehrh.) birch for forestry and the forest-based industry sector, and to provide silvicultural recommendations.

Firstly, we described birch resource (**Chapter 2**) in terms of a) distribution and abundance, using available forest inventories; b) stand structure and composition, through the example of Wallonia, using data from the Permanent Inventory of Forest Resources in Wallonia (IPRFW); c) evolution, based on literature and on the IPRFW data. Birch has a very wide distribution across Eurasia, dominated by downy birch in the north, where birch is the main hardwood species, and dominated by silver birch in temperate climates. In Western Europe, birch comprises 0.5-6% of the forest standing stock volume, depending on the country. In Wallonia, only 30% of the birch volume concerns pure birch stands. Most of the birch resource is distributed in all kinds of stand composed by other species, mostly with European oaks, and in natural regenerations and in coppice and coppice-with-standards forests. Birch stems with diameter at breast height (dbh) larger than 38 cm and with no visible defect (e.g., branches and knots) are rare (less than 0.3% of the standing stock volume). On the other hand, birch standing stock volume appears to rapidly increase over time.

Secondly, we analysed the potential of birch for forestry and the forest-based industry sector by compiling and discussing literature, and we organised the results according to its strengths, weaknesses, opportunities and threats (SWOT) (**Chapter 3**). Among the strengths, birch is suitable for a wide variety of climatic conditions; it performs well on a wide range of soils; it has the capacity to adapt physically to changes in its environment and it has a high genetic diversity; to date, it has not been seriously affected by pests or diseases; it promotes biodiversity; it optimises soil functioning; it can compose a variety of mixed stands, and as a nurse species, it facilitates the development of other tree species; wood properties allow versatile timber uses, as illustrated by the market in Northern Europe, in the Baltic States and in Russia. Foresters should manage its weaknesses, such as high sensitivity to crown competition and to wood decay, and its abundance in tree species mixtures. Socio-economic and climatic context offers opportunities to birch for colonising forest gaps that have not been planted or in which birch is one of the rare species to resist to game overpopulation. It also benefits from policies promoting forest diversification and from favourable public perception for its ecological roles. The main obstacles to birch development in Western Europe are the lack of information on its strengths and uses, the absence of silvicultural guidelines adapted to its weaknesses, and the lack of standards for wood use in construction. Based on birch resource and on industry's organisation, foresters should aim at the rapid production of high quality (large and free from defect) birch logs. Crop tree

silviculture is a means to optimise dbh growth by crown release and quality by pruning.

Thirdly, we analysed dbh growth and crown development of 704 crown released target birches in 38 dense birch natural regenerations in southern Belgium and north-eastern France (**Chapter 4**). We found that birch can reach a dbh of 50 cm in less than 60 years. Crown diameter evolution model indicates that target birches with a dbh of 40, 50 or 60 cm have a crown of about 8, 10 or 12 m wide, respectively. We also compared dbh growth of target birches in response to different crown release earliness in three subsamples. Without intervention, dbh growth declines due to competition as soon as the stand reaches the age of 4-5 years. With crown release at this age, dbh growth is doubled and could remain higher than that of birches later crown released, at least for 20 years. When crowns are released later than 9-12 years of age, birches appear to have reduced their dbh growth potential, and they may never reach the needed dimension for best timber uses.

The discussion (**Chapter 5**) begins with a reflection about the link between science and empirical knowledge in this research. Secondly, the chapter articulates findings of the three research through successive questions that the forester may ask when choosing which tree species to favour. Birch seems to be an interesting forest tree species, from an autoecological point of view, for its ecological and silvicultural functions at the service of other species, and to produce valuable wood. Industrial use of birch wood is realistic in the Western European context. We therefore proposed silvicultural guidelines for producing high-quality logs, and general management guidelines for common stands composed with birch. Finally, perspectives are proposed. From a practical point of view, there is a need to inform foresters and timber industry about the potential of birch and to develop guidelines and technical training about birch silviculture, and standards for the use of birch wood. Concerning research, we should study the link between birch productivity and site, add experimental plots for dbh growth measuring, and create working groups including scientists, foresters and timber industry.

Remerciements

Voici venue l'occasion de remercier les personnes qui ont contribué à l'aboutissement de cette aventure, très enrichissante, que fut ma thèse de doctorat.

Un immense merci à mon promoteur, **Hugues Claessens**. Tu m'as réellement inspirée lors de tes cours, ce qui m'a conduit à placer la forêt, que j'aimais déjà beaucoup, au rang de véritable passion. Tu m'as convaincue que la sylviculture pouvait allier la production du noble matériau qu'est le bois et les fonctions écologiques des forêts. Merci de m'avoir confié ce projet "bouleau", et de m'avoir laissé la liberté de le mener "à ma façon", au contact du terrain. Choisir un promoteur passionné, qui œuvre au service de la forêt, c'est s'exposer à des délais de lecture parfois longs, [...] longs... valorisés en précieuses années de croissance ligneuse, davantage d'expérience, et l'observation d'une évolution dans la considération du bouleau par les forestiers et industriels. Tu as imaginé que la combinaison de cette recherche appliquée et de mon tempérament pourrait aboutir à une thèse ... et tu avais raison. Hugues, merci d'être ce très bon promoteur, charismatique et pourtant incroyablement distrait et rigolo, ouvert, qui souhaite avant tout que ses doctorants se sentent en accord avec leur travail.

Merci aux techniciens de Gembloux, qui m'ont parfois accompagnée pour de belles journées de terrain, souvent hard mais nous aimons ce métier ! J'ai partagé avec vous de très beaux moments sylvicoles, mais aussi amicaux, en particulier avec **Benoit Mackels, Adrien Schot, Antoine Porsont, Allan Borremans, Cédric Geert, Alain Monseur, Hassan, Boris Lemaigre** et **Florentin Reginster**. Merci aussi à ceux qui sont partis avant mon arrivée, et qui ont contribué aux dispositifs installés en 2000.

Merci à **Nicolas Latte** qui m'a coachée lors de mes débuts, notamment pour l'analyse des données de l'IPRFW et l'élaboration de modèles de croissance, mais aussi dans la découverte du job de chercheur à Gembloux. J'ai toujours beaucoup de plaisir à discuter avec toi. Merci à **Gauthier Ligot**, mon coach sur la fin de thèse, jongleur de modèles appliqués à la réalité du terrain, et d'une aide précieuse pour que mes écrits puissent répondre à la rigueur scientifique, tout en évitant de me dénaturer. Tu aurais pu perdre patience, mais tu t'es toujours accroché pour me fournir de bons conseils et des relectures rapides, approfondies et judicieuses. Merci à tous les **collègues**, nous avons beaucoup discuté (et ri) de tout sujet, mangé des tartes, partagé des drinks ... cette ambiance qui fait la force de cette belle unité "*Forest is Life*", dans le cadre idyllique de l'abbaye de Gembloux. Merci spécial à **Marie Fombona** et à **Marie-Ange Golard**, sans qui la boutique ne saurait tourner.

Merci aux **ingénieurs et agents du DNF** avec lesquels j'ai eu de riches échanges, particulièrement **José Layon, Christophe Collin, Edwin Dufays, François Baar, Jules Lucy**... qui m'ont partagé leur ressenti, leur expérience, et m'ont accompagnée sur le terrain, dans le design, l'implantation et le suivi des dispositifs expérimentaux. Vous m'avez offert sans hésiter de votre précieux temps, et soutenue de la plus belle des manières, c'est-à-dire en croyant en ce projet.

Un merci très particulier à **José**, mon co-équipier dans toutes les réflexions, les voyages d'étude, la sylviculture, la prise de mesures et le bucheronnage, bénévole omniprésent par tous les temps. Mon *Abélard*, qui m'a en outre appris à lire les arbres, pour approcher la compréhension de leur histoire et de leurs besoins. Si proches et tellement complémentaires, dans notre vie professionnelle et de tous les jours. Et le plus beau des cadeaux, beaucoup d'amour, et un magnifique petit garçon de la forêt. Je vous aime très fort **Numa** et **José**.

Merci aux **propriétaires privés** qui m'ont partagé leurs réflexions, expériences et idées. Un merci plus particulier à mon ami **Hubert Dessain** qui attendait avec impatience cette journée ... et envoie depuis un bois céleste, ses questions vaches !

Merci à mon comité de thèse, **Adeline Fayolle**, **Gauthier Ligot**, **Jacques Hébert**, **Arnaud Monty** et **Yves Ehrhart** (AgroParis Tech), pour vos précieux conseils, notamment sur la rigueur scientifique et la structuration, pour votre écoute et votre patience. J'ai sincèrement beaucoup appris de vos remarques, toujours constructives. Merci à **Gauthier** et à **Arnaud** d'avoir poursuivi l'aventure au sein du Jury, et à **Kris Verheyen** (UGent) et à **François Ningre** (INRAe) de l'avoir complété. Votre regard expérimenté, et nouveau quant à mon manuscrit, a permis de vraiment en améliorer la compréhension. Merci également à **Patrick du Jardin** d'avoir magistralement présidé le Jury. Je suis ravie et honorée d'avoir retrouvé, pour cet événement important, un professeur emblématique de mes premières années d'études à Gembloux. Quelle chance d'avoir été accompagnée par vous tous.

Merci à l'**administration forestière du Service Publique de Wallonie (SPW-DGO3-DNF)** pour sa participation au financement du projet via l'**Accord-Cadre de Recherche et Vulgarisation forestières**. Pour votre enthousiasme et les discussions constructives, merci aux membres du comité ACRVF issus du **Département Nature et Forêt**, de l'**Université Catholique de Louvain**, de la **Société Royale Forestière de Belgique**, de **Forêt.Nature** et du **Département de l'Etude du Milieu Naturel et Agricole**.

Merci à **Georg Josef Wilhelm** (Allemagne, directeur technique des forêts), **James Wright** (France, ONF), **Wim Buysse** (Flandre, ANB), **Pentti Niemistö** et **Erkki Verkasalo** (Finlande, Luke), ... ainsi que vos collègues, vous qui m'avez accueillie sur vos terres, pour des échanges très constructifs ou collaborations.

Une thèse de sylviculture qui vise à valoriser une essence méconnue ne peut se faire sans le terrain et ses acteurs. **Sylviculteurs, ouvriers, naturalistes, transformateurs du bois**, ... je ne saurais vous citer tous, mais je vous remercie, y compris les plus sceptiques quant à l'intérêt du bouleau, car vous avez aussi apporté votre judicieuse réflexion. J'espère que ce travail permettra de vous offrir une vision nouvelle par rapport à cette essence.

Et puis merci à mes Poils (**Didi**, **Kekette**, **Rémy**, **Steph**, **Simon**, **Rox**) d'être qui vous êtes, maintenant avec des **Tendres** et quelques **Duvets** et **Poilus** en supplément. Mes biches **Floriane**, **Laura**, **Mélissa**, **Lisa**. **Simon** et **Romain**, mes chers amis. Merci aussi aux collègues **cyclistes**, quel remontant ces sorties vélo pour ravir une Ardennaise perdue en ville. Merci aux amis du train (**Fanny**, **Céline**, **Sabine**, **Didier**, ...), nous en avons partagé du temps !

Publications

Articles scientifiques

Dubois, H.; Verkasalo, E.; Claessens, H., 2020. Potential of Birch (*Betula pendula* Roth and *B. pubescens* Ehrh.) for Forestry and Forest-Based Industry Sector within the Changing Climatic and Socio-Economic Context of Western Europe. *Forests*, **11**, 336, 26p (<https://doi.org/10.3390/f11030336>)

Dubois, H.; Claessens, H.; Ligot, G., 2021. Towards silviculture guidelines to produce large-sized silver birch (*Betula pendula* Roth) logs in western Europe. *Forests*, **12**, 599, 14p (<https://doi.org/10.3390/f12050599>)

Articles de vulgarisation

Dubois, H.; Latte, N.; Lecomte, H.; Claessens, H., 2016. Le bouleau, une essence qui s'impose. Description de la ressource dans son aire de distribution. *Forêt.Nature* 140, pp 44-58

Dubois, H.; Latte, N.; Claessens, H., 2017. Les peuplements à bouleau en forêt wallonne : reflet de la sylviculture du 20^{ème} siècle. *Forêt.Nature* 142, pp 56-66

Ouvrage technique sylvicole

Dubois, H.; Layon, J.; Claessens, H., 2022. *Sylviculture novatrice d'une essence remarquable, le bouleau*. Éditions Forêt.Nature (parution en automne 2022)

Table des matières

Chapitre I. Introduction générale.....	1
1. Contexte de la thèse.....	1
1.1 L'évolution des principaux rôles attribués par l'homme à la forêt en Europe occidentale et les conséquences sur la composition forestière.....	1
1.3 L'effet des changements globaux.....	2
1.4 Les nécessaires adaptations de la gestion forestière.....	3
1.5 Le bouleau dans ce contexte.....	3
2. Objectif de la thèse.....	4
2.1 Cadre géographique de l'étude.....	6
2.2 Le bouleau – description succincte.....	7
Chapitre II. Description de la ressource en bouleau (<i>Betula pendula</i> ROTH et <i>B. pubescens</i> EHRH.).....	11
1. Introduction.....	13
2. Méthode.....	14
3. Résultats et discussions.....	16
3.1 Distribution naturelle du bouleau.....	16
3.2 Abondance de la ressource forestière en bouleau.....	17
3.3 Description des peuplements à bouleau : l'exemple de la Wallonie.....	19
3.4 Evolution de la ressource en bouleau.....	31
4. Conclusion.....	33
Chapitre III. Le potentiel du bouleau pour la gestion forestière et l'industrie du bois dans le contexte climatique et socio-économique changeant de l'Europe occidentale.....	37
1. Introduction.....	39
2. Méthode.....	39
3. Atouts.....	40
3.1 Adaptabilité.....	40
3.2 Croissance rapide et productivité élevée dans le jeune âge.....	41
3.3 Essence pionnière qui renforce la résilience et la biodiversité forestières.....	43
3.4 Propriétés visuelles, physiques et mécaniques de son bois.....	44
3.5 Valeur récréative des forêts.....	46
4. Faiblesses.....	46
4.1 Dégradation du bois liée à la senescence.....	46
4.2 Forte sensibilité du bois à la pourriture.....	46
4.3 Croissance en diamètre compromise par la compétition intraspécifique.....	48
4.4 Dégradations causées par des insectes.....	48
4.5 Arbre aéro-allergénique.....	49
5. Opportunités.....	50
5.1 Une place grandissante pour le bouleau.....	50
5.2 Production de bois de bouleau de valeur.....	53
5.3 Marchés de valorisation du bouleau.....	55
6. Menaces.....	61
6.1 Forte croissance juvénile à maîtriser en sylviculture.....	61
6.2 Maladies et ravageurs.....	62
6.3 Peu de demande en bouleau par les industries.....	62
6.4 Méconnaissance du bouleau de la part des forestiers.....	63
7. Discussion.....	63

8. Conclusions et perspectives.....	68
Chapitre IV. Croissance diamétrique de bouleaux bénéficiant d'une sylviculture d'arbre-objectif en Europe occidentale	71
1. Introduction	73
2. Matériel et Méthode	75
2.1 Sélection et description des sites d'étude.....	75
2.2 Sélection et soin des AO	80
2.3 Mesures	81
2.4 Analyses des données.....	82
3. Résultats	85
3.1 Analyse descriptive de l'évolution diamétrique	85
3.2 Développement de la cime	86
3.3 Effet de l'âge du premier détourage sur le diamètre du tronc	89
4. Discussion	102
4.1 Lacunes de l'échantillon et implications sur l'analyse des données	102
4.2 Développement de la cime des AO.....	103
4.3 Accroissement diamétrique selon l'âge du premier détourage.....	104
4.4 Objectif de production de bois	107
5. Conclusion.....	108
Chapitre V. Discussion, perspectives et conclusion.....	111
1. Méthodologie – un équilibre entre science et pratique.....	113
2. Le bouleau, essence d'avenir dans nos forêts de production ?.....	115
2.1 Le bouleau pourrait-il générer un revenu ?	115
2.2 Qu'est-ce qui fait du bouleau un choix intéressant pour la gestion d'une parcelle ?.....	119
2.3 Quelles sylvicultures pour le bouleau ?.....	122
3. Perspectives.....	131
3.1 Sensibilisation et formation.....	131
3.2 Recherche et développement.....	132
5. Conclusion.....	134
Références	137
Annexes	163

Liste des figures

Chapitre 1. Introduction générale

- Figure 1.1** Europe occidentale telle que délimitée selon la Division des Statistiques des Nations Unies.....**p6**
- Figure 1.2** Productivité du bouleau verruqueux (teinte des cellules) selon les niveaux trophique et hydrique du sol, selon le Fichier Ecologique des Essences (Petit et al., 2017).**p8**
- Figure 1.3** Productivité et survie du bouleau pubescent (teinte des cellules) selon les niveaux trophique et hydrique du sol, selon le Fichier Ecologique des Essences (Petit et al., 2017)**p9**

Chapitre 2. Description de la ressource

- Figure 2.1** Structure de l'unité d'échantillonnage de l'IPRFW et données relevées (adapté de Rondeux *et al.*, 2010)**p15**
- Figure 2.2** Aire de répartition (A) du bouleau verruqueux (potentiellement limité, selon certains botanistes, à l'Ouest du fleuve Yeniseï représenté schématiquement sur la carte) et (B) du bouleau pubescent. (Distribution dessinée sur base de Suszka *et al.*, 1994 ; Chuhina *et al.*, 2007a ; Chuhina *et al.*, 2007b ; Niemistö *et al.*, 2008 ; EUFORGEN 2009 ; Zare *et al.*, 2010 ; Global Forest Resource Assessment, 2015)**p16**
- Figure 2.3** Régions naturelles de Wallonie.....**p20**
- Figure 2.4** Distribution de la surface des peuplements à bouleau (mesuré et/ou décrit) selon la composition en essences (A) et la structure (B) du peuplement, la forme sous laquelle le bouleau se retrouve (C), la région naturelle de la Wallonie (D) et les habitats potentiels de la classification WalEUNIS (E). Proportion de la présence du bouleau dans la surface forestière selon la composition (A') ou la structure (B') du peuplement, et selon la région (D').**p21**
- Figure 2.5** Diagramme à flux illustrant la distribution (surface en hectare) des taillis sous futaie à bouleau (mesuré et/ou décrit) selon les trois compositions en essences les plus fréquentes (Chênaies, Autres feuillus et Feuillus nobles) et les différentes formes du bouleau (Taillis (T) ; Futaie (F) ; Régénération naturelle (RN)) (© Forêt.Nature).**p22**
- Figure 2.6** Diagramme à flux illustrant la distribution des boulaies (surfaces en ha) selon les structures de peuplement (dessous) et les différentes formes du bouleau (Brins du taillis (T) ; Futaie (F) ; Régénération naturelle (RN)) (© Forêt.Nature).**p23**
- Figure 2.7** Diagramme à flux illustrant la distribution (surfaces en ha) des pessières à bouleau (mesuré et/ou décrit) selon les structures de peuplement et les différentes formes du bouleau (Brins du taillis (T) ; Futaie (F) ; Régénération naturelle (RN)) (© Forêt.Nature).**p24**
- Figure 2.8** Abondants semis naturels et rejets de bouleau dans une plantation d'épicéas malgré leur coupe lors des dégagements.....**p25**

- Figure 2.9** Distribution de la surface des peuplements à bouleau (mesuré) par classe de proportion en surface terrière occupée par le bouleau.....p25
- Figure 2.10** Répartition des types de peuplements à bouleau (A) selon leur structure et la richesse en bouleau (pouvant être regroupés en 4 contextes sylvicoles du bouleau, conformément aux ellipses) et (B) selon la fertilité du milieu et la richesse en chêne.....p27
- Figure 2.11.** Type 10 de peuplement à bouleau, le taillis riche en bouleau.....p29
- Figure 2.12.** Types 16, 3 et 1 de peuplements à bouleau.....p30
- Figure 2.13.** Colonisations de plantations résineuses par le bouleau.p31
- Figure 2.14** Distribution des surfaces des nouveaux peuplements à bouleau en Wallonie selon les formes du bouleau (A) et les compositions en essences des peuplements à bouleau (B).....p32
- Figure 2.15.** Le bouleau (dont les feuilles ont pris leur teinte automnale jaune) colonise la plupart des trouées forestières et plantations d'autres essences.p34

Chapitre 3. Le potentiel du bouleau pour la gestion forestière

- Figure 3.1** Courbes de croissance en hauteur du bouleau dessinées à partir des modèles de (a) Frauendorfer (1954, Autriche), (b) Lockow (1997, Allemagne), (c) Eriksson (1997, Suède), (d) Diéguez-Aranda *et al.* (2006, Espagne) et (e) Hein *et al.* (2009, Allemagne).....p42
- Figure 3.2** A) cicatrisation saine après l'élagage d'une branche vivante de moins de 2 cm de diamètre ; B) l'élagage d'une branche un peu trop large a provoqué une pourriture, qui s'est ensuite étendue dans ce bouleau de 10 ans (vue après 5 ans de l'entrée, élargie probablement par des insectes) ; C) branche qui, des années après sa mort, subsiste dans le tronc et D) trou observé lorsqu'on détache cette branche ; E) une branche morte a causé une pourriture dans le tronc (coupe transversale) de ce bouleau de 7 ans).....p47
- Figure 3.3** Annelure provoquée par un frelon, qui fragilise la tige (© Hugues Claessens).....p48
- Figure 3.4** Traces provoquées par *Phytobia betulae* dans le cœur du bois (vue sur souche fraîchement coupée).p49
- Figure 3.5** Dans les territoires à très forte concentration de cervidé, le bouleau s'impose comme dernier rescapé pour la sylviculture, par exemple dans cette plantation de hêtre d'environ 15 ans.....p52
- Figure 3.6** Parquet réalisé en bouleau par un menuisier belge, avec de la ressource locale (© Geoffroy Arnould)p57
- Figure 3.7** Maison construite en Autriche avec des panneaux CLT de bouleau (© www.hhh.at)p57

Chapitre 4. Croissance diamétrique de bouleaux bénéficiant d'une sylviculture d'arbre-objectif en Europe occidentale

- Figure 4.1** Localisation des sites et gradient climatique (température annuelle moyenne et précipitations annuelles) dans la zone d'étude.p77
- Figure 4.2** Niveaux trophique et hydrique du sol des sites (identifiés par leur numéro) et productivité des bouleaux (teinte des cellules) sur la base du Fichier Ecologique des Essences (Petit *et al.*, 2017).....p78
- Figure 4.3** Evolution du d130 de bouleaux-objectif détournés (AO témoins exclus). Les lignes relient les mesures successives (points) d'un même AO.p85
- Figure 4.4** Nuage de points représentant le d130 des AO et le diamètre de leur cime. La ligne grise en trait plein représente les prédictions de notre modèle (Equation (1)) et celle en pointillés le modèle d'Hemery *et al.* (2005).....p86
- Figure 4.5** Illustration de 3 développements de cimes de bouleaux à différents stades de développement et bénéficiant d'une croissance libre (sur la dernière photo, les personnes se sont positionnées à l'aplomb de l'extrémité de la cime, afin de projeter son étendue au sol).....p88
- Figure 4.6** Évolution (A) du d130 (cm) et (B) de l'accroissement annuel en d130 (cm/an) des AO (moyenne en gras) de chaque traitement sylvicole du site 6. ...p90
- Figure 4.7** Boxplots de l'accroissement annuel moyen en d130 sur les intervalles d'âge 12-18, 19-25 et 26-32 ans pour chaque traitement du site 6. Les groupes significativement différents ont été distingués par le test de Tukey, et sont identifiés par des lettres différentes.....p91
- Figure 4.8** Évolution (A) du d130 (cm) et (B) de l'accroissement annuel en d130 (cm/an) des AO (moyenne en gras) de chaque traitement sylvicole du site 7.....p92
- Figure 4.9** Évolution (A) du d130 (cm) et (B) de l'accroissement annuel en d130 (cm/an) des AO (moyenne en gras) de chaque traitement sylvicole du site 8.....p93
- Figure 4.10** Evolution du d130 et de l'accroissement en d130 dans les sites 6, 7 et 8 selon les traitements. En A, superposition des courbes de croissance moyennes par site et par modalité de traitement (lignes plus épaisses) aux courbes de croissance de tous les individus échantillonnés jusqu'à 35 ans (issues de la figure 4.3). En B, courbes d'évolution de l'accroissement annuel moyen par site et par modalité.....p95
- Figure 4.11** La compétition a provoqué une importante mortalité des branches basses de ce jeune AO qui vient d'être détourné (le cerle rouge correspond à une hauteur de 1m30). L'élagage artificiel ne concernera que des branches mortesp106

Chapitre 5. Discussion, perspectives et conclusion

- Figure 5.1** Illustration schématique du lien entre la recherche scientifique et les connaissances empiriques dans la thèse (adapté de Lang *et al.*, 2012).p114
- Figure 5.2** Ressource en bouleaux de haute qualité dans la forêt de Blieskastel (Allemagne).....p120
- Figure 5.3** (A) densité typique de régénération naturelle du bouleau, (B) bouleaux naturellement isolés dès le départ ; (C) par l'élagage naturel, les branches mortes du bouleau subsistent sur le tronc ; (D) dans les régénérations naturelles diversifiées, le bouleau peut parfois étendre sa cime au-dessus des autres essences et bénéficier de la concurrence pour empêcher le grossissement de ses branches basses.....p126
- Figure 5.4** Les bouleaux en phase de sénescence ont un intérêt pour la biodiversité, et offrent des habitats à diverses espèces (©Daisy Demoor).....p129
- Figure 5.5** Proposition de consignes générales de gestion des peuplements comportant du bouleau selon l'âge du bouleau et sa proportion dans le peuplement, et les objectifs (production de bois et autres apports aux peuplements).p130

Liste des tableaux

Chapitre 2 : Description de la ressource

Tableau 2.1 Volume sur pied, proportion des deux espèces de bouleau et part occupée par le bouleau dans le volume forestier total et feuillu, par pays.....**p18**

Tableau 2.2 Types de peuplements comportant du bouleau (mesuré) et leurs caractéristiques distinctives moyennes. La distinction se fait selon la richesse en bouleau, la structure et la composition du peuplement, et la richesse trophique du milieu et/ou la région bioclimatique.....**p26**

Chapitre 3 : Le potentiel du bouleau pour la gestion forestière

Tableau 3.1 Propriétés physiques et mécaniques moyennes du bois de hêtre, de chêne, de bouleau et d'épicéa, déterminées sur des éprouvettes normalisées, selon Wagenführ et Scheiber 1985, *Heräjärvi 2002 (en Finlande), and **Boedts 2016 (en Belgique).....**p45**

Tableau 3.2 Synthèse des Atouts, Faiblesses, Opportunités et Menaces du bouleau pour la gestion forestière et l'industrie du bois dans le contexte changeant, climatique et socio-économique, de l'Europe de l'Ouest.**p66**

Chapitre 4 : Croissance diamétrique de bouleaux bénéficiant d'une sylviculture d'arbre-objectif en Europe occidentale

Tableau 4.1 Précipitations annuelles, température annuelle moyenne et altitude de chaque site.**p78**

Tableau 4.2 Description des données de chaque placette : modalité sylvicole traduite par l'âge du premier détournage ("-" = pas de détournage ; " * " = croissance libre sans sylviculture) et âge au premier mesurage ; âge auquel la largeur de la cime a été mesurée ; durée de suivi ("-" = une seule mesure) ; nombre d'AO et d130 moyen, minimal et maximal lors de la dernière mesure. En cas de pourriture du cœur, l'âge des bouleaux n'a pas été déterminé.....**p79**

Tableau 4.3 Synthèse du jeu de données des bouleaux-objectif détournés lors de leur dernière mesure (une seule mesure par arbre).....**p81**

Tableau 4.4 Paramètres du modèle à effets mixtes de prévision du diamètre de cime.....**p81**

Tableau 4.5 Valeurs de l'accroissement moyen en d130 par site, traitement et année de suivi. Les niveaux de p-value des tests ANOVA et Tukey sont indiqués (***) : p-value < 0,001 ; * : 0,01 < p-value < 0,05 ; n.s. (non significatif) : p-value > 0,05). Les groupes significativement différents sont distingués par des lettres.....**p94**

Liste des abréviations

AFOM	Atouts - Faiblesses - Opportunités - Menaces
AO	Arbre-objectif
CE	Conforme aux exigences de l'UE en matière de sécurité, de santé et de protection de l'environnement
CLT	Bois lamellés-croisés
d130	Diamètre du tronc à 1,30 mètre de hauteur
EHIA	European Hardwoods Innovation Alliance
EPD	Déclaration environnementale de produit
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FSC	Forest Stewardship Council
G	Surface terrière (m ²)
GHA	Surface terrière à l'hectare (m ² /ha)
GLT	Bois lamellés-collés
HDF	Panneau de fibres à densité élevée
Hcime	Hauteur de la cime vivante
Hdom	Hauteur dominante du peuplement
IPRFW	Inventaire permanent des ressources forestières de Wallonie
MDF	Panneau de fibres à densité moyenne
NHA	Nombre de tiges par hectare (ha ⁻¹)
OSB	Panneau à copeaux orientés
PEFC	Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes
PFNL	Produits forestiers non ligneux
SWOT	Strengths - Weaknesses - Opportunities - Threats
UE	Unité d'échantillonnage
VIH	Virus de l'immunodéficience humaine

La gestion forestière est un art qui demande des connaissances théoriques, des compétences techniques, une capacité d'observation et une faculté d'ajustement aux évolutions (climatiques, sanitaires, socio-économiques, technologiques ...). Une sylviculture qui fonctionnait autrefois peut aujourd'hui être vouée à l'échec, les interactions et les incertitudes sont nombreuses. Le respect des écosystèmes (sol, eau, biodiversité, ...) doit être au cœur de la démarche, et le projet réfléchi dans sa globalité, depuis le développement des jeunes arbres jusqu'à leur (éventuelle) récolte. Par ses actions, le forestier peut significativement améliorer les situations financière et écologique d'une forêt ... ou les détériorer, sur le long terme. Les fonctions écologiques, la production de bois, la rentabilité, la chasse, le tourisme... peuvent être réellement combinés.

Héloïse DUBOIS

1

Introduction générale



1. Contexte de la thèse

1.1 L'évolution des principaux rôles attribués par l'homme à la forêt en Europe occidentale et les conséquences sur la composition forestière

En Europe occidentale, avec une population humaine ne cessant de s'accroître, les surfaces forestières se sont considérablement réduites au cours des siècles, au profit du développement de l'agriculture et des villes. Les forêts étaient en outre (sur)exploitées pour les besoins en bois d'œuvre et d'énergie, mais aussi par le pacage et le soutrage. La surface forestière atteint son minimum en 1850, avec un taux de boisement estimé à 10-15 %. C'est à ce moment que, en France et en Belgique par exemple, les effets de plusieurs événements concomitants (nouveau code forestier imposant des restrictions à la surexploitation, amélioration de la productivité agricole, exode rural, déclin du marché européen du mouton, recours aux combustibles fossiles) ont graduellement diminué la pression exercée sur les forêts. Parallèlement, des campagnes de reboisement ont été menées, essentiellement monospécifiques et résineuses (d'abord pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.), puis épicéa (*Picea abies* (L.) Karst) dès la fin du 19^{ème} siècle), afin de produire, par exemple, le bois de mine et de construction et les poteaux, attendus par l'important développement socio-économique des 19^{ème} et 20^{ème} siècles. Les résineux, généralement plus productifs, ont aussi remplacé les feuillus sur des surfaces considérables. Une bonne partie du 20^{ème} siècle fut ainsi caractérisée par une gestion forestière orientée vers la production intensive de bois, basée sur quelques essences performantes, avec un recours fréquent au drainage, aux intrants, et parfois à la sélection génétique (Delhaise *et al.*, 1991 ; Cinotti 1996 ; Bossuyt *et al.*, 1999 ; Tallier 2004 ; Jacquemin *et al.*, 2014 ; Huffel *et al.*, 2019).

Dès la fin du 20^{ème} siècle, les considérations écologiques et sociales viennent compléter la politique de gestion forestière, jusque-là essentiellement vouée aux fonctions économiques. La coexistence harmonieuse des différentes fonctions de la forêt est au centre des règlementations (notamment dans les codes forestiers en France et en Belgique) et des labels mondiaux de gestion durable, tels que FSC (Forest Stewardship Council) et PEFC (Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes). L'importance de la biodiversité dans le fonctionnement de l'écosystème forestier est reconnu lors de la Convention de la Biodiversité au Sommet de la Terre à Rio de Janeiro (1992) et lors de la conférence d'Helsinki sur la protection des forêts en Europe (1993), tandis qu'en 2005, le Millenium Ecosystem Assessment (Reid 2005 ; Pesche 2013) met en avant les services rendus par les écosystèmes à la société, par exemple la régulation hydrologique, le recyclage des nutriments, ou le stockage de carbone (Duncker *et al.*, 2012 ; Felton *et al.*, 2016 ; CICES, 2018 ; Maebe *et al.*, 2019). Plus récemment, l'importance de la diversification des peuplements à plusieurs échelles (Decocq 2001 ; Messier *et al.*,

2019 et 2022), en particulier entre et au sein des essences, est reconnue pour favoriser la résistance et la résilience des forêts (Randin *et al.*, 2009 ; Duncker *et al.*, 2012 ; Brang *et al.*, 2014). De plus, la demande de récréation et de ressourcement en forêt, de la part d'un public non professionnel, prend de l'ampleur (Colson 2009), et s'est intensifiée à partir de l'été 2020 avec les confinements liés à la crise sanitaire du COVID.

Malgré les évolutions récentes des politiques forestières, la composition des forêts reste marquée par la gestion passée. Cinq groupes d'essences largement favorisées au 20^{ème} siècle, souvent sous forme de peuplements monospécifiques et équiennes, forment l'essentiel de la ressource : l'épicéa, les pins (surtout *Pinus sylvestris* L.), les chênes sessile (*Quercus robur* L.) et pédonculé (*Quercus Petraea* (Matt.) Liebl.), le hêtre (*Fagus sylvatica* L.), et le douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). Les inventaires forestiers nationaux (Global Forest Resource Assessment 2015) indiquent qu'elles composent à elles seules près de 80 % du volume de bois sur pied en Europe occidentale.

1.3 L'effet des changements globaux

Si, durant le dernier siècle, ces peuplements simplifiés ont satisfait les besoins en bois de la société, ils ont fragilisé la résistance des forêts (Piedallu *et al.*, 2009 ; Lindner *et al.*, 2010 ; Brang *et al.*, 2014 ; O'Hara *et al.*, 2016 ; Messier *et al.*, 2022) et montrent aujourd'hui clairement leurs limites. La plupart des modèles d'évolution de l'adéquation bioclimatique des essences prévoient par exemple que le hêtre et l'épicéa ne seront probablement pas adaptés aux conditions climatiques futures attendues en plaine (Badeau *et al.*, 2005 ; Falk *et al.*, 2013 ; Hannewinkel *et al.*, 2014), tandis que les sécheresses estivales à répétition provoquent d'ores et déjà des pertes de croissance (Latte *et al.*, 2016a) et des mortalités (Altman *et al.*, 2017 ; Leuschner 2020). D'autres crises sanitaires forestières ont émergé, telles que des dépérissements en chênaie indigène (Denman *et al.*, 2014), l'état sanitaire préoccupant du Douglas (Wilson *et al.*, 2020), la chalarose du frêne (*Fraxinus excelsior* L.) (Schumacher 2011) et les scolytes de l'épicéa (Sénécal *et al.*, 2020). Ce dernier phénomène, qui avait déjà inquiété les forestiers après les tempêtes des années 1990 (en Belgique et en Allemagne) et 1999 (en France), accentue depuis 2018 les mortalités d'épicéas en Europe occidentale et centrale (Netherer *et al.*, 2019) suite à plusieurs étés particulièrement chauds et secs. Par exemple, la commercialisation rapide d'une grande quantité de bois d'épicéa atteints par le scolyte (Netherer *et al.*, 2019) a eu pour conséquence un effondrement de son prix sur les marchés mondiaux (OEWB 2020 et 2021) entre 2018 et 2021, engendrant des pertes économiques pour les propriétaires touchés. Dans un futur proche, tous ces événements provoqueront inévitablement une modification de la répartition et de la proportion des essences forestières (Denman *et al.*, 2014 ; De Jaegere *et al.*, 2016). Les approvisionnements en bois de certaines essences pour l'industrie pourraient à un moment devenir critiques, alors que la demande est très forte (Berthold *et al.*, 2017 ; Bollmus *et al.*, 2017 ; Kleinschmit *et al.*, 2017).

1.4 Les nécessaires adaptations de la gestion forestière

L'âge optimal d'exploitation commerciale du bois des essences forestières est de l'ordre du siècle alors que le changement du climat et l'évolution des conditions socio-économiques ont des effets bien plus rapides et peu prévisibles, engendrant des incertitudes sur les actions à mener. La gestion des forêts de production de bois doit être adaptée dès maintenant, avant que des dépérissements n'imposent une modification profonde des paysages forestiers, avec pour conséquences des pertes économiques directes (valeur du bois) et indirectes (dérèglement de la filière économique, perte de services écosystémiques, *etc.*). Les recommandations scientifiques (Brang *et al.*, 2014, Messier *et al.*, 2019) et les politiques forestières (par exemple la conférence d'Helsinki, Himpens *et al.*, 2017, ou la Nouvelle Stratégie Forestière de l'UE pour 2030¹) mettent en avant la nécessité de diversifier les peuplements forestiers et d'élargir le panel d'essences avec des espèces *a priori* adaptées aux probables conditions futures (Hemery 2008 ; Messier *et al.*, 2022).

L'introduction d'essences exotiques pourrait en partie répondre à ce besoin. Néanmoins, celles-ci peuvent exprimer un comportement invasif néfaste aux écosystèmes et aux espèces indigènes, ou être le vecteur de l'importation de bioagresseurs, comme dans le cas de la chalarose (Dodet *et al.*, 2012), ce qui impose une phase d'étude préalable. En parallèle, le recours à des essences indigènes jusqu'à présent négligées par les gestionnaires forestiers et l'industrie du bois doit être envisagé et étudié. Parmi celles-là, nous pouvons citer les tilleuls (*Tilia cordata* Mill. et *Tilia platyphyllos* Scop.), l'aulne glutineux (*Alnus glutinosa*. (L.) Gaertn.), les saules (*Salix* sp.), le charme (*Carpinus betulus* L.), les sorbiers (*Sorbus* sp.) et autres fruitiers (*Prunus avium*, *Pyrus* sp., *etc.*), ou encore... le bouleau (*Betula pendula* Roth et *B. pubescens* Ehrh.).

1.5 Le bouleau dans ce contexte

En Europe occidentale, le bouleau fait partie de ces essences actuellement négligées par les acteurs de la filière bois. Cependant, son abondance et son dynamisme de recolonisation éveillent depuis peu la curiosité et suscitent des interrogations chez un nombre croissant de forestiers² et d'industriels, en recherche d'alternatives. Pourrait-on tirer profit de son abondante régénération qui colonise très souvent les trouées forestières (par exemple après coupe rase) et les jeunes plantations ? Aurait-il des atouts au service d'une gestion forestière d'avenir ?

¹ New EU Forest Strategy for 2030. Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions empty, COM/2021/572 final

² dans la thèse, le terme « forestier » englobe les propriétaires et gestionnaires forestiers lorsqu'il n'est pas utile de les différencier

2. Objectif de la thèse

Dans ce cadre, l'objectif de la thèse est d'analyser quelles pourraient être les voies de valorisation du bouleau dans la gestion forestière et sur le marché du bois. La démarche poursuivie est très appliquée car elle vise à apporter des éléments de réponse aux questionnements actuels des forestiers sur le terrain et des industries du bois. Etant donné qu'en Europe occidentale, les connaissances sur l'intérêt potentiel du bouleau sont rares, que sa sylviculture et sa valorisation sont exceptionnelles, et que les données de croissance diamétrique en lien avec la sylviculture sont quasiment inexistantes, la thèse est assez exploratoire. Elle permet aussi de cibler les besoins supplémentaires en termes de recherche et de développement.

Pour répondre à l'objectif, elle s'appuie successivement sur 3 questions qui font chacune l'objet d'un chapitre :

1. Quelle est la ressource en bouleau ? (**Chapitre 2**)

Il s'agit d'un état des lieux de sa ressource, en quantité et en qualité, qui pourra être utile pour mieux comprendre les freins à la valorisation de son bois et les opportunités de développement. Dans quelles régions le bouleau se distribue-t-il ? Comment se présente-t-il dans les peuplements forestiers ? Quelles sont les tendances d'évolution ? L'analyse débute par une synthèse des données d'inventaires forestiers nationaux pour identifier l'ampleur de la ressource dans son aire de distribution. Ensuite, les peuplements forestiers que le bouleau occupe seront décrits plus précisément, à travers l'exemple de la forêt wallonne, grâce aux données de l'inventaire forestier régional.

2. Quel est le potentiel du bouleau pour la gestion forestière et l'industrie du bois dans le contexte de l'Europe occidentale ? (**Chapitre 3**)

Alors que la ressource en bouleau est importante, et en développement (Question 1), la réponse à cette question prend tout son sens. Elle est par exemple préalable au développement d'une sylviculture spécifique à cette essence, et à la considération par les industriels du bois, qui s'interrogent sur de possibles essences alternatives. Le potentiel du bouleau est abordé au travers d'une revue de la littérature (scientifique et grise) et grâce à des rencontres avec des acteurs (scientifiques, forestiers, industriels) lors de visites de terrain et de réunions. Elle vise à identifier les forces et les faiblesses du bouleau, les opportunités de valorisation qui s'offrent à lui et les menaces qui pèsent sur son développement en forêt et au sein de la filière bois.

3. Comment évolue le diamètre de bouleaux verruqueux bénéficiant d'une sylviculture d'arbre-objectif en Europe occidentale ? (**Chapitre 4**)

Pour pouvoir produire des grumes de bois d'œuvre de bouleau (tel qu'identifiées à la Question 2), il est nécessaire de mieux comprendre sa croissance diamétrique en relation avec les interventions sylvicoles. Quel diamètre peut-il atteindre dans de bonnes conditions de croissance ? De

quel espace doit disposer sa cime pour répondre à cet objectif ? Quel est l'effet de l'âge du premier détourage sur la croissance diamétrique ? Des éléments de réponse seront apportés par l'analyse des données d'évolution diamétrique de bouleaux dans des peuplements et dans des dispositifs expérimentaux de sylviculture installés dans ce but.

Au regard de cette triple analyse, des recommandations générales de sylviculture, adaptées à la ressource, aux caractéristiques de l'essence et aux exigences du marché du bois, seront proposées (**Chapitre 5**).

En parallèle de la thèse, un guide technique de sylviculture a été rédigé en collaboration avec un gestionnaire forestier. Il bénéficie dès lors des acquis scientifiques, mais est aussi enrichi du recueil des expériences et observations réalisées par des particuliers et professionnels sur le terrain. Il sera publié par les Éditions Forêt.Nature en automne 2022 :

Dubois, H.; Layon, J.; Claessens, H., 2022. *Sylviculture novatrice d'une essence remarquable, le bouleau*. Éditions Forêt.Nature

2.1 Cadre géographique de l'étude

L'étude s'intéresse à la région de l'Europe occidentale, qui se compose, au sens de la Division des Statistiques des Nations Unies, de l'Autriche, la Belgique, la France, l'Allemagne, le Liechtenstein, le Luxembourg, Monaco, les Pays-Bas et la Suisse (Figure 1.1). A l'exception des régions au climat méditerranéen dans le sud de la France et à Monaco, qui sont peu concernées par le bouleau (Rameau *et al.*, 1994), les conditions bioclimatiques, la gestion forestière et l'organisation de l'industrie du bois y possèdent des similitudes qui justifient ce regroupement.

Par ailleurs, elle se limite à la forêt de production, c'est-à-dire celle où l'exploitation de bois pour des raisons économiques est possible, par opposition, par exemple, aux réserves intégrales et zones inaccessibles (IGN 2020).



Figure 1.1 Europe occidentale telle que délimitée selon la Division des Statistiques des Nations Unies.

2.2 Le bouleau – description succincte

Une cinquantaine d'espèces du genre *Betula* (famille des *Betulaceae*, ordre des *Fagales*) se distribuent dans l'hémisphère nord, sous forme d'arbre ou d'arbrisseau (Atkinson 1992). La thèse est consacrée aux bouleaux verruqueux (*Betula pendula* Roth) et pubescent (*Betula pubescens* Ehrh.), arbres qui, en Eurasie, dominent nettement le genre *Betula*, en termes de volume et de distribution, et représentent un intérêt commercial (Hynynen *et al.*, 2010). En Europe occidentale, ce sont ces deux espèces qui sont rencontrés en forêt (Rameau *et al.*, 1994).

Les bouleaux verruqueux et pubescent constituent une essence pionnière par excellence, caducifoliée et strictement héliophile. Elle possède une écorce blanche typique, et sa hauteur à maturité varie entre 20 et 30 mètres. Les caractéristiques de sa croissance en hauteur sont décrites dans le **Chapitre 3**, et sa croissance diamétrique est étudiée dans le **Chapitre 4**. Sa longévité ne dépasse généralement pas les 100 ans. Le bouleau est monoïque, et sa reproduction et sa dispersion sont anémochores (Rameau *et al.*, 1994 ; Hynynen *et al.*, 2010). En outre, il rejette très bien de souche. Sa croissance axiale est de type sympodiale, et il a la capacité de modifier l'architecture de sa cime (nombre et longueur des rameaux et densité de feuilles) en fonction de la compétition (Lintunen *et al.*, 2010).

Quelques caractéristiques morphologiques (Rameau *et al.*, 1994 ; Hynynen *et al.*, 2010) distinguent les bouleaux verruqueux et pubescent, respectivement :

- feuilles à limbe plutôt glabre, triangulaire et doublement denté ou plutôt losangique, légèrement pubescent et simplement denté ;
- rameaux verruqueux ou pubescents ;
- extrémité des branches devenant tombantes ou non ;
- tronc se crevassant à sa base avec l'âge ou non.

Cependant, ils peuvent présenter des caractères intermédiaires, compliquant leur détermination³. Dès lors, les informations et données disponibles (ressource, propriétés, croissance, ...) ne différencient pas toujours les 2 espèces. Leur hybride est en principe rare, à cause d'une incompatibilité biochimique, et quasiment stérile (Gill *et al.*, 1983) : le bouleau verruqueux est diploïde ($2n=28$) et le pubescent tétraploïde ($4n=56$).

C'est principalement par leur autécologie qu'ils se différencient. Le bouleau verruqueux est très frugal (Figures 1.2) : on le retrouve dans tout type de milieu, allant des sols très secs aux sols tourbeux, indépendamment de la richesse trophique. Cependant, sa productivité peut être limitée sur les stations très sèches ou très humides, mais des études supplémentaires sont nécessaire pour en préciser les limites. Les associations végétales dans lesquelles il se retrouve le plus fréquemment

³ Pour être exacte, la distinction entre ces deux bouleaux requiert l'immersion d'un fragment d'aubier dans une solution de 2,4 dinitrophenylhydrazine (2,4-DNPH), qui formera un précipité orange au contact du bouleau verruqueux uniquement (Lundgren *et al.*, 1995).

relèvent des chênaies acidophiles (*Quercion robori-petraeae*), des chênaies-charmaies (*Carpinion betuli*), des forêts alluviales (*Alno-Padion*) et du *Vaccinio-Piceion*. Le bouleau pubescent (Figures 1.3) tolère mieux que le verruqueux les conditions extrêmement humides, mais il ne supporte pas les conditions sèches. Ses associations végétales les plus courantes relèvent des aulnaies marécageuses (*Alnion glutinosae*), des boulaies tourbeuses (*Vaccinio-Betulion*) et des associations les plus hygrophiles du *Quercion robori-petraeae* et du *Carpinion betuli* (Rameau *et al.*, 1994 ; Hynynen *et al.*, 2010 ; Petit *et al.*, 2017). Toutefois, du fait de leur caractère pionnier, les bouleaux forment des boulaies de recolonisation dans tout type de condition (**Chapitre 2**).

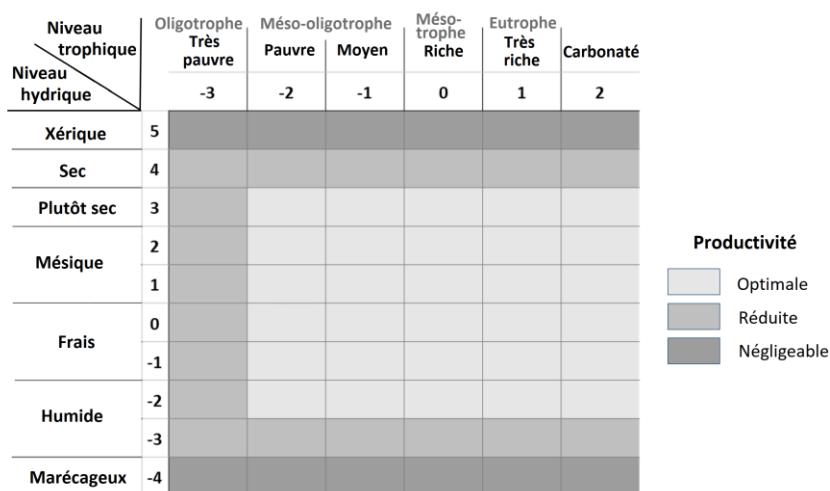


Figure 1.2 Productivité du bouleau verruqueux (teinte des cellules) selon les niveaux trophique et hydrique du sol, selon le Fichier Ecologique des Essences (Petit *et al.*, 2017).

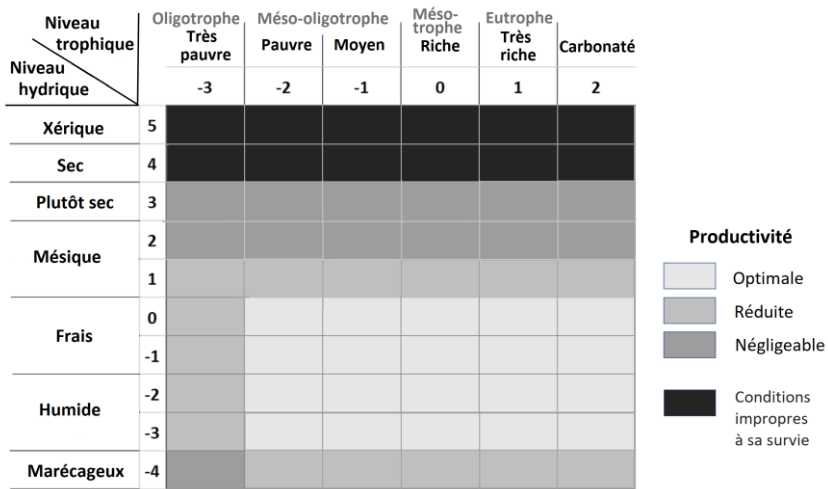


Figure 1.3 Productivité et survie du bouleau pubescent (teinte des cellules) selon les niveaux trophique et hydrique du sol, selon le Fichier Ecologique des Essences (Petit et al., 2017).

Malgré une densité légèrement supérieure dans le cas du bouleau verruqueux, les propriétés du bois des deux espèces sont assez similaires et n'impliquent pas de différenciation pour leur valorisation (Luostarinen *et al.*, 2000 ; Heräjärvi 2002 ; Hasegawa *et al.*, 2016). Les propriétés du bois et les valorisations du bouleau sont présentées dans le **Chapitre 3**.

Dans la thèse, les deux bouleaux sont repris ensemble sous le terme « bouleau », sauf lorsqu'il est utile de les différencier, par exemple lorsque l'on considère les aspects stationnels.

2

Description de la ressource en bouleau (*Betula pendula* ROTH et *B.* *pubescens* EHRH.)



Ce chapitre est adapté des articles de vulgarisation :

Dubois H., Latte N., Lecomte H. et Claessens H., 2016. Le bouleau, une essence qui s'impose. Description de la ressource dans son aire de distribution. *Forêt.Nature* 140, pp 44 – 58

Dubois H., Latte N. et Claessens H., 2017. Les peuplements à bouleau en forêt wallonne : reflet de la sylviculture du 20^{ème} siècle. *Forêt.Nature* 142, pp 56 – 66

1. Introduction

Son écorce blanche typique fait certainement du bouleau un arbre reconnu par tout néophyte, mais peu de gens, même parmi les forestiers, soupçonnent l'ampleur de sa présence dans les forêts. Dans ce chapitre, la ressource en bouleau (*Betula pendula* ROTH et *B. pubescens* EHRH.) est décrite à deux échelles : 1) la synthèse des données publiées par les inventaires forestiers nationaux et par la FAO permettent de dresser une vue globale de la distribution de la ressource à l'échelle de l'aire de distribution naturelle du bouleau ; 2) l'analyse statistique des données très précises de l'Inventaire Permanent des Ressources Forestières de Wallonie (IPRFW, Rondeux *et al.*, 2010), région sud de la Belgique, permet d'explorer le bouleau au sein même des peuplements. L'exemple de la Wallonie semble approprié pour donner une représentation assez conforme des peuplements à bouleau (en termes de structure, de composition et de conditions stationnelles) des forêts des plaines et collines d'Europe occidentale (Belgique, Luxembourg et une bonne partie de la France et de l'Allemagne), en regard des similitudes dans les conditions de croissance, telles que le bioclimat et le contexte géologique et pédologique, et dans la tradition sylvicole.

2. Méthode

A l'échelle de l'aire de distribution naturelle du bouleau, nous avons évalué la ressource et son évolution en synthétisant les données de volume de bois sur pied en bouleau des inventaires forestiers nationaux et des données disponibles sur internet, ou dans les rapports de la FAO (Global Forest Resource Assessment 2015).

A l'échelle wallonne, pour comprendre la manière dont le bouleau se présente dans les peuplements forestiers, nous avons reçu un accès à l'intégralité des données du premier cycle de mesures (1994-2008) de l'IPRFW, et pour décrire l'évolution de la ressource, nous avons comparé ces données avec la moitié des données du deuxième cycle (c'est-à-dire les placettes remesurées de 2008 à 2016), encore en cours. L'IPRFW est réalisé sur des unités d'échantillonnage (UE) permanentes réparties selon un maillage systématique de 500 m x 1000 m, ce qui correspond à une UE par 50 hectares, pour évaluer les 480 000 ha de forêt de production en Wallonie. Chaque UE est constituée d'un ensemble de placettes circulaires concentriques sur une surface de 40 ares (Figure 2.1), au sein desquelles des données sont récoltées, notamment la description globale du peuplement selon sa structure et sa composition, la circonférence des arbres, un relevé botanique et un sondage pédologique (Rondeux *et al.*, 2010). La circonférence est mesurée à 1,50 mètre du sol, et le seuil minimal de mesure est de 20 cm. La régénération naturelle de circonférence inférieure à 20 cm est décrite sur 4 placettes de 2,25 m de rayon. En outre, la description globale du peuplement sur l'entièreté de l'UE considère comme régénération naturelle les arbres franc-de-pied d'origine naturelle de circonférence inférieure à 70 cm. La présence du bouleau est donc, selon les UE, mesurée et/ou décrite dans la description globale du peuplement. Le volume estimé est le volume bois fort tige, c'est-à-dire jusqu'à une recoupe de 22 cm de circonférence. Notre analyse statistique descriptive a porté sur les UE situées en forêt de production et qui comptent au moins un bouleau (à l'exception des semis naturels repris dans le relevé botanique). Les données ont été analysées au moyen de statistiques descriptives univariées, puis au moyen d'une classification numérique hiérarchique agrégative (hierarchical clustering) des peuplements à bouleau, en considérant la distance de Gower modifiée (Sautot *et al.*, 2015 ; Sulc *et al.*, 2017), conformément à l'analyse qui avait été menée pour typer les peuplements à chênes indigènes (sessile et pédonculé) de Wallonie (Claessens *et al.*, 2010b). Sept variables ont été sélectionnées de façon à considérer des paramètres descriptifs quantitatifs et qualitatifs du peuplement et de la station, tout en limitant les interdépendances. Les variables qualitatives ont été converties en variables quantitatives grâce à une matrice de distances entre modalités (Annexe 2, selon Claessens *et al.*, 2010b).

Les 2 variables quantitatives sont :

- la surface terrière du peuplement, toutes essences confondues, qui traduit sa densité ;
- le coefficient de variation de la circonférence, qui est en relation avec la structure des peuplements.

Les 5 variables qualitatives sont :

- la richesse en bouleau, traduite par le pourcentage de surface terrière (G) qu'occupe l'essence dans le peuplement, distinguée en 3 classes ($G < 33\%$; $33\% \leq G < 66\%$; $G \geq 66\%$) ;
- la structure du peuplement selon la classification de l'IPRFW ;
- la composition en essences dominantes selon la classification de l'IPRFW ;
- les régions bioclimatiques (Van der Perre *et al.*, 2015) établies sur base de la température moyenne annuelle, des précipitations annuelles totales, du bilan hydrique climatique annuel et du pH moyen du sol ;
- les habitats potentiels, définis à partir du relevé phytosociologique et des caractéristiques abiotiques du milieu selon la typologie des habitats WaleUNIS, regroupés en 11 classes, qui traduisent les conditions écologiques dans lesquelles se développent les peuplements (Dufrêne *et al.*, 2005).

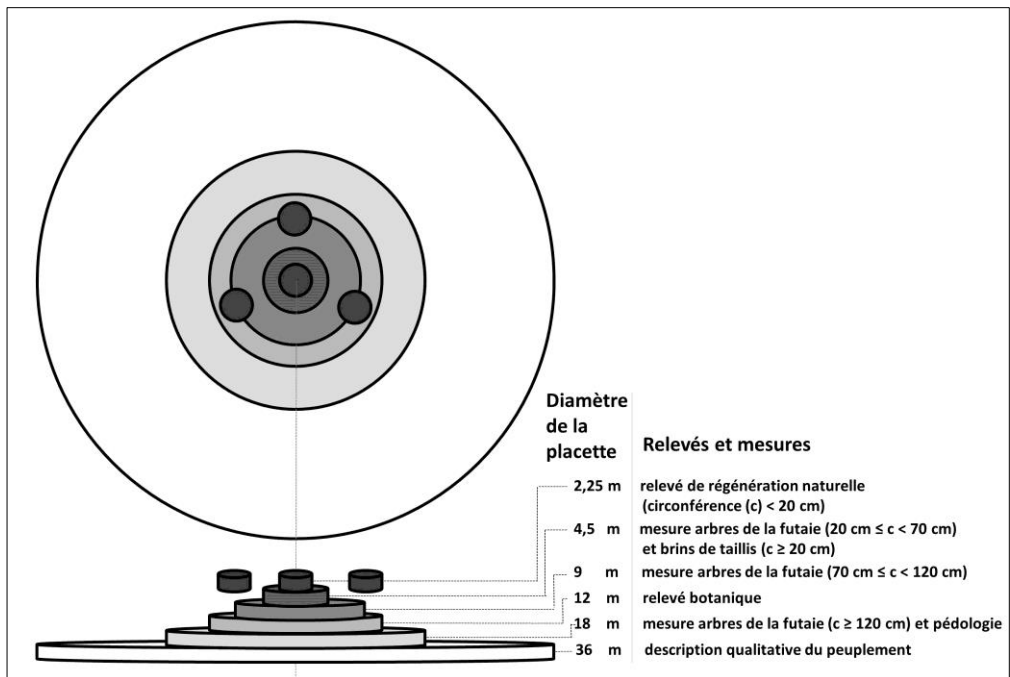


Figure 2.1 Structure de l'unité d'échantillonnage de l'IPRFW et données relevées (adapté de Rondeux *et al.*, 2010)

3. Résultats et discussions

3.1 Distribution naturelle du bouleau

L'aire de distribution du bouleau verruqueux (Figure 2.2A) s'étend très largement en Eurasie, depuis l'Atlantique jusqu'au Kamtchatka mais également en Chine et au Japon, en passant par le nord de la Turquie et le Caucase, jusqu'en Iran. Toutefois, la limite orientale vers l'océan Pacifique est discutée car dans l'extrême est asiatique, *Betula platyphylla* est dominant. *Betula pendula* et *Betula platyphylla* sont très proches phylogénétiquement, ce qui vaut au dernier d'être considéré par certains botanistes comme une variante du bouleau verruqueux, dont la forme des feuilles diffère entre l'Est et l'Ouest du fleuve Yenisei (Perala & Alm 1990, Tsuda *et al.*, 2017). Ils possèdent d'ailleurs une grande zone d'hybridation (Tsuda *et al.*, 2017). En termes de latitude, le bouleau verruqueux s'étend depuis le nord de l'Europe jusqu'au Maroc, mais dans le sud de son aire, il se cantonne principalement aux étages collinéen et subalpin. En montagne, on le retrouve jusqu'à 2 500 m d'altitude. Il est cependant absent en Islande et, globalement, dans les zones les plus septentrionales des pays nordiques, où le bouleau pubescent domine (Figure 2.2B).

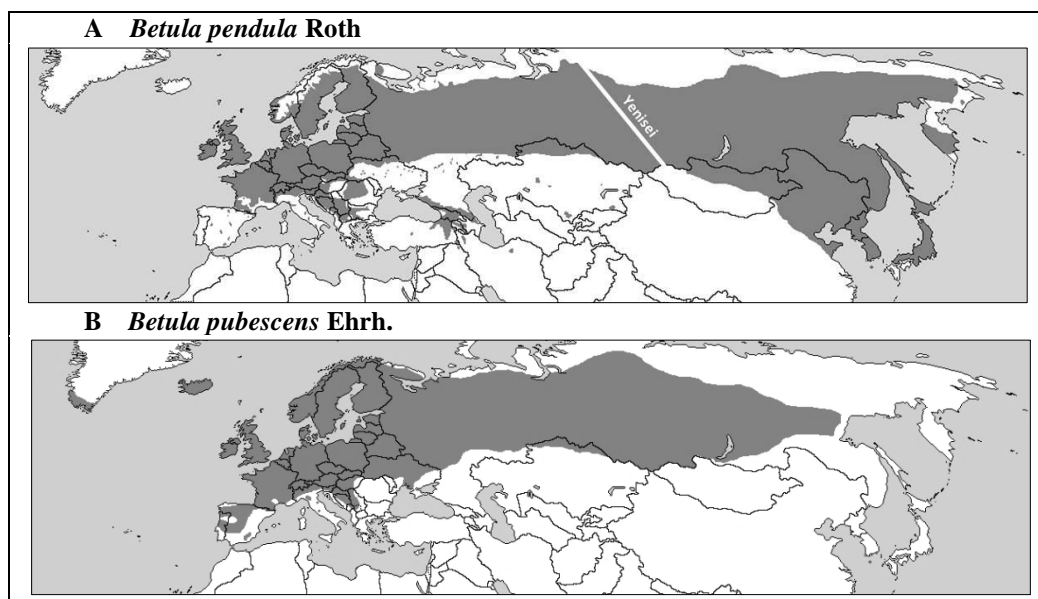


Figure 2.2 Aire de répartition (A) du bouleau verruqueux (potentiellement limité, selon certains botanistes, à l'Ouest du fleuve Yenisei, représenté schématiquement sur la carte) et (B) du bouleau pubescent (distributions dessinées sur base de Suszka *et al.*, 1994 ; Chuhina *et al.*, 2007a ; Chuhina *et al.*, 2007b ; Niemistö *et al.*, 2008 ; EUFORGEN 2009 ; Zare *et al.*, 2010 ; Global Forest Resource Assessment, 2015)

Le bouleau pubescent s'étend également largement en Eurasie, mais est plus nordique, grâce à sa meilleure résistance aux conditions froides et humides. Il est cependant aussi présent dans la péninsule ibérique. On le retrouve de l'océan Arctique au nord jusqu'à la Léna en Sibérie (Suszka *et al.*, 1994 ; Chuhina *et al.*, 2007a ; Chuhina *et al.*, 2007b ; Niemistö *et al.*, 2008 ; EUFORGEN 2009 ; Zare *et al.*, 2010 ; Global Forest Resource Assessment, 2015). Ces 2 espèces de bouleau figurent parmi les essences forestières avec les plus grandes aires de distribution en Europe (EUFORGEN 2009).

3.2 Abondance de la ressource forestière en bouleau

Le tableau 2.1 synthétise, pour les pays où l'information est disponible, le volume de bois de bouleau sur pied en forêt, la proportion des deux espèces lorsque elles sont distinguées, et la part occupée dans le volume forestier total et feuillu (sur base de Brändli 2010 ; Área de Inventario y Estadísticas Forestales, 2011 ; National Forest Inventory of Great Britain, 2011 ; Forest Service of Ireland 2013 ; IGN, 2013 ; Abegg *et al.*, 2014 ; Schmitz *et al.*, 2014 ; Global Forest Resource Assessment, 2015 ; Statistics Estonia, 2016). En raison des divergences entre les méthodes d'évaluation (taux et méthode d'échantillonnage, seuil de mesure, distinction des espèces, *etc.*) selon les pays, la précision des données rassemblées peut varier, de telle sorte que les comparaisons entre les pays sont délicates. Même les données de la FAO, d'apparence homogène, résultent de ce qui a été communiqué par les différents pays, et donc toujours avec leur propre précision. Dans les régions où le bouleau est considéré comme « d'intérêt mineur », il n'est parfois pas repris comme essence à part entière, par exemple en Autriche, ou est confondu avec d'autres essences, comme en Allemagne.

La ressource en volume de bouleau sur pied est de l'ordre de 17 milliards de m³, majoritairement composée en bouleau pubescent dans la zone boréale et en bouleau verruqueux en Europe tempérée (Tableau 2.1). Dans la partie orientale (Russie, Chine, Corées), d'autres espèces du genre *Betula* contribuent au volume estimé.

Environ 90 % de la ressource, soit près de 15 milliards de m³, se situe dans les pays du nord de l'Europe (Norvège, Finlande, Suède) et en Russie. Le bouleau y représente jusqu'à 18 % de la ressource nationale en bois et constitue la première essence feuillue. Dans la zone boréale, le bouleau est l'un des rares feuillus à pouvoir se développer. Par l'importance du bouleau dans leurs forêts, qui représente de 17 à 26 % de la ressource nationale, les Pays baltes et la Biélorussie peuvent être assimilés à cette zone nordique.

L'Europe de l'Est, où le bouleau est souvent la seconde essence feuillue, comptabilise plusieurs centaines de millions de m³.

L'Europe occidentale (avec le Royaume-Uni, l'Irlande et l'Espagne) rassemble moins de 1 % du volume de bouleau. Il représente de 0,5 à 6 % du volume forestier total selon le pays. Au sud, l'Espagne se démarque avec un volume de 4 millions de m³, dont 85 %, principalement pubescent, se situent en Galice (zone atlantique).

Tableau 2.1 Volume sur pied, proportion des deux espèces de bouleau et part occupée par le bouleau dans le volume forestier total et feuillu, par pays.

	Volume de bouleau sur pied (10 ⁶ m ³)	Part de bouleau		% de bouleau sur le volume	
		verruqueux	pubescent	total	feuillu
Europe du Nord et Russie					
Russie	13 738 ⁽¹⁾			17	57
Finlande	388	25 %	75 %	17	90
Suède	313	25 %	75 %	11	65
Norvège	191	5 %	95 %	18	64
Danemark	5			4	6
Islande	< 1 ⁽²⁾	0 %	100 %	18	53
Pays baltes					
Lettonie	149			24	52
Estonie	126			26	49
Lituanie	82		Dominant	17	39
Europe de l'est					
Biélorussie	309	Dominant		20	60
Pologne	154	Dominant		6	20
Ukraine	92			4	9
Tchéquie	10			1	7
Europe occidentale					
Allemagne	< 220 ⁽³⁾			< 6	< 15
France	44			2	3
Belgique	6			3	5
Pays-Bas	4			6	12
Suisse	3	Dominant		< 1	2
Luxembourg	< 1			< 1	< 1
Royaume uni	21			4	9
Espagne	4		Dominant	< 1	1
Irlande	3			3	18
Asie					
Chine	894 ⁽⁴⁾			6	10
Mongolie	84				95
Kazakhstan	81	Dominant		22	65
Corée du Nord	16 ⁽⁵⁾			4	8
Corée du Sud	< 1 ⁽⁵⁾			< 1	< 1

(1) Une dizaine d'espèces de bouleau recensées mais majorité de bouleau verruqueux et pubescent

(2) Sans seuil minimal de mesure, le bouleau pubescent est la première espèce d'Islande (0,2 million de m³ ; 61 % du volume total) mais avec un seuil de 10 cm de diamètre, il est relégué à la 3^{ème} place (50.000 m³ ; 18 % du volume total) traduisant la grande quantité de tiges de faible dimension dans ce pays (3) « feuillus à courte durée de vie » (4) Plusieurs espèces de bouleau recensées (5) *Betula pendula* et *Betula platyphylla* confondus.

3.3 Description des peuplements à bouleau : l'exemple de la Wallonie

3.3.1 Analyse descriptive

En forêt wallonne, le volume de bois sur pied est évalué à 116 millions de m³, dont 60 millions de m³ en résineux et 56 en feuillus. Le bouleau (verruqueux et pubescent confondus)⁴, avec 3,4 millions de m³, est la troisième essence feuillue, loin derrière les chênes indigènes (23 millions de m³) et le hêtre (14 millions de m³). Le volume de bouleau est constitué à 79 % d'arbres de futaie et à 21 % de brins de taillis. Il se distribue en grande partie (70 %) dans des peuplements où il n'est pas l'essence dominante. La boulaie (composée de bouleau pour au moins deux tiers de la surface terrière) ne représente qu'1 million de m³.

La présence du bouleau est décrite sur 120 000 ha, ce qui correspond à 25 % de la forêt productive, et mesurée sur 62 000 hectares (surfaces estimées par extrapolation des UE). Les peuplements comportant du bouleau sont très variables en ce qui concerne la composition des essences, la structure du peuplement ou la forme du bouleau. Par exemple (bouleau mesuré et/ou décrit) :

- la boulaie concerne 11 000 ha, ce qui ne correspond qu'à 9 % de la surface des peuplements où le bouleau est présent. La chênaie constitue 23 % de la surface des peuplements où le bouleau est présent, suivie par les autres feuillus (21 %). Seulement 5 % des surfaces occupées par les bouleaux sont des hêtraies (Figure 2.4A) ;
- un tiers des pineraies et des chênaies comportent du bouleau, probablement en raison de l'ambiance lumineuse des peuplements qui favorise cet héliophile strict, et à contrario, le bouleau n'est présent que dans seulement 14 % des hêtraies, plus sombres (Figure 2.4A') ;
- les peuplements comportant du bouleau sont surtout des taillis sous futaie (39 % des cas) et des futaies matures (32 %), et dans seulement 5 % des cas, des taillis (Figure 2.4B) ;
- le bouleau est présent dans plus de la moitié des surfaces de régénérations naturelles⁵, dans 44 % des taillis et dans 40 % des taillis sous futaie. Cela est vraisemblablement lié au gradient de lumière (périodique dans le taillis) entre ces différentes structures. Sa plus faible occurrence dans les

⁴ Selon l'Atlas de la flore de Wallonie, le bouleau verruqueux est largement majoritaire. Le bouleau pubescent domine quant à lui les milieux extrêmement humides comme les tourbières de Haute-Ardenne.

⁵ La plantation ou régénération naturelle, la jeune futaie et la futaie se distinguent par la circonférence moyenne des arbres, qui est respectivement inférieure à 20 cm, comprise entre 20 cm et 70 cm en résineux et 90 cm en feuillus, supérieure à 70 cm en résineux et à 90 cm en feuillus. Le taillis est composé de cépées (ensemble de troncs, appelés brins de taillis, issus du rejet d'une même souche). Le taillis sous futaie est constitué d'un étage supérieur d'arbres franc-de-pied (la futaie) et d'un étage inférieur composé de cépées (le taillis).

- jeunes plantations (19 %) s'explique probablement par les dégagements réalisés en faveur des essences plantées (Figure 2.4B') ;
- alors que 15 % des surfaces contenant des bouleaux sont des pessières (Figure 2.4A), 13 % des pessières contiennent du bouleau (Figure 2.4A') ;
 - dans un peuplement, le bouleau peut se retrouver sous différentes formes : en tant que régénération naturelle (62 %), parfois accompagnée d'arbres de la futaie et/ou de brins de taillis ; en arbre de la futaie (franc-de-pied) uniquement (25 %) ; en brin de taillis uniquement (13 %) (Figure 2.4C).

Le bouleau est présent dans toutes les régions de la Wallonie. La majorité (59 %) de la surface occupée par des peuplements à bouleau se situe en Ardenne (Figure 2.3 et 2.4D), soit sur environ 70 000 ha, mais il s'agit de la région naturelle la plus boisée du pays. La forêt condrusienne, proportionnellement plus feuillue, est la plus riche en peuplements à bouleau, lesquels représentent 38 % de sa surface forestière contre 26 % en Ardenne, par exemple (Figure 2.4D').

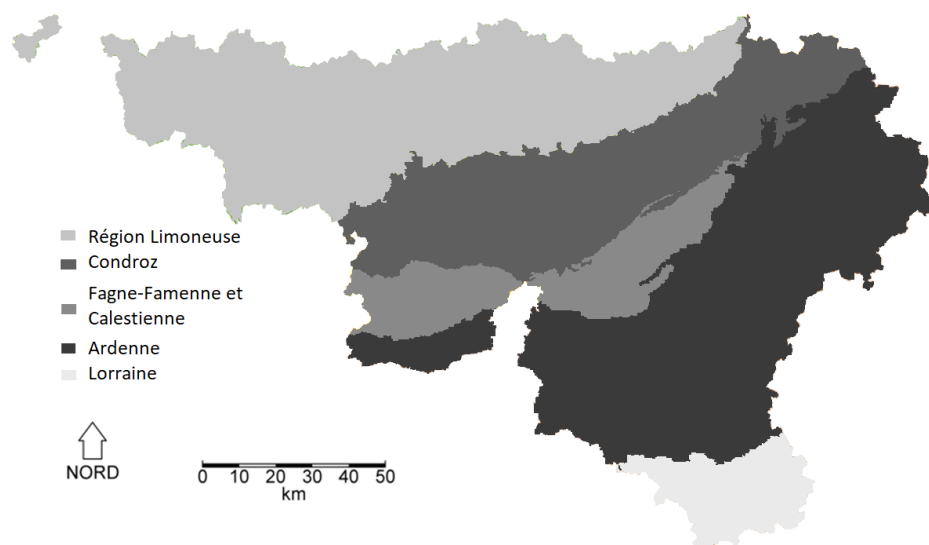


Figure 2.3 Régions naturelles de Wallonie.

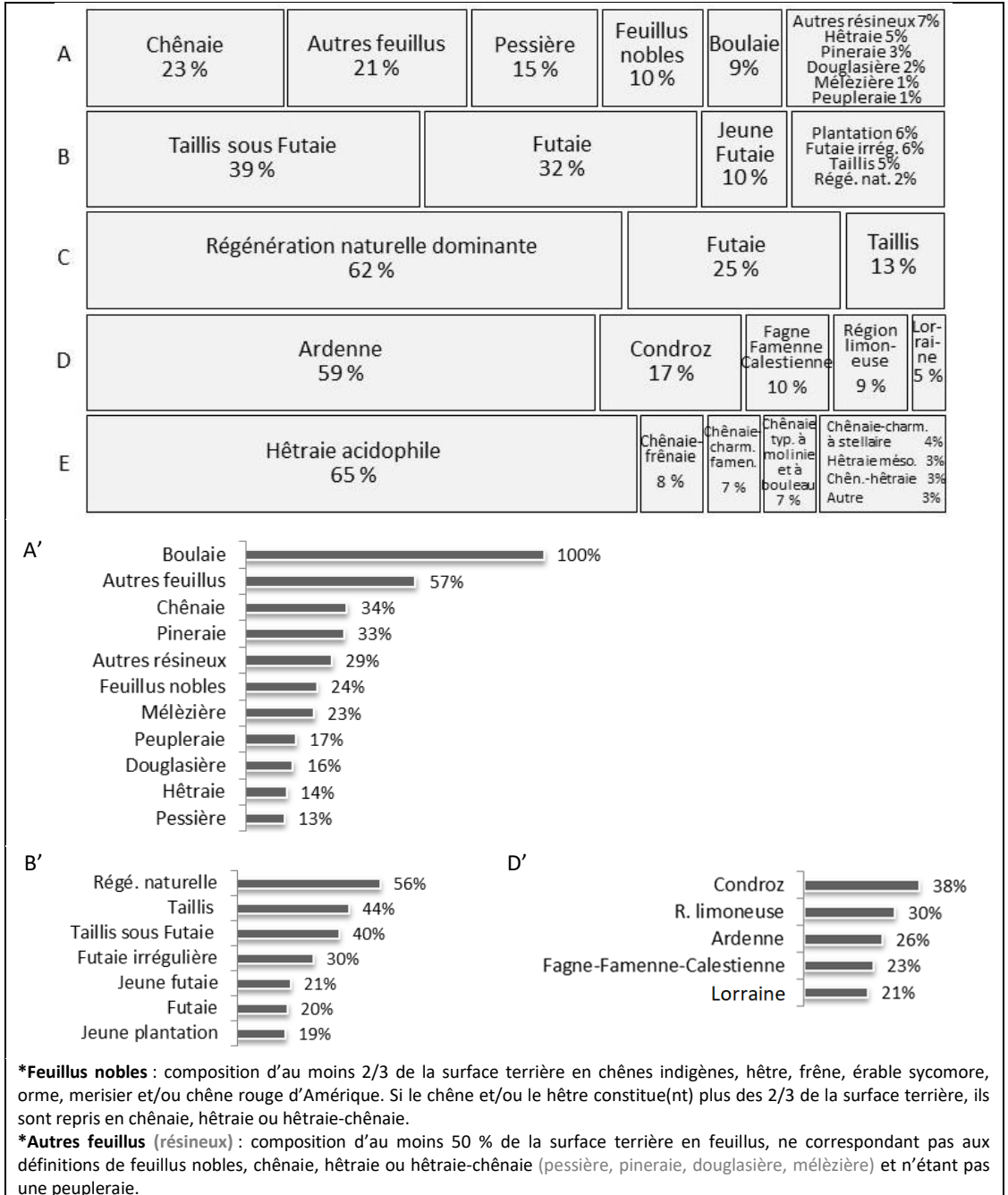


Figure 2.4 Distribution de la surface des peuplements à bouleau (mesuré et/ou décrit) selon la composition en essences (A) et la structure (B) du peuplement, la forme sous laquelle le bouleau se retrouve (C), la région naturelle de la Wallonie (D) et les habitats potentiels de la classification WaleUNIS (E). Proportion de la présence du bouleau dans la surface forestière selon la composition (A') ou la structure (B') du peuplement, et selon la région (D').

Trois peuplements ont été analysés en détail : 1) les taillis sous futaie, car il s'agit de la structure dans laquelle se répartissent la majorité des peuplements à bouleau. La forme prise par le bouleau est croisée avec les compositions chênes, feuillus nobles et autres feuillus, qui sont les essences l'accompagnant le plus souvent ; 2) les boulaies ; 3) les pessières, troisième type de composition qu'occupe le bouleau alors qu'elles ont généralement été entretenues pour empêcher son installation.

Dans les taillis sous futaie (Figure 2.5), le bouleau fait essentiellement partie de la réserve (arbres de la futaie) ou a été décrit en tant que régénération naturelle au sens large (jusqu'à une circonférence de 70 cm). Il prend plus rarement la forme de taillis, surtout lorsqu'il accompagne les feuillus nobles.

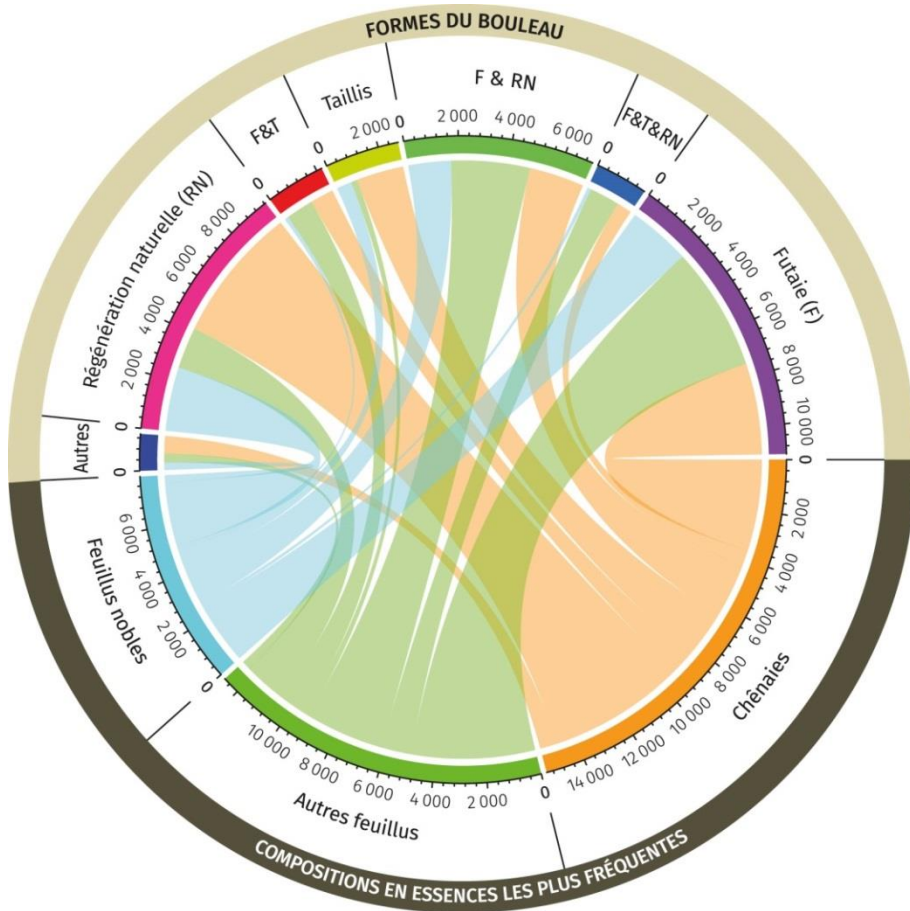


Figure 2.5 Diagramme à flux illustrant la distribution (surface en hectare) des taillis sous futaie à bouleau (mesuré et/ou décrit) selon les trois compositions en essences les plus fréquentes (Chênaies, Autres feuillus et Feuillus nobles) et les différentes formes du bouleau (Taillis (T) ; Futaie (F) ; Régénération naturelle (RN)) (© Forêt.Nature).

Dans les boulaies (Figure 2.6), la régénération du bouleau concerne le taillis sous futaie et les jeunes phases de la futaie (jeune futaie et régénération qui sont par

définition la régénération elle-même). Le bouleau ne se régénère quasiment pas sous lui-même en futaie mature, et uniquement par rejet de souche en taillis.

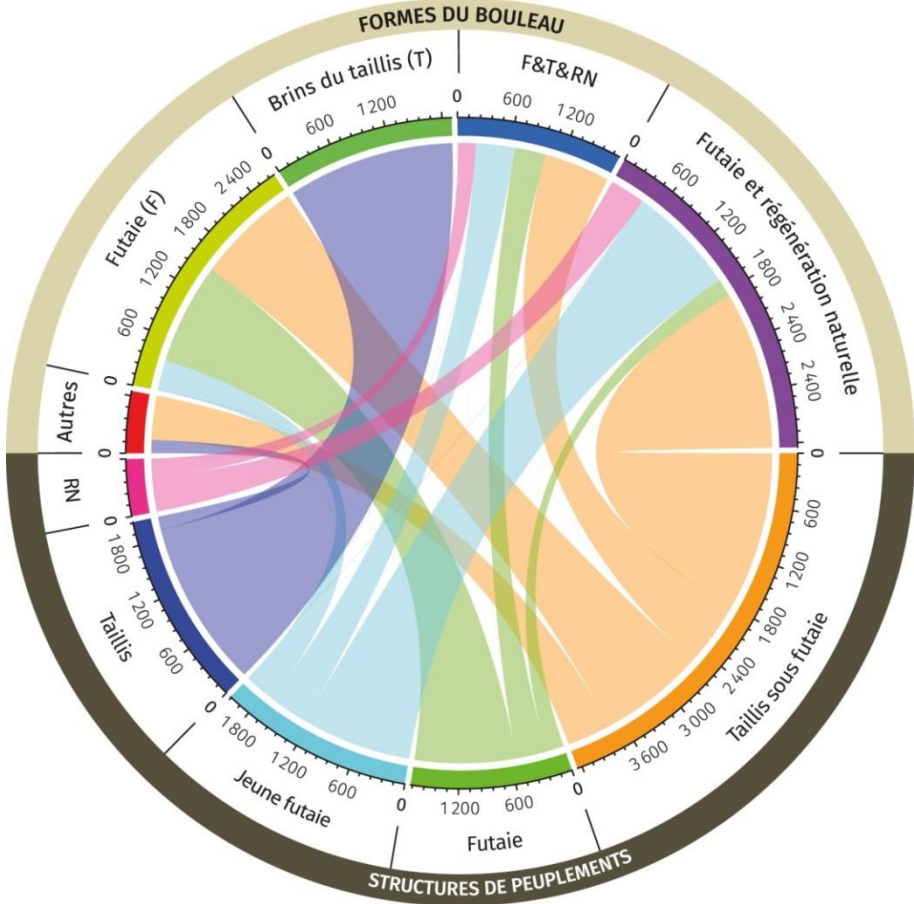


Figure 2.6 Diagramme à flux illustrant la distribution des boulaies (surfaces en ha) selon les structures de peuplement (dessus) et les différentes formes du bouleau (Brins du taillis (T) ; Futaie (F) ; Régénération naturelle (RN)) (© Forêt.Nature).

La majorité de la surface des pessières à bouleau (Figure 2.7) consiste en des futaies matures d'épicéas colonisées par de la régénération naturelle (au sens large) de bouleau, qui a probablement pu profiter de trouées de chablis ou de scolytes, ou qui a réussi à subsister malgré les dégagements et nettoisements de la parcelle, généralement fréquents en début de révolution. Le bouleau se régénère généralement abondamment dans les jeunes pessières (Figure 2.8) qui, en Wallonie, sont presque exclusivement issues de plantations. Près d'un tiers des stades allant de la plantation jusqu'à la jeune futaie contiennent du bouleau. Les cépées résultent probablement de rejets de souches de semis naturels coupés lors des dégagements.

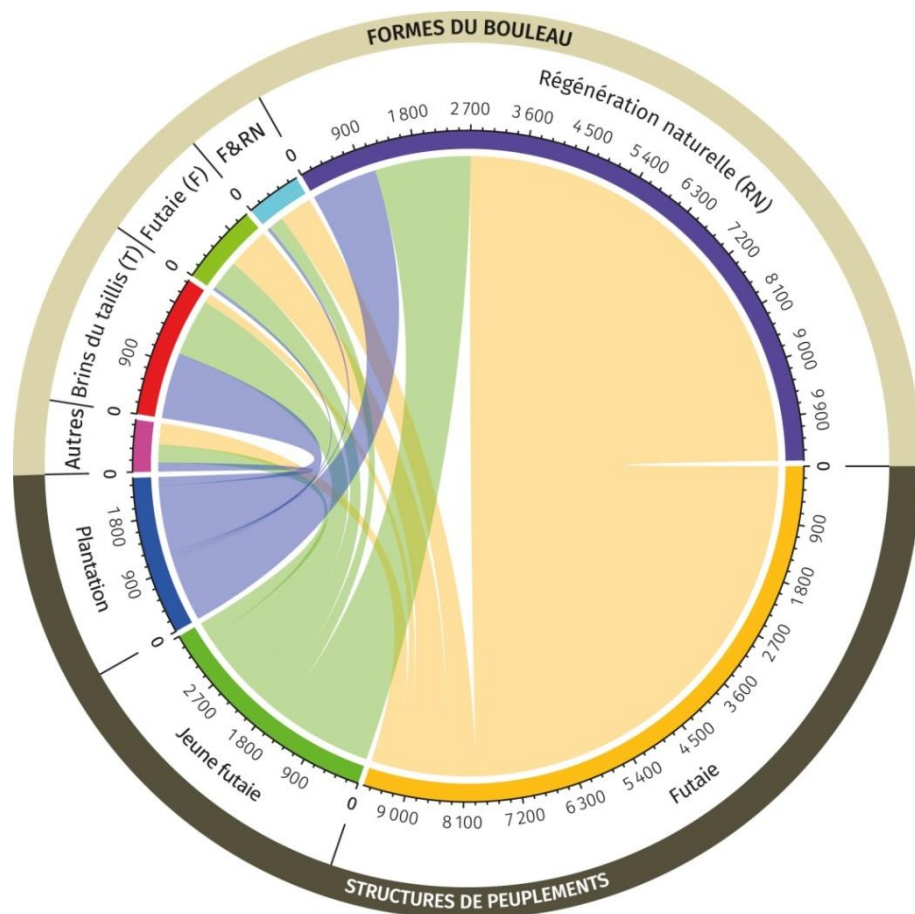


Figure 2.7 Diagramme à flux illustrant la distribution (surfaces en ha) des pessières à bouleau (mesuré et/ou décrit) selon les structures de peuplement et les différentes formes du bouleau (Brins du taillis (T) ; Futaie (F) ; Régénération naturelle (RN)) (© Forêt.Nature).

Dans les peuplements, le bouleau est généralement minoritaire en surface terrière (Figure 2.9). Pour 86 % du nombre total de bouleaux, la circonférence est inférieure à 60 cm (c'est-à-dire 19 cm de diamètre). Les bois de plus de 120 cm (38 cm de diamètre) ne représentent que 7 % du volume total, dont moins de 4 % correspond aux standards de qualité nécessaires à une utilisation en bois d'œuvre, selon les critères d'aspect relevés par l'IPRFW (rectitude et branches).



Figure 2.8 Abondants semis naturels et rejets de bouleau (arborant leur feuillage jaune d'automne) dans une plantation d'épicéas malgré leur coupe lors des dégagements.

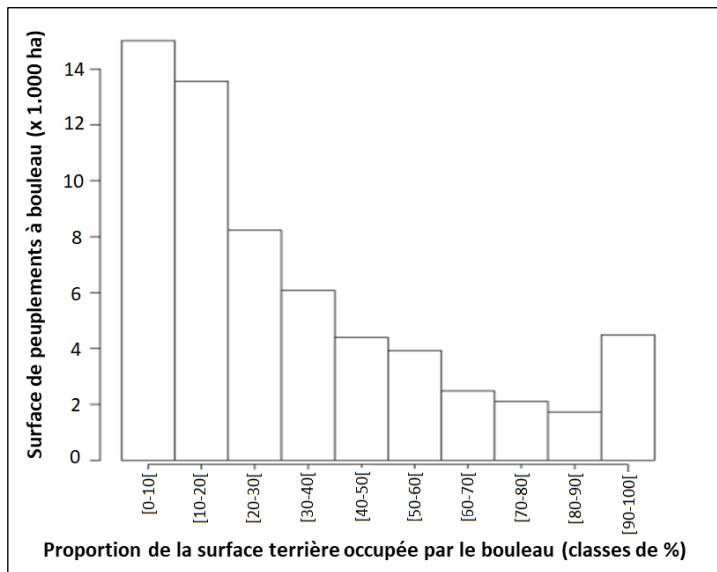


Figure 2.9 Distribution de la surface des peuplements à bouleau (mesuré) par classe de proportion en surface terrière occupée par le bouleau.

3.3.2 Typologie des peuplements comportant du bouleau

La typologie distingue 18 peuplements à bouleau dont les caractéristiques principales sont reprises dans le tableau 2.2 (typologie complète en annexe 1). Ils représentent de 3 à 10 % de la surface des peuplements à bouleau de Wallonie.

Tableau 2.2 Types de peuplements comportant du bouleau (mesuré) et leurs caractéristiques distinctives moyennes. La distinction se fait selon la richesse en bouleau, la structure et la composition du peuplement, et la richesse trophique du milieu et/ou la région bioclimatique.

Groupe	Type	% surface des peuplements à bouleau	Structure	Composition	Richesse trophique et/ou région	
Boulaies (G > 66%) (G moyen de 80 %)	6	4,7	14,8	Futaie	Bouleau	Milieus pauvres
	12	4,8		Taillis sous futaie		Large amplitude trophique
	10	5,3		Taillis		
Boulaies mélangées (33%>G>66%) (G moyen de 50 %)	1	4,2	23,8	Futaie	Boulaie mélangée diversifiée	Large amplitude trophique
	8	3,0			Chênaie-boulaie	
	9	3,5		Taillis sous futaie	Boulaie mélangée diversifiée	
	7	7,2			Chênaie-boulaie	
	11	3,6			Boulaie mélangée à feuillus nobles	Milieus riches hors Ardenne
	16	2,3		Taillis	Chênaie-boulaie	Large amplitude trophique
Peuplements pauvres en bouleau (G < 33%) (G moyen de 20 %)	14	3,9	61,4	Futaie irrégulière	Chênaie, hêtre, chênaie-hêtre	Large amplitude trophique
	2	6,8		Futaie	À base de résineux	Région Limoneuse, Condroz et Haute Ardenne
	3	6,8				Condroz et Ardenne sauf Haute Ardenne
	15	4,1				Milieus riches
	17	5,9			Chênaies	En Ardenne et milieux très pauvre
	4	10,1			Taillis sous futaie	Peuplements mélangés à feuillus nobles
	5	9,7		Chênaies-charmaies diversifiées		Milieus riches
	13	9,0		Chênaie		Milieus riches et hors Ardenne
	18	5,1		En Ardenne		

Les types de peuplements peuvent aussi être distingués selon leur structure et la richesse moyenne (proportion de surface terrière) en bouleau (Figure 2.10A), ou la richesse moyenne en chêne et la fertilité moyenne de la station (Figure 2.10B).

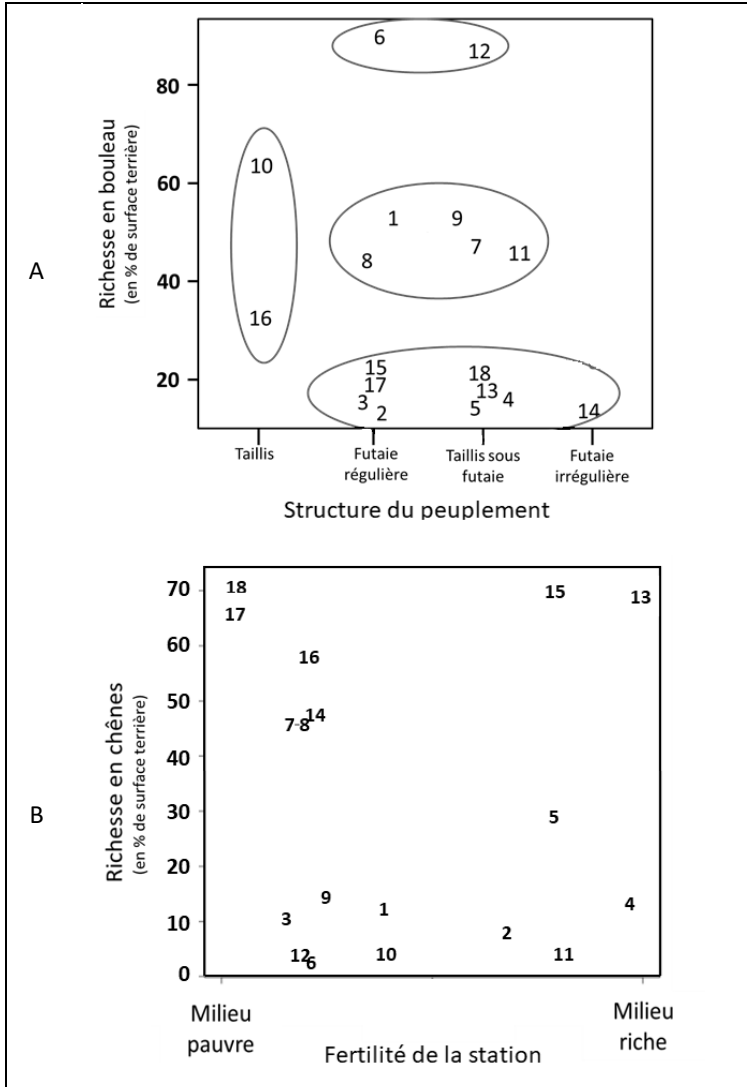


Figure 2.10 Répartition des types de peuplements à bouleau (A) selon leur structure et la richesse en bouleau (pouvant être regroupés en 4 contextes sylvo-cologiques du bouleau, conformément aux ellipses) et (B) selon la fertilité du milieu et la richesse en chêne.

La typologie peut être interprétée sur base des convergences : par exemple, les types 1, 7, 8, 9 et 11 se rapprochent par leur richesse en bouleau et la structure du peuplement, mais se distinguent par leur richesse en chêne et la fertilité de la station. Partant de ce constat, quatre contextes sylvicoles (Figure 2.10A) sont identifiés :

1. **Les taillis**

Les taillis comprenant du bouleau occupent 5000 ha en Wallonie (1,0 % de la surface forestière productive) et comptabilisent 0,4 millions de m³ de bouleau, avec un ratio chêne/bouleau plus (type **16**) ou moins (type **10**) important (Figures 2.11 et 2.12). On les retrouve majoritairement dans les milieux pauvres, surtout en Ardenne, probablement en lien avec la gestion traditionnellement réservée aux milieux plus pauvres ou difficiles d'accès.

2. **Les peuplements pauvres en bouleau**

Plus de 60 % de la surface forestière à bouleau ne contient que très peu de bouleau, de l'ordre de 5 à 20 % en surface terrière. Ces peuplements pauvres en bouleau occupent 39 000 ha en Wallonie (8,1 % de la surface forestière productive) pour 1,1 millions de m³ de bouleau. La typologie les a distingués en 9 types assez représentatifs de la variété des peuplements retrouvés à travers la Wallonie. Ils se répartissent de la futaie résineuse (types **2** et **3**) à la chênaie, en Ardenne (type **17** en futaie ou **18** en taillis sous futaie) ou plutôt en milieux riches (types **15** ou **13**), en passant par la futaie irrégulière (type **14**) et le taillis sous futaie de feuillus nobles (type **4**) ou de chênaie-charmaie (type **5**).

3. **Les boulaies mélangées**

Les boulaies mélangées, constituées en moyenne à 50 % de surface terrière en bouleau, occupent 14 000 ha en Wallonie (2,9 % de la surface forestière productive) pour 1,3 millions de m³ de bouleau. On distingue :

- les chênaies-boulaies, avec d'une part les taillis sous futaie (type **7**) et d'autre part, les futaies (type **8**).
- les peuplements mélangés dominés par le bouleau, où le reste du peuplement est un mélange d'essences. Il peut s'agir de taillis sous futaie (type **9**) ou de futaie (type **1**).
- les taillis sous futaie de bouleaux et de feuillus nobles, que l'on retrouve dans des milieux fertiles, en dehors de l'Ardenne (type **11**).

4. **Les boulaies (sauf en taillis)**

Les boulaies occupent 6 000 ha en Wallonie (1,3 % de la surface forestière productive) pour 0,7 millions de m³ de bouleau. Elles sont principalement distinguées par leur structure : les futaies (type **6**) et les taillis sous futaie (type **12**). Elles sont présentes sur l'ensemble du territoire wallon mais sont principalement associées aux milieux plus pauvres.

5. Les jeunes stades de recolonisations forestières

A ces quatre contextes issus de l'analyse typologique, nous ajoutons un cinquième, compte tenu de l'évolution rapide de la ressource (voir point 3.3) : il s'agit des jeunes stades de recolonisation forestière. Ceux-ci n'apparaissent pas dans les données de l'IPRFW car, d'une part, le seuil de mesure de 20 cm de circonférence exclut les plus récentes colonisations et, d'autre part, le temps entre 2 cycles d'inventaire successifs est de minimum 14 ans pour plus de 75 % des UE (Latte *et al.*, 2016b), ce qui ne permet pas de décrire les dynamiques de colonisation, particulièrement rapides dans le cas de cette essence. On peut distinguer :

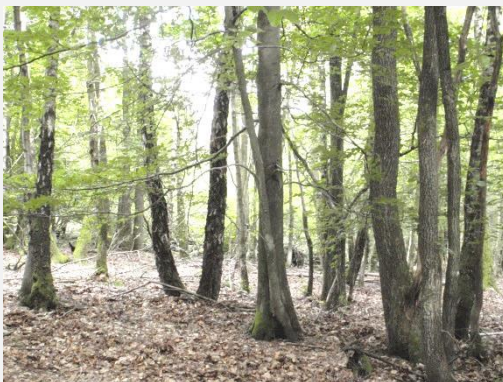
- les recolonisations de coupes rases, car plus de la moitié de celles réalisées entre 2006 et 2012 et non replantées comportaient en 2016 du bouleau naturellement régénéré (Latte *et al.*, 2016b). Vu leur multiplication dans les peuplements résineux ces dernières années (en lien avec la maturité des bois, le cours du bois et les coupes sanitaires), cela représente une surface de l'ordre du double de celle des futaies de bouleau, soit environ 6 000 ha ;
- les jeunes plantations d'autres essences colonisées par le bouleau qui deviennent, si le sylviculteur ne l'élimine pas, des peuplements mélangés, ou, parfois, évoluent naturellement (sans entretien) vers des boulaies (Figure 2.13).

L'évolution est difficile à évaluer car, d'une part, un peuplement peut très rapidement apparaître du fait du comportement colonisateur du bouleau mais, d'autre part, il peut aussi brusquement disparaître, par un gyrobroyage ou un dégagement... et parfois réapparaître à partir de puissants rejets de souche.

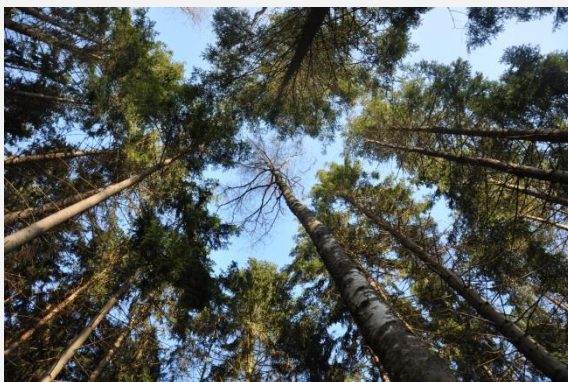


Figure 2.11. Type 10 de peuplement à bouleau, le taillis riche en bouleau.

Taillis à bouleau, riche
en chêne (type 16)



Bouleau conservé dans
une pessière mûre
(type 3)



Boulaie mélangée
diversifiée
(type 1)



Figure 2.12. Types 16, 3 et 1 de peuplements à bouleau.

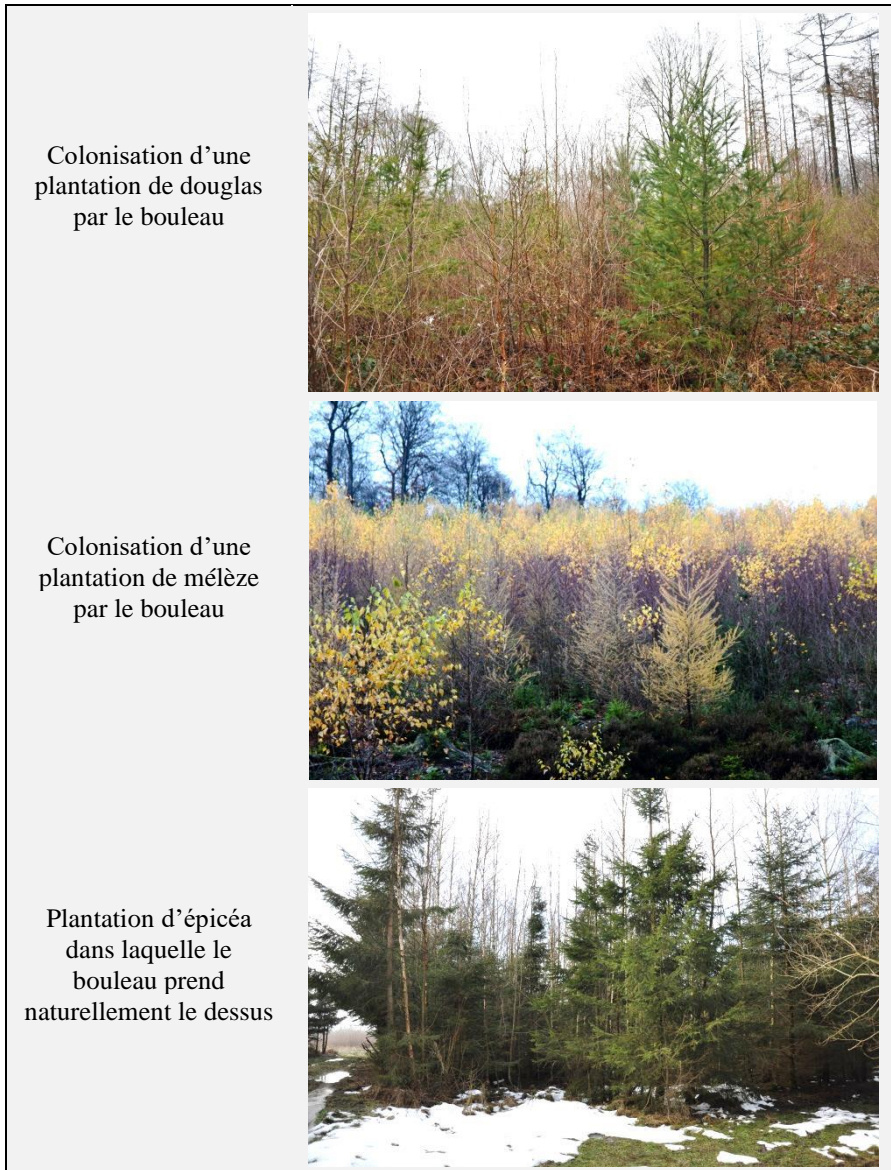


Figure 2.13. Colonisations de plantations résineuses par le bouleau.

3.4 Evolution de la ressource en bouleau

Dans les régions où les résultats d'inventaires successifs sont disponibles, on constate que la ressource en bouleau augmente. Sa croissance en surface et en volume peut être importante au cours de seulement une à deux décennies. L'abandon et l'afforestation d'un nombre croissant de terres agricoles dans les pays scandinaves, baltiques, d'Europe de l'Est (Tullus *et al.*, 2012 ; European Network

for Rural Development, 2010 ; Kund *et al.*, 2010 ; Zasada 2014) et aux Pays-Bas (Schelhaas *et al.*, 2014) profite considérablement à l'expansion de ce colonisateur (Perala *et al.*, 1990 ; Niemistö *et al.*, 2008 ; Hein *et al.*, 2009 ; Hynynen *et al.*, 2010). Par exemple :

- en Biélorussie, entre 1990 et 2010, l'accroissement en volume de bouleau verruqueux est de 78 % alors que le volume forestier total n'a augmenté que de 45 % (Global Forest Resource Assessment 2015) ;
- en Suède, entre 1990 et 2010, l'accroissement en volume des bouleaux pubescent et verruqueux est respectivement de 46 et de 48 % pour une croissance du volume forestier total de 18 %. En Norvège, ces valeurs sont respectivement de 52, 60 et 19 %. Au Danemark, le bouleau a montré en 10 ans un accroissement en volume de 23 % alors que le volume forestier total a cru de 13 % (Global Forest Resource Assessment 2015) ;
- pour l'Europe occidentale, aux Pays-Bas, entre 1990 et 2010, la croissance en volume a été de 65 % pour le bouleau et de 46 % pour l'ensemble du volume forestier (Global Forest Resource Assessment 2015). En Suisse, le volume de bouleau, qui a profité des surfaces ouvertes par l'ouragan de 1990 (Brändli, 2010), s'est accru de 31 % entre 1995 et 2014, pour une croissance en volume forestier total de 5 % (Abegg *et al.*, 2014). En Wallonie, entre 2000 et 2012⁶, le bouleau s'est installé sur plus de 50 000 ha supplémentaires, et le volume de bouleau a progressé de 20 % alors que le volume forestier total n'a cru que de 4 %. Il s'agit principalement de colonisations récentes étant donné que sur 64 % des nouvelles surfaces contenant cette essence, c'est de la régénération naturelle seule qui est rencontrée. Cette proportion atteint 86 % si on considère aussi les surfaces où cette régénération est accompagnée de brins de taillis ou d'arbres de la futaie (Figure 2.14A). Ce sont les pessières qui contribuent le plus à cette augmentation (Figure 2.14B) : elles comptent 30 % des nouvelles localisations.

A	Rég. naturelle (RN) 64 %				Taillis (T) et RN 16 %		Futaie (F) 10 %	T 4%	F,T R 4%	F RN 2%
B	Pessière 30 %	Chênaie 12 %	Autres résineux 11 %	Autres feuillus 11 %	Feuillus nobles 10 %	Hêtraie 9 %	Douglasière Boulaie Mélèzière Pîneraie Peupleraie	6% 5% 3% 2% 1%		

Figure 2.14 Distribution des surfaces des nouveaux peuplements à bouleau en Wallonie selon les formes du bouleau (A) et les compositions en essences des peuplements à bouleau (B).

⁶ selon les UE de l'IPRFW qui ont été remesurées au cours du deuxième cycle de l'inventaire.

4. Conclusion

Le tableau de synthèse des volumes de bouleau sur pied en forêt en Eurasie contient des imprécisions car il dépend de la qualité des données communiquées par les différents pays, et donc de leur stratégie d'évaluation. Néanmoins, l'analyse met en évidence une importante ressource en bouleau à l'échelle de l'Eurasie, de l'ordre de 17 milliards de m³, majoritairement pubescente dans le nord mais plutôt verruqueuse en Europe tempérée. Dans la zone boréale, il est même l'un des rares feuillus à pouvoir se développer. Il partage l'espace avec des résineux ou forme des peuplements monospécifiques en assurant un rôle d'essence climacique (Niemistö *et al.*, 2008 ; Hynynen *et al.*, 2010). En revanche, dans les régions aux conditions climatiques plus clémentes, où davantage d'essences feuillues (chênes, hêtre, frêne, charme, *etc.*) et résineuses (épicéa, pins, douglas, sapins, *etc.*), plus longévives, sont présentes, comme en Europe occidentale, la part du bouleau dans la ressource forestière est plus faible.

Les données très précises de l'IPRFW montrent qu'à ce jour, en Wallonie, le volume en bouleau est encore loin de ceux des chênes indigènes (23 millions de m³) et du hêtre (14 millions de m³), mais il est tout juste plus élevé que celui du frêne (3,4 millions de m³). Il est cependant principalement disséminé (70 % du volume de bouleau) dans des peuplements d'autres essences, et les grumes potentiellement valorisables en bois d'œuvre sont rares (< 0,3 %). Les analyses statistiques descriptives, le détail des quelques focus et la typologie illustrent la diversité des situations qui conviennent au développement du bouleau, colonisateur peu exigeant vis-à-vis de la station, mais fortement dépendant de la lumière, et peu longévif (Atkinson *et al.*, 1992 ; Cameron 1996 ; Perala *et al.*, 1990 ; Hynynen *et al.*, 2010). Dès lors, son occurrence est plus importante dans les peuplements lumineux, comme les chênaies et pineraies. Le bouleau est une composante importante du taillis et du taillis sous futaie, dans lesquels il s'est montré compétitif grâce à l'ambiance lumineuse qui y règne périodiquement et, surtout, en raison de sa très haute faculté à rejeter de souche (**Chapitre 1**) combinée à sa forte croissance juvénile en hauteur (**Chapitre 3**). Il a ainsi pu se maintenir dans des peuplements (sur)exploités, entre autres pour le bois d'énergie et de tannin (chêne) pour les cuirs. En revanche, il a eu peu d'opportunités dans les hêtraies qui, une fois mures et en dehors de tout évènement déstabilisant (mortalité, chablis, forte éclaircie), ne laissent pas se développer ses semis dans leur sous-bois ombragé. Le bouleau est peu représenté en futaie irrégulière, où il est défavorisé par l'ambiance lumineuse plus propice à la régénération de ses concurrents plus sciaphiles comme le charme, l'érable sycomore ou le hêtre. La typologie des peuplements comportant du bouleau reflète les traitements sylvicoles qui, depuis des décennies, ont cherché à éliminer le bouleau au profit d'autres essences, à tel point que les boulaies étaient souvent perçues comme un échec ou une négligence, ou associées aux sols pauvres. Nous avons simplifié la typologie en 4 contextes plus adaptés à la conception d'itinéraires de sylviculture considérant le bouleau (**Chapitre 5**), distingués notamment sur base de son abondance au sein du peuplement.

Dans certaines zones de son aire de distribution, y compris en Europe occidentale, le bouleau montre une expansion conséquente, en surface et en volume. En Wallonie, l'augmentation de la ressource provient en grande partie des coupes rases et jeunes plantations, mais ces colonisations sont difficilement recensées par l'IPRFW. Il n'est donc pas possible d'estimer cette ressource en devenir, mais il est très probable que nous observions dans les prochaines années une présence beaucoup plus importante du bouleau dans l'espace forestier, d'autant plus que la fréquence des aléas climatiques et sanitaires qui affectent les principales essences risque d'augmenter. C'est pour cette raison que nous avons proposé un cinquième contexte qui s'intéresse aux jeunes stades de la colonisation forestière (Figure 2.15).



Figure 2.15 Le bouleau (dont les feuilles ont pris leur teinte automnale jaune vif) colonise la plupart des trouées forestières et plantations d'autres essences.

3

Le potentiel du bouleau pour la gestion forestière et l'industrie du bois dans le contexte climatique et socio-économique changeant de l'Europe occidentale



Ce chapitre est adapté de l'article scientifique :

Dubois, H.; Verkasalo, E.; Claessens, H., 2020. Potential of Birch (*Betula pendula* Roth and *B. pubescens* Ehrh.) for Forestry and Forest-Based Industry Sector within the Changing Climatic and Socio-Economic Context of Western Europe. *Forests*, **11**, 336, 26p

<https://doi.org/10.3390/f11030336>

1. Introduction

L'analyse de sa ressource (**Chapitre 2**) indique que le bouleau est actuellement relativement abondant en Europe occidentale, mais aussi qu'il tend à être de plus en plus présent. Or, les connaissances sur les rôles du bouleau dans la forêt, sur sa sylviculture, et sur les utilisations de son bois y sont quasiment inexistantes (Mauer *et al.*, 2003 ; Boruvka *et al.*, 2018). Le bouleau n'est pratiquement pas considéré par les forestiers ni par l'industrie du bois. A l'inverse, en Europe du Nord, dans les Pays baltes et dans le nord-ouest de la Russie, où le bouleau est le feuillu commercial le plus abondant, la recherche est très active en ce qui concerne sa gestion, sa croissance, sa production (Niemistö *et al.*, 2008 ; Hynynen *et al.*, 2010), et les propriétés physiques et mécaniques de son bois pour des usages variés (Kucera *et al.*, 1984 ; Ekström *et al.*, 1987 ; Verkasalo 1997 ; Luostarinen *et al.*, 2000 ; Heräjärvi 2002 ; Verkasalo *et al.*, 2009 ; Woxblom *et al.*, 2010). Cependant, les conditions écologiques, sylvicoles et industrielles de la région boréale sont trop particulières (productivité des essences, ressource, organisation de l'industrie, *etc.*) pour que les connaissances puissent être simplement transférées en Europe occidentale.

Ce chapitre examine le rôle potentiel du bouleau pour la gestion forestière et pour l'industrie et le marché du bois dans le contexte climatique et socio-économique changeant de l'Europe occidentale. Il tente aussi de comprendre les raisons qui y ont limité son utilisation, malgré une ressource importante, et propose des recommandations pour développer sa sylviculture et favoriser son intégration dans le marché du bois.

2. Méthode

Nous avons rassemblé et analysé la littérature scientifique et grise qui porte sur des forces ou des faiblesses du bouleau, ou sur des opportunités ou des menaces qui peuvent le concerner, pour la gestion forestière et les industries et les marchés du bois. Nous avons tiré profit des acquis des rencontres avec des forestiers, industriels et scientifiques lors de visites de terrain et réunions pour enrichir ces analyses. Nous avons ciblé l'Europe occidentale, mais, étant donné le nombre limité d'études sur le bouleau pour cette région, nous avons aussi interprété les informations en

provenance de l'Europe du Nord et des Pays baltes à l'aune des conditions de l'Europe occidentale.

Les informations récoltées sont discutées et organisées selon les quatre critères d'une analyse atouts, faiblesses, opportunités et menaces (AFOM, ou SWOT en anglais) (Weihrich 1982) : les atouts et les faiblesses du bouleau sont déduits des caractéristiques biologiques de l'essence, tandis que les opportunités et les menaces dépendent du contexte socio-économique et environnemental de la gestion forestière et du marché du bois. Ces critères sont adéquats pour offrir aux décideurs (propriétaires et gestionnaires forestiers, politiques, industriels du bois) l'opportunité d'évaluer la pertinence de l'utilisation du bouleau en fonction de leurs besoins respectifs. Ces derniers divergeant, nous n'avons pas pu donner un poids relatif aux données pour les hiérarchiser. Les éléments couvrent des considérations économiques, écologiques et sociales, et les combinent parfois. Cette analyse doit permettre au décideur de trouver des solutions basées sur les atouts du bouleau, de limiter les conséquences de ses faiblesses, d'exploiter les nouvelles opportunités et de transformer les menaces en défis.

3. Atouts

3.1 Adaptabilité

3.1.1 Importantes diversité génétique et plasticité phénotypique

La pollinisation du bouleau est anémochore et croisée. Les grains de pollen sont produits annuellement en grande quantité (Koski *et al.*, 2005), dès cinq ans et même parfois plus tôt (Atkinson 1992). Les épisodes de floraison abondante sont synchronisés sur de grandes zones géographiques et les pollens sont transportés sur des centaines de kilomètres, ce qui enrichit le pool génétique de l'espèce (Ranta *et al.*, 2008 ; Viherä-Aarnio 2009). La présence quasi systématique du bouleau dans le paysage facilite les échanges, générant une grande diversité génétique au sein des populations (Possen *et al.* 2011 ; Possen *et al.*, 2014 ; Kasurinen *et al.*, 2015). En raison de sa diversité génétique et de sa plasticité phénotypique propre, le bouleau est capable de s'adapter à un large éventail de sites et de conditions environnementales, même changeantes (Aspelmeier *et al.*, 2004 ; Araminienè *et al.*, 2014 ; Rosenvald *et al.*, 2011 et 2014). Par exemple, des études montrent une variation de la surface foliaire du bouleau en fonction du génotype et un ajustement de l'architecture des racines en réponse à un réchauffement ou à une sécheresse (Possen *et al.* 2011 ; Possen *et al.*, 2014 ; Kasurinen *et al.*, 2015). Des provenances transférées dans des régions plus chaudes et plus sèches ont également pu s'acclimater (Rousi *et al.*, 2012), mais la fertilité du sol pourrait jouer un rôle important (Possen *et al.*, 2021).

3.1.2 Capacité à s'accommoder d'une large gamme de climats et de stations

Le bouleau est distribué dans toute l'Eurasie (**Chapitre 2**) et possède la plus grande aire de distribution de toutes les essences feuillues européennes, notamment

grâce à sa capacité à se développer à la fois dans les stations forestières extrêmement humides et/ou froides (bouleau pubescent) ou sèches (bouleau verruqueux) (Ellenberg 1996), et même sur les terrils. Le bouleau est productif sur une grande diversité de sols, des plus riches et mésiques aux sols argileux, mal drainés et compacts. Il peut même avoir une bonne croissance sur des sols très pauvres, y compris les sols gleyfiés ou les podzols (Noirfalise 1984 ; Atkinson *et al.*, 1992 ; Niemistö *et al.*, 2008 ; Hynynen *et al.*, 2010), et sur des sols contaminés par des métaux lourds comme le zinc ou le nickel (Perala *et al.*, 1990). Cependant, comme le bouleau est souvent la seule espèce forestière ou agronomique à pouvoir se développer sur les stations les plus contraignantes, où sa croissance est limitée, il est parfois considéré à tort comme une essence non productive, en particulier le bouleau pubescent qui a la capacité de s'établir sur les tourbières (Niemistö *et al.*, 2008 ; Hynynen *et al.*, 2010).

Lors des épisodes de sécheresse durant la saison de végétation, le bouleau possède une stratégie qui lui permet d'atténuer des dégâts physiologiques : il réduit sa transpiration par le processus de jaunissement et de chute prématurée de ses feuilles (Pääkkonen *et al.*, 1998). Néanmoins, Hemery *et al.* (2010) ont relaté des mortalités suite aux sécheresses de 1976 et 2003 en Angleterre et en Ecosse. Les modèles d'adaptation des essences forestières à un climat plus chaud et plus sec donnent des résultats divergents selon les auteurs et les régions étudiées, et selon les traits autécologiques et les données utilisées dans les modèles, pour le bouleau mais aussi pour d'autres essences (par exemple Castagneri *et al.*, 2014 ; Dyderski *et al.*, 2017 ; Noce *et al.*, 2017 ; Rubio-Cuadrado *et al.*, 2018 ; Pecchi *et al.*, 2020 ; Rojo *et al.*, 2021). L'adaptation présumée du bouleau au changement climatique n'est donc pas bien documentée à ce jour, mais on peut s'attendre à ce que le bouleau pubescent souffre dans des conditions devenant plus sèches, bien qu'il s'installe paradoxalement sur des sols secs et carbonatés en Normandie et en Picardie (Rameau *et al.*, 1994). Le bouleau présente également une certaine résistance aux feux de forêt, lesquels peuvent en outre favoriser son installation (Ascoli *et al.*, 2010).

Dès le très jeune âge, en l'absence de contrainte, le bouleau développe un système racinaire oblique, d'une profondeur de 60 à 120 cm, qui lui offre une bonne résistance au vent (Mauer *et al.*, 2003). Cependant, sur les pseudogleys et les sols pauvres ou très pierreux, le développement des racines peut se montrer superficiel avec de grandes expansions horizontales (Frauendorfer 1954 ; Mauer *et al.*, 2003).

3.2 Croissance rapide et productivité élevée dans le jeune âge

Comme le montrent les modèles, élaborés de la Scandinavie à l'Espagne (Frauendorfer 1954 ; Eriksson *et al.*, 1997 ; Diéguez-Aranda *et al.*, 2006 ; Hein *et al.*, 2009 ; Hynynen *et al.*, 2010) (Figure 3.1), la croissance en hauteur du bouleau est forte pendant les 20 premières années, diminue drastiquement entre 30 et 40 ans (caractère soutenu variable selon les auteurs), et est très faible à partir de 50-60 ans (Lemaire 1998 ; Prévosto *et al.*, 1999 ; Hein *et al.*, 2009). En conséquence de cette

dynamique, le bouleau est plus grand que la plupart des autres essences du même âge les premières années, mais la tendance s'inverse ensuite (Petit *et al.*, 2017). Selon Hynynen *et al.* (2010), la période de croissance rapide en hauteur et en diamètre dure plus longtemps chez le bouleau verruqueux que chez le bouleau pubescent. Sur les stations qui lui conviennent, la production annuelle moyenne en volume varierait de 5 à 10 m³ ha⁻¹ a⁻¹ sur 50 à 80 ans (Hynynen *et al.*, 2010 ; Gomez-Garcia *et al.*, 2014) et parfois plus (par exemple, Uri *et al.*, 2012). La productivité serait maximale vers l'âge de 15 ans, atteignant 12 à 23 m³ ha⁻¹ an⁻¹ (Lutter *et al.*, 2015). Ainsi, le bouleau fait partie des essences feuillues à croissance rapide et à bonne productivité, comme l'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus* L.) ou le frêne (*Fraxinus excelsior* L.).

Cependant, les tables de production décrivent généralement des peuplements issus de la sylviculture du 20^{ème} siècle, et âgés, sans tenir compte de l'effet positif qu'auraient pu avoir des éclaircies précoces sur la croissance diamétrique des arbres (Cameron 1996 ; Rytter *et al.*, 2007). Il est intéressant de noter qu'en Europe du Nord, les programmes de sélection, de plantation et d'éclaircies ont amélioré la productivité du bouleau verruqueux et raccourci les longueurs de révolution (Niemistö *et al.*, 2008).

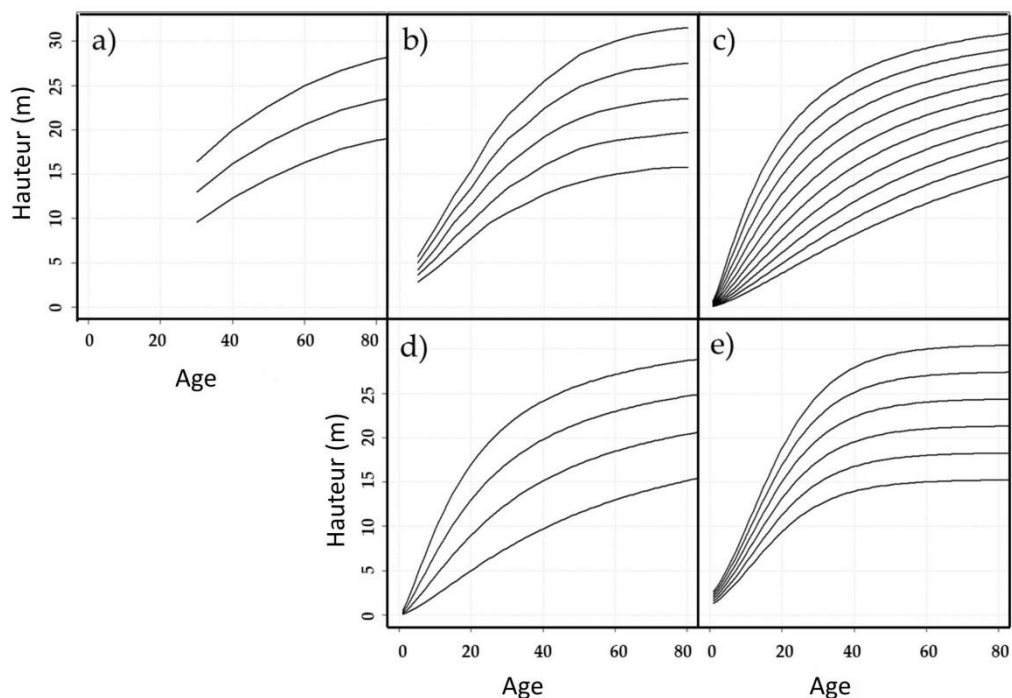


Figure 3.1 Courbes de croissance en hauteur du bouleau adaptées de a) Frauendorfer (1954, Autriche), b) Lockow (1997, Allemagne), c) Eriksson (1997, Suède), d) Diéguez-Aranda *et al.* (2006, Espagne) et e) Hein *et al.* (2009, Allemagne).

3.3 Essence pionnière qui renforce la résilience et la biodiversité forestières

3.3.1 Restauration de la production ligneuse après les perturbations

Le bouleau dissémine annuellement durant 3 à 6 mois de nombreuses graines légères qui peuvent parcourir des centaines de mètres sous l'effet du vent (Cameron 1996 ; Perala *et al.*, 1990), au moins 250 m selon Degen *et al.* (2006), lui permettant de coloniser les parcelles déboisées et trouées, faisant de lui la principale essence pionnière constitutive des premiers stades de la colonisation forestière (Niemistö *et al.*, 2008 ; Hynynen *et al.*, 2010). Lorsqu'une boulaie s'établit, elle crée des conditions favorables à l'immigration naturelle d'autres essences (Araminienè *et al.*, 2014) par le processus de facilitation (Prévosto *et al.*, 2004), grâce à la luminosité générée par son couvert léger, à la réduction de la concurrence des herbacées, à la protection contre le gel ou la sécheresse. Rosa *et al.* (2004) ont noté que diverses essences telles que le hêtre (*Fagus sylvatica* L.), le chêne (*Quercus* sp.), le merisier (*Prunus avium* (L.) L.), l'érable sycomore et l'épicéa (*Picea abies* (L.) Karst) étaient présentes dès 15-20 ans dans les boulaies régénérées après les tempêtes (1990 en Belgique et en Allemagne et 1999 en France). Ainsi, le bouleau contribue à la restauration rapide de la production ligneuse après une perturbation.

3.3.2 Régénération du fonctionnement du sol

Le bouleau est reconnu pour optimiser le fonctionnement des sols (Patterson 1993 ; Kanerva *et al.*, 2007). La décomposition annuelle d'abondantes racines fines renforce sa porosité, et donc l'infiltration de l'eau (Perala *et al.*, 1990), qui de concours avec la décomposition rapide des feuilles, améliore ses propriétés biologiques, la profondeur de l'horizon A et le cycle des nutriments (Patterson 1993 ; Saetre 1998 ; Priha *et al.*, 2001 ; Kanerva *et al.*, 2007 ; Hynynen *et al.*, 2010 ; Hansson *et al.*, 2013). Ce phénomène contribue à la restauration des sols dégradés comme les anciennes landes à callune (Mitchell *et al.*, 2007), les podzols (Patterson 1993), les tourbières à sphaigne (Perala *et al.*, 1990) ou les sols tassés. La présence du bouleau améliore la fertilité du sol et la croissance ligneuse, par exemple dans les forêts de chêne, de hêtre, de pin (*Pinus* sp.) et d'épicéa (Brandtberg *et al.*, 2000 ; Mohr *et al.*, 2005 ; Kanerva *et al.*, 2007 ; Hansson *et al.*, 2011 ; Schua *et al.*, 2015). La transformation de pineraies ou de pessières en boulaies permet de limiter la perte de cations basiques et la percolation des nitrates (De Schrijver *et al.*, 2004) et inverse le processus de podzolisation (Emmer *et al.*, 1998). Une génération de bouleau peut suffire pour engendrer des améliorations significatives, et même l'évolution de l'humus en mull (Saetre 1998). Sur les sols contaminés en métaux lourds, des mycorhizes spécifiques (Perala *et al.*, 1990) lui permettent d'accumuler de grandes quantités de zinc dans ses feuilles, ce qui le rend efficace en phytoremédiation (Dmuchowski *et al.*, 2014).

3.3.3 Contributions directes et indirectes à la biodiversité

Le nombre d'espèces spécialisées associées au bouleau est parmi les plus élevés en comparaison avec les autres essences d'Europe (Branquart *et al.*, 2005), en

particulier pour les mycorhizes (Perala *et al.*, 1990) et les insectes (Kennedy *et al.*, 1984 ; Patterson 1993).

De plus, le surcroît de lumière qui traverse la cime du bouleau par rapport aux autres essences renforce le développement et la floraison de la végétation du sous-bois, accueillant des espèces nectarifères (Patterson 1993 ; Hynynen *et al.*, 2010). L'amélioration des propriétés du sol augmente l'abondance et la richesse de sa faune, telle que les vers de terre, les *Oribatida*, les *Mesostigmata*, les *Prostigmata*, et les *Collembola* (Swanson *et al.*, 2011), qui sont également essentiels pour les musaraignes, les taupes et les blaireaux (Patterson 1993). Le bouleau contribue au maintien de la biodiversité des invertébrés dans le paysage (Woodcock *et al.*, 2003). Il est considéré par certains auteurs comme une « *keystone species* », c'est-à-dire une espèce ayant un effet disproportionné sur son environnement par rapport à son abondance (Kreyer *et al.*, 2006 ; Ellis *et al.*, 2011 ; Felton *et al.*, 2011 ; Ellis *et al.*, 2012), et par d'autres comme une « *ecosystem engineering species* » parce que ses interactions avec l'environnement modifient et créent des habitats, avec des effets qui durent au moins 20 ans après sa disparition (Mitchell *et al.*, 2007). Dans de nombreux projets de restauration écologique, au moins en Amérique du Nord, en Scandinavie, en Allemagne, en Belgique et en Espagne, le bouleau est considéré comme une essence de choix pour améliorer la biodiversité, en particulier dans les forêts résineuses (Ferreira *et al.*, 2003 ; De Schrijver *et al.*, 2009 ; Felton *et al.*, 2011 ; Burgess *et al.*, 2015).

En Europe occidentale et centrale, les boulaies des premiers stades de la succession forestière présentent une grande biodiversité, dont des espèces des forêts anciennes, des rudérales et des spécialistes. Certaines espèces de lépidoptères, de reptiles ou d'oiseaux en dépendent pour leur alimentation et leur nidification (Swanson *et al.*, 2011 ; Lehnert *et al.*, 2013). L'importance des premiers stades de la succession forestière pour l'écosystème a également été démontrée en Amérique du Nord (Swanson *et al.*, 2011 ; Bormann *et al.*, 2015).

3.4 Propriétés visuelles, physiques et mécaniques de son bois

Les propriétés du bois du bouleau verruqueux et du bouleau pubescent sont similaires en ce qui concerne leur anatomie, leur composition chimique, leurs fibres et leurs caractéristiques physiques et mécaniques. En moyenne, les performances du bois de bouleau verruqueux sont légèrement supérieures en raison de sa plus grande densité, mais leurs utilisations industrielles ne sont pas différenciées (Heiskanen 1957 ; Luostarinen *et al.*, 2000 ; Heräjärvi 2002 ; Hakkila *et al.*, 2009 ; Hytönen *et al.*, 2014 ; Roitto *et al.*, 2015 ; Hasegawa *et al.*, 2016).

Le bouleau possède un bois blanc homogène, brillant grâce à des facettes chatoyantes, qui lui ont donné le surnom de « merisier blanc ». Ses rayons ligneux, minces et nombreux, forment une fine maillure observable en découpe sur quartier (Lemaire 2000). Par son grain fin et régulier, il convient bien au tranchage, au déroulage et au moulurage, et son aspect visuel est très esthétique.

Ses pores sont diffus, et les propriétés techniques des produits en bois de bouleau ne sont pas influencées par la largeur des cernes (Cameron *et al.*, 1995).

Le tableau 3.1 présente les propriétés physiques et mécaniques du bois de bouleau, ainsi qu'à titre de comparaison, celles du hêtre et du chêne indigène (sessile et/ou pédonculé), couramment utilisés en menuiserie-ébénisterie, et de l'épicéa, massivement utilisé dans la construction. Les propriétés physiques et mécaniques du bois de bouleau telles que la densité, le module d'élasticité (MOE), la contrainte de rupture en flexion statique (MOR) et la dureté, sont assez proches de celles du hêtre, son principal concurrent dans les produits en bois massif, principalement en ameublement, en Europe (Luostarinen *et al.*, 2000). Le succès du bois de bouleau réside dans l'association particulière de ses bonnes propriétés mécaniques élastiques (propension à résister à de fortes contraintes de flexion), de sa dureté (bois mi-dur), et de sa relative légèreté, qui permettent de nombreux usages à sollicitations mécaniques. Il est très résistant aux chocs et peu fissible au clouage. Il convient dès lors particulièrement pour former les parois et le fond des véhicules de transport (un de ses plus grands débouchés) sans trop les alourdir, et également aux utilisations en structure pour la construction (voir 5.3.1.1 et Heräjärvi 2002).

Tableau 3.1 Propriétés physiques et mécaniques moyennes du bois de hêtre, de chêne, de bouleau et d'épicéa, déterminées sur des éprouvettes normalisées, selon Wagenführ et Scheiber 1985, *Heräjärvi 2002 (en Finlande), and **Boedts 2016 (en Belgique).

	Hêtre	Chêne indigène (p : pédonculé ; s: sessile)	Bouleau	Epicéa	
Densité à 12%-15% d'humidité	720 (540-910)	690 (430-960)	650 (510-830) **654 (± 40)	470 (330-680)	kg m ⁻³
Porosité	55	57	59	71	%
Retrait volumétrique	17,9 (14,0-21,0)	12,2-15,0	13,7-14,2 **18,0	11,6-12,0	%
Retrait volumétrique par 1% d'humidité	0,46-0,60	0,45	0,23	0,39-0,40	% % ⁻¹
Contrainte de rupture en flexion statique (MOR)	123 (74-210)	p: 88 (74-105) s: 110 (78-117)	147 (76-155) *114; **100 (± 13)	78 (49-136)	MPa
Dureté	10,0 (3,0-19,0)	6,0 (1,0-16,0)	10,0 (4,5-13,0) **4,4	4,6 (1,0-11,0)	J cm ⁻²
Module d'élasticité en flexion statique (MOE)	16,0 (10,0-18,0)	p: 11,7 (10,0- 13,2) s: 13,0 (9,2-13,5)	14,5-16,5; *14,5 **15,0 (± 2,2)	11,0 (7,3-21,4)	GPa

Il bénéficie également d'une bonne usinabilité, il est peu nerveux et ne se fissure pas (retrait volumétrique par variation de 1 % d'humidité peu élevé), d'une facilité de finition (notamment pour le vissage), d'une bonne capacité d'imprégnation (par exemple pour les teintures, colles et produits de préservation ; Luostarinen *et al.*, 2000 ; Heräjärvi 2002), et de l'absence d'odeur (Cameron *et al.*, 1995). La présence de contrefil peut donner un aspect pelucheux au sciage et au rabottage, et les pièces de bois sont sensibles au gauchissement, nécessitant un entreposage minutieux pour le séchage (Sevrin *et al.*, 2001). Le bouleau est très stable en service, convenant dès lors très bien au placage tranché, par exemple.

Sa couleur, ainsi que la longueur et les caractéristiques mécaniques et chimiques de ses fibres (courtes et rigides), nombreuses, conviennent particulièrement à la production de papier de haute qualité, d'autant plus que la grume est facile à écorcer, ce qui est nécessaire pour cette transformation.

3.5 Valeur récréative des forêts

Le bouleau est une essence esthétique grâce à son écorce blanche unique, sa silhouette légère, et ses couleurs automnales. Son intégration dans les peuplements forestiers contribue à leur valeur récréative (Niemistö *et al.*, 2008 ; Felton *et al.*, 2010) en apportant plus de lumière et de couleurs, en diversifiant les paysages. Les boulaies attirent également un public non professionnel pour la récolte de la sève et pour la cueillette de champignons spécifiques qu'elles abritent (Verkasalo *et al.*, 2017).

4. Faiblesses

4.1 Dégradation du bois liée à la senescence

La durée de vie du bouleau ne dépasse généralement pas 100 ans. La coloration du bois et la pourriture du cœur s'installent naturellement dès 60 ans (Hein *et al.*, 2009 ; Hynynen *et al.*, 2010). Aux alentours de 80 ans, son système racinaire pourrit, ce qui affecte sa stabilité (Mauer *et al.*, 2003). Ces processus naturels sont en moyenne plus précoces chez le bouleau pubescent que chez le bouleau verruqueux (Hynynen *et al.*, 2010).

4.2 Forte sensibilité du bois à la pourriture

Le bois des bouleaux sur pied s'altère s'il est exposé à l'air libre, sans la protection de son écorce (Verkasalo 1993 ; Luostarinen *et al.* 2000). Les plaies, causées par exemple lors des exploitations, par l'élagage de grosses branches, ou par la séparation d'un double pied, provoquent une pourriture, qui se propage dans le tronc (Niemistö *et al.*, 2008), et est rapidement colonisée par des microorganismes, champignons et insectes.

Selon leurs études en Finlande, Niemistö *et al.* (2019) préconisent de limiter le diamètre de coupe des branches à 2 cm, et exceptionnellement à 3 cm pour les

individus à forte croissance, qui referment plus rapidement la plaie. Après l'élagage de plusieurs centaines de bouleaux en Belgique entre 2015 et 2022, et à l'observation du résultat de l'élagage réalisé par des forestiers, nous avons constaté que lorsque nous dépassions ne fut-ce que de 1 à 2 cm cette dimension seuil, une pourriture consécutive à une cicatrisation difficile s'observait fréquemment, déjà après 3 ans environ (Figure 3.2). Des études supplémentaires seraient utiles pour déterminer la fréquence du risque dans nos conditions.

Les branches basses du bouleau meurent naturellement, même sous un très léger ombrage, tant l'essence est héliophile (Hein *et al.*, 2009). Cependant, elles ont la particularité d'avoir une chute tardive (Hein *et al.*, 2009 ; Hynynen *et al.*, 2010). En Europe du Nord, la neige contribue à leur élimination, mais en Europe occidentale, elles subsistent longtemps sur le tronc et forment une réelle voie d'entrée à la coloration et à la pourriture (Figure 3.2) (Gobakken 2000 ; Luostarinen *et al.*, 2000 ; Verkasalo *et al.*, 2017 ; Niemistö *et al.*, 2019). Le risque est dès lors mieux maîtrisé lorsque l'élagage concerne des branches encore vivantes (Niemistö *et al.*, 2019).

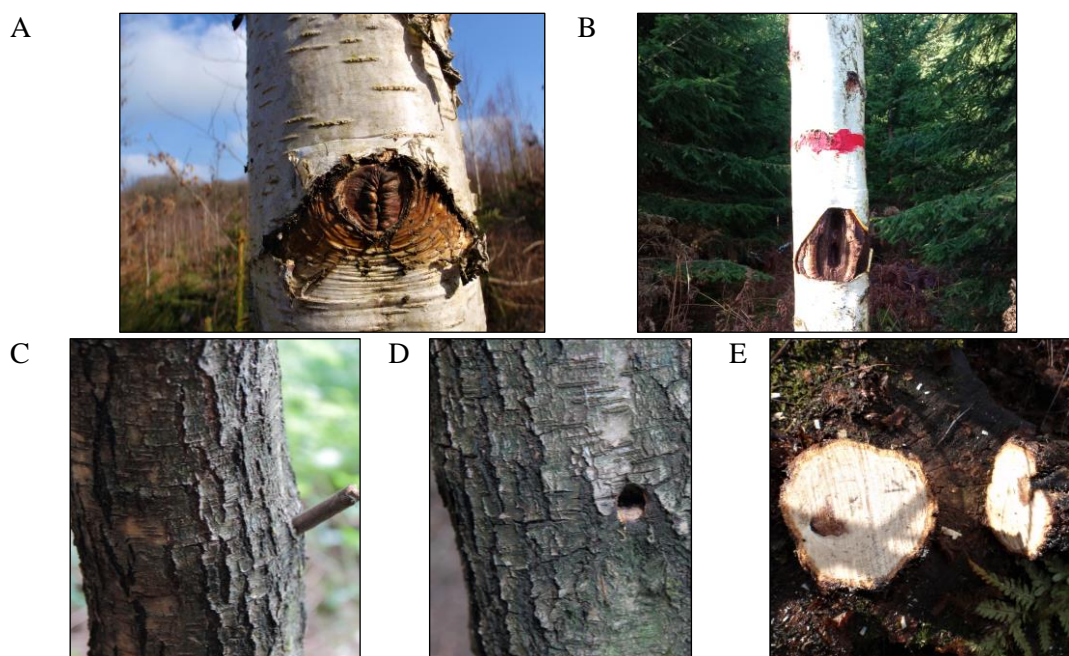


Figure 3.2 A) cicatrisation saine après l'élagage d'une branche vivante de moins de 2 cm de diamètre ; B) l'élagage d'une branche un peu trop large a provoqué une pourriture, qui s'est ensuite étendue dans ce bouleau de 10 ans (vue après 5 ans de l'entrée, élargie probablement par des insectes) ; C) branche qui, des années après sa mort, subsiste dans le tronc et D) trou observé lorsqu'on détache cette branche ; E) une branche morte a causé une pourriture dans le tronc (coupe transversale) de ce bouleau de 7 ans.

Les grumes ne tolèrent pas un stockage prolongé en forêt ou sur les quais des scieries, car les décolorations et dégâts de champignons et d'insectes (notamment

Scolytus ratzeburgi et *Trypodendron signatum*) se développent rapidement (Luostarinen *et al.*, 2000 ; Verkasalo 1993). Les produits en bois de bouleau ne sont pas durables à l'extérieur (classe 5 selon la norme EN 350:2016) sans traitement spécifique de préservation (Heräjärvi 2002).

4.3 Croissance en diamètre compromise par la compétition intraspécifique

La cime du bouleau ne tolère pas la compétition avec d'autres cimes, qui peut causer très précocement une perte de potentiel d'accroissement diamétrique (Rytter *et al.*, 2007 ; Hynynen *et al.*, 2010 ; Vanhellefont *et al.*, 2016 ; **Chapitre 4**). Dans les boulaies naturellement denses, les bouleaux deviennent dès lors rapidement élancés, du fait de leur forte croissance en hauteur, et dès lors très sensibles à la verse avec la neige (de Champs 1987 ; Rytter *et al.*, 2007 ; Hein *et al.*, 2009).

4.4 Dégradations causées par des insectes

Le bouleau est particulièrement sensible au frelon européen (*Vespa crabro germana*) qui arrache sous forme d'annelure l'écorce tendre des branches (pousse latérale ou terminale) d'environ 1 à 3 ans (Figure 3.3), probablement pour construire son nid et récolter de la sève (Santamour *et al.*, 1986 ; Klingeman *et al.*, 2001). Sous l'action du vent ou sous le poids de la neige, la tige fragilisée peut casser au niveau de cette annelure, provoquant une fourche ou une repousse en forme de chandelier, qui est d'autant plus dommageable pour la production de bois d'œuvre qu'elle est basse. Parfois, tous les individus d'une boulaie sont touchés.



Figure 3.3 Annelure provoquée par un frelon, qui fragilise la tige (© Hugues Claessens).

D'autres insectes, tels que les pyrales (Kula 2008), mythes (par exemple *Incurvaria pectinea* ; Niemistö *et al.*, 2008) et pucerons, peuvent endommager les feuilles, apparemment sans conséquences significatives sur la santé ou la croissance de l'arbre. *Phytobia betulae*, une petite mouche, provoque des traces sombres dans le cœur du bois (Figure 3.4), qui peuvent nuire à certaines valorisations esthétiques, mais qui sont recherchées dans d'autres cas. Elles sont limitées au pied de la grume

(Ylioja *et al.*, 2000) et semblent plus fréquentes dans les plantations à grand espacement et sur les anciennes terres agricoles (Niemistö *et al.*, 2008).



Figure 3.4 Traces provoquées par *Phytobia betulae* dans le cœur du bois (vue sur souche fraîchement coupée).

4.5 Arbre aéro-allergénique

Le bouleau est l'arbre le plus aéro-allergénique d'Europe. Son pollen provoque des allergies à plus de 100 millions de personnes et constitue la plus fréquente cause de maladies respiratoires telles que le rhume des foins saisonnier et l'asthme, et engendre des allergies alimentaires par réaction croisée (Panula *et al.*, 2009 ; Lavaud *et al.*, 2014 ; Müller-Germann *et al.*, 2015 ; Hao *et al.*, 2016). Sous certaines conditions météorologiques, il est transporté sur de longues distances, par exemple de la Pologne et de l'Allemagne jusqu'au Danemark (Skjøth *et al.*, 2007). Le changement climatique augmente les concentrations de pollen et allonge la saison pollinique, aggravant les symptômes. Les allergologues déconseillent de planter du bouleau dans les zones urbaines (Beggs *et al.*, 2004 ; Frei *et al.*, 2008 ; Panula *et al.*, 2009 ; Lavaud *et al.*, 2014 ; Thibaudon *et al.*, 2015). En forêt, le bouleau est naturellement de plus en plus présent (**Chapitre 2**), et ses conséquences sur la santé humaine semblent peu liées au fait qu'il y ait ou non une gestion en sa faveur.

5. Opportunités

5.1 Une place grandissante pour le bouleau

5.1.1 Changement climatique et résilience des forêts

5.1.1.1 Incertitudes liées au changement climatique

La capacité des essences à supporter les canicules et sécheresses, présumées plus fréquentes et intenses à l'avenir, reste une inconnue, et le bouleau ne fait pas exception. Plusieurs de ses atouts décrits précédemment font cependant du bouleau une essence particulièrement intéressante face aux incertitudes liées au changement climatique, en raison de : a) sa tolérance à une grande variété de climats et de sols, en ce compris les stations forestières très humides (bouleau pubescent) ou sèches (bouleau verruqueux) ; b) sa capacité d'adaptation aux changements de son environnement, sa reproduction très précoce et sa diversité génétique ; c) son aptitude à coloniser les forêts endommagées par les tempêtes, les dépérissements (Kula 2008) ou incendies (par exemple en Espagne : Reyes *et al.*, 1997 ; en Italie : Ascoli *et al.*, 2010 et en Pologne : Dzwonko *et al.*, 2015) comme essence transitoire cicatricielle ; d) sa faculté de produire rapidement des grumes de bois d'œuvre, diminuant la durée d'exposition aux changements et aux risques.

5.1.1.2 Recours aux peuplements mélangés

Le bouleau se mélange à divers types de peuplements d'autres essences, par exemple avec l'épicéa, le Douglas, le mélèze, le cèdre (*Cedrus atlantica* (Endl.) Carr.), les chênes indigènes ou d'Amérique (*Quercus rubra* L.), le hêtre et l'érable, d'autant plus qu'il utilise généralement les nutriments et l'espace racinaire de façon complémentaire (Brang *et al.*, 2014). Curt et Prévosto (2003) ont observé en France que la biomasse de racines fines de hêtre était plus élevée dans les peuplements mélangés avec le bouleau que dans ceux à base de pins. Dans les régions alpines d'Allemagne et d'Autriche, le bouleau a été considéré comme une espèce de mélange apte à accroître la biodiversité dans les forêts dominées par l'épicéa (Blossfeld *et al.*, 1981), et à remplacer le pin sylvestre dans les zones sensibles aux bris de neige et le hêtre dans les zones exposées aux pluies acides (Günzl *et al.*, 1986 et 1989).

Dans les trouées forestières ou sur les terres agricoles abandonnées, la présence temporaire d'un étage supérieur de bouleau protège les essences plus sensibles, plantées ou naturellement régénérées, contre un excès d'ensoleillement, d'évapotranspiration et de précipitations, le gel tardif ou le vent, et diminue la concurrence de la végétation au sol (Pommerening *et al.*, 2004 ou Stark *et al.*, 2013). Cette méthode, qui imite le processus naturel de facilitation dans les successions forestières, aurait été utilisée en Allemagne et en Suisse depuis près de 200 ans (Pommerening *et al.*, 2004). Le bouleau a démontré son efficacité comme peuplement d'abri du sapin (*Abies alba* Mill.), de l'épicéa, du hêtre et du chêne dans des conditions hémiboréales (Liziniwicz *et al.*, 2009 ; Hynynen *et al.*, 2010 ; Tullus *et al.*, 2012 ; Dudelis 2013) et en Europe occidentale (Pommerening *et al.*, 2004 ;

Stark *et al.*, 2013 et 2015), à condition que sa densité soit judicieusement régulée. Ces types de peuplements à deux étages produisent un plus grand volume total de bois, permettent un approvisionnement en bois à court terme grâce à la récolte de l'essence d'abri à croissance rapide et améliorent la conformation des essences du sous-étage. Cependant, la régénération naturelle peut parfois rencontrer des difficultés pour s'installer, par exemple s'il y a trop de végétation au sol en raison de la lumière abondante sous les boulaies âgées ou peu denses. Dans les stations humides, l'étage de bouleau fonctionne comme une pompe par l'évapotranspiration et abaisse sensiblement la nappe phréatique (Pommerening *et al.*, 2004 ; Price *et al.*, 2003), facilitant l'installation d'autres essences.

La plantation d'enrichissement localisée d'une essence en cellules dans des régénérations de bouleau suscite un intérêt croissant en Europe et a été étudiée avec le chêne en Allemagne, en Suisse et en Autriche (Rock *et al.*, 2004 ; Saha *et al.*, 2012). Ce type de plantation représente une alternative économique et écologique à la plantation traditionnelle en ligne, notamment pour les chênes, les hêtres et les érables (Liziniewicz 2009 ; Saha *et al.*, 2012), qui bénéficient par ce moyen de l'abri protecteur formé par les bouleaux.

Les peuplements mélangés sont plus résistants aux attaques d'insectes en raison de la difficulté pour ces derniers de localiser et d'atteindre les arbres hôtes entourés d'arbres non-hôtes (Damien *et al.*, 2016). Le bouleau possède en outre deux autres effets, dont l'efficacité a été démontrée pour protéger le pin contre la processionnaire (*Thaumetopoea pityocampa*) et le chêne contre les larves mineuses (Castagneyrol *et al.*, 2013 et 2014). Le premier est une dissimulation physique des arbres hôtes par des bouleaux, toujours plus grands au départ ; le second est l'émission de composés chimiques volatils qui d'une part ont une action répulsive, et d'autre part diluent les composés volatils attractifs de l'hôte (Castagneyrol *et al.*, 2014 ; Jactel *et al.*, 2015 ; Damien *et al.*, 2016).

5.1.1.3 Dégâts de gibier

Les dégâts liés à la surpopulation de gibier constituent dans certaines régions une préoccupation pour la régénération des forêts (Reimoser *et al.*, 1996). Les plantations et régénérations naturelles peuvent être partiellement ou entièrement détruites, et nécessiter des protections coûteuses. En Europe du Nord, le bouleau est gravement affecté par l'élan (Niemistö *et al.*, 2008 ; Hynynen *et al.*, 2010 ; Härkönen *et al.*, 2009), qui n'est pas présent en Europe occidentale. Le bouleau y est relativement résistant au gibier dans les trouées forestières, en comparaison avec les autres essences (Konôpka *et al.*, 2020). En cas de surpopulation de cervidé par rapport à la capacité d'accueil du territoire, il peut être abrouiti, en particulier le bouleau pubescent, et frotté, mais : a) presque toutes les autres essences sont plus appétantes que le bouleau verruqueux, à l'exception peut-être du hêtre et de l'épicéa dans certaines conditions (Lehaire *et al.*, 2014) ; b) les bouleaux sont généralement abondants en régénération naturelle, et, en cas de dégâts, suffisamment d'individus subsistent pour constituer un peuplement ; c) la période de vulnérabilité est courte grâce à sa forte croissance juvénile. Ainsi, malgré de possibles pertes, le bouleau est

souvent la dernière essence rescapée (Figure 3.5). Dans les plantations d'autres essences, les jeunes bouleaux servent également de bouclier pour protéger les plants des frottis, et le bouleau pubescent particulièrement contre l'abroustissement.



Figure 3.5 Dans les territoires à très forte concentration de cervidé, le bouleau s'impose comme dernier rescapé pour la sylviculture, par exemple dans cette plantation de hêtres d'environ 15 ans.

5.1.2 Evolutions sociétales

5.1.2.1 Le devenir des parcelles déboisées et terres agricoles abandonnées

Le bouleau agit comme une essence cicatricielle qui colonise les ouvertures dans le couvert forestier, liées entre-autres aux tempêtes, aux dépérissements (par exemple à cause des scolytes) ou aux coupes rases. Ces parcelles ne sont pas toujours replantées (**Chapitre 2**), d'une part parce que les étendues peuvent être très importantes et la plantation est coûteuse, d'autant plus dans les zones peu accessibles, avec un relief accidenté ou un sol pierreux, et d'autres part parce que dans le contexte du changement climatique, des crises sanitaires forestières, de la surpopulation de gibier par endroits et de l'instabilité du marché du bois, la plantation apparaît être un investissement incertain pour certains propriétaires, avec des recettes très lointaines soumises à des risques. Ces zones évoluent donc souvent naturellement en boulaies. Par ailleurs, un nombre croissant de forestiers ne les élimine plus systématiquement, et souhaite même pouvoir en tirer profit en vue de diversifier leur forêt, et d'éviter des coûts de plantation. La préparation mécanisée du terrain, qui précède souvent les plantations, tend aussi à favoriser l'installation abondante du bouleau (Karlsson *et al.*, 2002 ; Fahlvik *et al.*, 2005).

Des recolonisations de bouleau ont récemment eu lieu à grande échelle dans les pays européens où l'activité agricole a diminué, par exemple dans certaines régions de France (Prévosto *et al.*, 2004), d'Europe du Nord (Hynynen *et al.*, 2010 ; Tullus *et*

al., 2012) et d'Europe de l'Est (Kund *et al.*, 2010 ; Tullus *et al.*, 2013 ; Zasada *et al.*, 2014).

Néanmoins, les boulaies sont inadaptées à leur propre régénération (**Chapitre 2**) et, par conséquent, elles accueillent presque toujours d'autres essences dans leur sous-étage, menant à une nouvelle composition pour le peuplement suivant (Pulsford *et al.*, 2014). Le bouleau est donc transitoire, il n'est pas destiné à remplacer à long terme les autres essences qui peuvent se développer sur la station.

5.1.2.2 Nouvelles tendances des politiques forestières

En Europe occidentale (Prévosto *et al.*, 2004 ; Kint *et al.*, 2006), centrale et du Nord (Felton *et al.*, 2010), des politiques forestières recommandent ou encouragent, par exemple au moyen de systèmes de certification tels que FSC et PEFC, la conversion de plantations monospécifiques en forêts plus proches de la nature, incluant des essences indigènes. Il s'agit par exemple de peuplements de pin dans le nord de la Belgique (Kint *et al.*, 2006 ; De Schrijver *et al.*, 2009) et de pin et de *Tsuga* (*Tsuga heterophylla* (Raf.) Sarg.) en Grande-Bretagne (Harmer *et al.*, 2011) transformés en boulaie en raison des contraintes de sol, pour la biodiversité, pour le paysage, pour les services écosystémiques et pour faciliter l'installation spontanée du chêne en sous-bois (Schua *et al.*, 2015). La deuxième conférence ministérielle sur la protection des forêts en Europe (Helsinki, juin 1993) encourage la plantation d'essences, de préférence indigènes, adaptées aux conditions écologiques prédites localement, et à l'intégration d'essences actuellement d'importance mineure mais au potentiel de production de bois (Hemery 2008).

5.2 Production de bois de bouleau de valeur

En Europe occidentale, il n'y a actuellement pas de sylviculture spécifique visant à produire des grumes de haute qualité en bouleau, c'est-à-dire de dimension suffisante, droites et exemptes de nœuds et de pourriture (Hynynen *et al.*, 2010 ; Verkasalo 1997), à part quelques recommandations proposées sur base d'expériences locales (par exemple : Bigot 2000 ; Lemaire 2000 et 2004 ; Wilhelm *et al.*, 2013). Avec une sylviculture adaptée, qu'il convient de définir précisément, il devrait être possible d'obtenir des grumes d'un diamètre de 50 à 60 cm en moins de 60 ans (Hein *et al.*, 2009 ; Hynynen *et al.*, 2010 ; Bonaventura *et al.*, 2016). Certains pays ont sélectionné des peuplements à graines (par exemple, cinq en Belgique), mais, à notre connaissance, il n'existe pas de programme d'amélioration génétique pour le bouleau. En effet, l'une des raisons principales qui encouragerait les forestiers à adopter la sylviculture du bouleau est de tirer profit de la régénération naturelle. Le recours à la plantation est rarement nécessaire, sauf en l'absence de semenciers dans le paysage, ou lorsqu'une forte concurrence de la végétation (fougère, ronce, *etc.*) empêche la germination des graines. C'est pour cette raison qu'il semble peu intéressant, à ce stade du moins, de s'inscrire dans des programmes d'amélioration génétique en Europe occidentale, d'autant plus qu'avec les incertitudes climatiques, il s'avère stratégique de maintenir la grande diversité génétique naturelle de l'essence (Hamrick 2004).

Encadré 3.1 - La Finlande, pays pionnier et leader mondial dans la sylviculture et la valorisation du bouleau

Sylviculture

En Finlande, les recommandations sylvicoles pour la production de bouleau verruqueux ou pubescent, selon la qualité souhaitée, sont très complètes (Niemistö *et al.*, 2008) : évaluation et sélection en fonction du sol et de la région climatique ; choix entre la plantation, la régénération naturelle ou le mélange ; calendrier, intensité et sélection des arbres lors des dépressages et éclaircies ; durée de révolution ; stockage et période de livraison du bois aux usines de transformation.

La grande part de la ressource naturelle en bouleau, majoritairement du bouleau pubescent (**Chapitre 2**), fournit du bois de trituration, notamment pour la production de pâte à papier. Au départ, les grumes de la meilleure qualité (rectitude, dimension, absence de défauts) étaient récoltées dans les forêts naturelles, principalement dans les mélanges avec les résineux, et dans les plantations résineuses, dans lesquelles le bouleau se régénère abondamment. La qualité du bouleau en peuplement mixte est généralement supérieure grâce à la compression des branches basses par les compétiteurs plus petits, qui par ailleurs n'entravent pas le développement de sa cime (Heräjärvi 2002). Mais cette ressource a fortement diminué en raison de sa récolte.

Depuis le début des années 70, elle a été complétée par des plantations de bouleau verruqueux (Niemistö *et al.*, 2008). Celles-ci doivent fournir du bouleau de déroulage et du sciage de bonne qualité. La plantation du bouleau est associée à des programmes intensifs de sélection génétique (sélection des arbres plus, croisements et tests de descendance) depuis les années 1960 en Finlande (Hynynen *et al.*, 2010), et aujourd'hui au moins en Suède, en Estonie, en Lettonie et en Grande-Bretagne (Malcolm *et al.*, 2001). Le bouleau est un modèle idéal car il génère des gains considérables par simple sélection (Koski *et al.*, 2005). La densité de plantation est généralement de 1600 plants/ha. Les éclaircies doivent permettre aux cimes de toujours constituer 50 % de la hauteur de l'arbre. En deçà, le peuplement subit une baisse significative de productivité (Niemistö 1991 ; Niemistö *et al.*, 2008). Dès lors, une première éclaircie, qui descend la densité de bouleaux à 700-800/ha, est réalisée lorsque le peuplement atteint environ 13 à 15 m de hauteur dominante (à environ 20 ans). L'élagage naturel est d'environ 5 à 7 m lors de la première éclaircie, et la neige contribue à l'élimination des branches mortes. Près de 15 ans plus tard, une seconde éclaircie descend la densité à environ 350 bouleaux/ha. La coupe finale des bouleaux, de diamètre moyen de 30 cm, a lieu à 60 ans (Hynynen *et al.*, 2010).

Plus rarement, pour produire des grumes de haute qualité, un élagage artificiel a lieu, d'abord jusqu'à 2,5-3 m sur 600 à 700 arbres quand ils mesurent 6 à 7 m de haut, et ensuite jusqu'à 5-6 m sur 400 à 500 arbres quand ils mesurent au moins 10 mètres de haut. L'objectif est d'obtenir 350 arbres élagués en fin de révolution, qui est souvent, allongée dans ce cas pour obtenir de plus grosses grumes.

La gestion du bouleau a principalement lieu dans les plantations de bouleau

verruqueux, mais il y a également des recommandations pour les régénérations naturelles pures. Un dépressage doit avoir lieu avant que le peuplement n'atteigne 2 à 5 m de hauteur dominante, et ramène la densité (qui peut naturellement être de 30 000 semis/ha) à 1600 bouleaux/ha. L'objectif est de diminuer la compétition, de sélectionner les meilleurs individus, et d'éviter la verse avec la neige (Lemaire 1998 ; Rytter *et al.*, 2007 ; Zâlîtis *et al.*, 2007 ; Hynynen *et al.*, 2010). Néanmoins, l'élagage naturel des bouleaux les plus vigoureux y est généralement insuffisant pour produire des grumes de bonne qualité.

Principaux marchés de valorisation

En Finlande, plus de 80 % du bois de bouleau commercial (à l'exclusion du bois de chauffage), constitué de bois contenant des défauts ou de billes de petit diamètre, est consommé par les industries de la pâte à papier et de trituration, soit 10 millions de m³. En ce qui concerne les grumes de bois d'œuvre, 90 % sont déroulées dans les industries du contreplaqué, qui consomment environ 800 000 à 1 200 000 m³ par an (2014-2016). Les scieries consomment quant à elles annuellement 100 000 à 150 000 m³ de grumes de bouleau (Verkasalo *et al.*, 2017).

5.3 Marchés de valorisation du bouleau

En Europe occidentale, par exemple en Grande-Bretagne et en Irlande (Cameron 1996 ; Renou-Wilson *et al.*, 2010), en Belgique et en France (Dubois *et al.*, 2016), en Allemagne et en Autriche (Günzl *et al.*, 1986 ; Schrör 1987 ; Sachsse 1989 ; Heräjärvi 2002), mais aussi en Europe centrale (Boruvka *et al.*, 2018), le bouleau a mauvaise réputation en raison : 1) de sa capacité à coloniser les parcelles après coupe rase et les jeunes plantations, comme une mauvaise herbe ; 2) de la qualité médiocre de la ressource (**Chapitre 2**) sans gestion adéquate, ne fournissant quasiment pas de bois d'œuvre ; 3) de l'occurrence particulièrement fréquente pour cette essence de dégâts de verse avec la neige. Les données de vente et de marchés de grumes de bois d'œuvre de bouleau échappent donc aux statistiques, au moins pour la Belgique, la France et l'Allemagne. En revanche, dans le sud-ouest de l'Allemagne, il existe un marché pour des grosses grumes de bouleau exemptes de défauts, produites localement par la sylviculture, qui atteignent des prix élevés (Bonaventura *et al.*, 2016). Le bois de bouleau est cependant recherché pour la production de papier et de carton, de panneaux de fibres à densité moyenne ou élevée (MDF et HDF), ou de panneaux à copeaux orientés (OSB). Le bois de chauffage des autres feuillus comme le chêne, le hêtre ou le frêne, est préféré au bouleau, sauf pour les boulangeries et pizzerias au feu de bois (Sachsse 1989 ; Lemaire 1998) et pour les poêles de masse, auxquels il est particulièrement adapté.

Les références sur les valorisations industrielles du bouleau sont dès lors issues de la longue expérience et de la compétence en matière de recherche, de développement et d'utilisation du bouleau en Europe du Nord et dans les Pays baltes, où cette essence est d'une grande importance industrielle (Encadré 3.1) (Luostarinen *et al.*, 2000 ; Heräjärvi 2002 ; Woxblom *et al.*, 2010 ; Roitto *et al.*, 2015). Pourtant, il y a

plusieurs décennies, le bouleau était considéré comme une mauvaise herbe à éliminer des peuplements dans ces pays-là également (Ekström 1987 ; Niemistö *et al.*, 2008 ; Araminienè *et al.*, 2014 ; Cameron 1996). C'est dans les années 1950 que les industries du bois ont pris conscience de sa valeur en tant que matériau polyvalent (Luostarinen *et al.*, 2000 ; Heräjärvi 2002 ; Araminienè *et al.*, 2014).

5.3.1 Opportunités en faveur d'une utilisation accrue du bouleau

5.3.1.1 Produits à base de bois de bouleau

Les propriétés du bois de bouleau (point 3.4 et Tableau 3.1) le rendent particulièrement adapté à de nombreux usages. Les sciages et les placages sont utilisés en ameublement, en ébénisterie, en parquet et en revêtements de sol (Figure 3.6), ainsi que pour les manches d'outils, les équipements sportifs et les instruments de musique (Luostarinen *et al.*, 2000 ; Verkasalo *et al.*, 2009 ; Woxblom *et al.*, 2010). Le bois de bouleau est également utilisé pour la fabrication de berceaux et de jouets pour enfant car, outre son esthétique épurée, il n'est pas toxique et ne provoque pas d'échardes.

Les bois lamellés-croisés (CLT) et les bois lamellés-collés (GLT) sont de plus en plus utilisés dans la construction en raison de leur multifonctionnalité, de leur compétitivité économique et de leur conformité en matière de sécurité incendie. Les CLT et GLT de bouleau possèdent des propriétés mécaniques supérieures à ceux produits en épicéa ou en pin (Ehrhart *et al.*, 2015 ; Jeitler *et al.*, 2016), permettant une portée plus longue pour une section donnée, ou une section plus réduite pour une portée donnée. La couleur claire du CLT de bouleau contribue à l'esthétique des éléments muraux ou de sol (Verkasalo *et al.*, 2017). Si le bois est coloré mais qu'il ne s'agit pas d'une pourriture, le CLT peut être utilisé pour les éléments non apparents. Une maison en CLT (Figure 3.7) et un hall industriel en GLT de bouleau construits en Autriche ont respectivement nécessité 10 à 15 % et 20 à 25 % de volume de bois en moins que s'il avait s'agit de bois d'épicéa (Jeitler *et al.*, 2016).



Figure 3.6 Parquet réalisé en bouleau par un menuisier belge, avec de la ressource locale (© Geoffray Arnould)



Figure 3.7 Maison construite en Autriche avec des panneaux CLT de bouleau (© www.hhh.at)

Le traitement thermique améliore la stabilité dimensionnelle et la résistance à la pourriture du bois de bouleau, et il en foncé la couleur. Son effet sur les différentes propriétés mécaniques peut être positif ou négatif (Heräjärvi 2002 ; Verkasalo *et al.*, 2017 ; Möttönen *et al.*, 2015 ; Möttönen *et al.*, 2018) selon la température utilisée et l'utilisation prévue, mais les modifications sont par exemple moindres que dans le cas du bois de hêtre (Boruvka *et al.*, 2018 et 2019). L'augmentation temporaire de l'élasticité par compression permet également de former des meubles avec des courbes particulières (Heräjärvi 2002 ; Verkasalo *et al.*, 2017). Les huiles et les films de phénol ou de mélamine augmentent la résistance du contreplaqué de bouleau à l'usure, aux UV et aux intempéries, sa durabilité et sa dureté. Ainsi, même si le bois de bouleau présente déjà une dureté modérée, cette propriété peut être facilement élevée (Verkasalo *et al.*, 2009 et 2017).

Le contreplaqué de bouleau est très utilisé pour les éléments de construction, les moulures, l'ameublement, et comme panneau intérieur, notamment pour le sol, dans les camions, bus, wagons de train ou les navire-citerne de gaz naturel liquéfié (Verkasalo *et al.*, 2017). Le contreplaqué et le sciage de bouleau sont aussi idéaux

pour revêtir les salles de concert en raison de leurs qualités acoustiques et visuelles (par exemple dans les salles de renommée mondiale de Katowice en Pologne et de Lahti en Finlande).

La pâte chimique et semi-chimique et les papiers et cartons fabriqués à partir de bois de bouleau ont d'excellentes propriétés en raison de ses fibres relativement courtes mais rigides et de sa couleur claire uniforme (Niemistö *et al.*, 2008 et Verkasalo *et al.*, 2017). Les extraits du bois sont utilisés dans des applications à forte valeur ajoutée, par exemple dans les textiles, les pneus, les revêtements, les peintures et le tabac, ainsi que dans des produits alimentaires et pharmaceutiques (Nurmi 1997 ; Niemistö *et al.*, 2008 ; Viikari *et al.*, 2011 ; Roitto *et al.*, 2015 ; Ahmad *et al.*, 2016 ; Verkasalo *et al.*, 2017).

Ces diverses utilisations du bouleau permettent de valoriser :

- les grumes de haute qualité (droites, de dimension suffisante, sans nœuds ou rares nœuds sains, sans coloration) en tranchage, déroulage ou en sciage pour former du bois d'œuvre de haute qualité (Gobakken 2000 ; Heräjärvi 2002 ; Verkasalo *et al.*, 2017) ;
- les grumes de qualité moyenne (possédant de légères courbes, peu de nœuds et une pourriture limitée du cœur) en déroulage pour produire du contreplaqué ou du sciage ;
- les bois de qualité inférieure et de petite dimension en papier, panneau en bois déchiqueté, carton ou en bois énergie.

En outre, il existe des marchés de niche spécifiques au bouleau : les bûches de petite dimension pour les nichoirs ou l'entretien des cheminées d'aciéries ; les grumes présentant des figurations spécifiques telles que le bois flammé et les loupes ou des stades précoces de pourriture (Dubois *et al.*, 2017b) ; la décoration. Les produits qui contiennent une coloration ou des taches dues à la *phytophthora betulae* sont parfois vendus comme « rustiques » (Wiedenbeck *et al.*, 2004).

5.3.1.2 Produits forestiers non ligneux

Le bouleau a de sérieuses opportunités commerciales pour les produits forestiers non ligneux (PFNL) (Verkasalo *et al.*, 2017). La sève est commercialisée sur le marché finlandais depuis de nombreuses années et la demande ne cesse de croître. Les revenus provenant de la location d'une boulaie à une entreprise d'exploitation de sève sont parfois supérieurs à ceux provenant de la vente des grumes. Cette activité se développe maintenant aussi dans les pays d'Europe occidentale. Les nouvelles technologies permettent de produire des boissons non périssables à base de concentré de sève, en conservant ses propriétés et en améliorant ses caractéristiques organoleptiques (Bilek *et al.*, 2018).

En Finlande, la culture de champignons, par exemple le chaga (*Inonotus obliquus*), qui pousse sur le tronc des bouleaux, le Reishi ou Ganoderme luisant (*Ganoderma lucidum*) et la Pholiote changeante (*Kuehneromyces mutabilis*), font l'objet de nouvelles chaînes de valorisation rentables et de recherches. Ces produits sont de

plus en plus demandés sur le marché des nutraceutiques et des compléments alimentaires (Vanhanen *et al.*, 2014).

L'écorce du bouleau contient des molécules utilisées dans le traitement de nombreuses pathologies humaines, par exemple pour la prévention ou le traitement des maladies cardiovasculaires, du diabète, de l'obésité et du cancer. Elles ont des propriétés uniques bactéricides, antivirales (notamment contre le VIH), anti-inflammatoires, antiarthritiques, antioxydantes et antitumorales (en particulier contre le mélanome humain). Elles sont également utilisées dans les cosmétiques, les colles à bois, les agents de protection du bois, les peintures, les produits phytosanitaires et les détergents (Roitto *et al.*, 2015 ; Verkasalo *et al.*, 2017 ; Hiltunen 2004 ; Rastogi *et al.*, 2015 ; Rizhikovs *et al.*, 2015). Les plus connues sont le bétulinol, la subérine et le xylitol (Viikari *et al.*, 2011 ; Roitto *et al.*, 2015), utilisés depuis les années 1980 pour les soins dentaires.

5.3.2 Le marché du bois en Europe occidentale

Les industries du bois d'Europe occidentale ont concentré leurs investissements sur la transformation des résineux. Les ressources en bois feuillus sont globalement sous-utilisées (Mantau *et al.*, 2010 ; Kleinschmit 2017) : une grande part du volume récolté alimente le secteur de la bioénergie (Teischinger 2017), et beaucoup de grumes de bois d'œuvre sont exportées vers l'Asie. Les propriétés techniques des bois résineux sont généralement supérieures en raison de la forme de l'arbre, naturellement plus droite, et de ses nœuds plus petits. D'autre part, en feuillu, le sciage, le séchage et les autres processus nécessitent plus de connaissances et parfois un équipement spécial, et les propriétés variables entre et au sein des essences empêchent les économies d'échelle (Teischinger 2017). En revanche, le bouleau a l'avantage de partager certaines propriétés avec les résineux, par exemple, une courte révolution, des diamètres de grume similaires (**Chapitre 4**), et sa récolte peut être mécanisée avec les mêmes machines (Niemistö *et al.*, 2008 ; Richter 2011 ; Verkasalo *et al.*, 2017). Les placages de bois et les panneaux OSB, MDF et HDF de bouleau et de résineux peuvent être fabriqués dans les mêmes usines avec une technologie similaire (Verkasalo *et al.*, 2007 ; Kumar *et al.*, 2018).

Au cours du 21^{ème} siècle, la proportion en essences feuillues va considérablement augmenter au détriment des résineux (Berthold *et al.*, 2017 ; Bollmus *et al.*, 2017 ; Kleinschmit 2017), notamment sous l'influence des stratégies sylvicoles européennes, qui encouragent les propriétaires forestiers et les autorités publiques à accroître le pourcentage en essences feuillues dans les forêts, mais aussi par les récoltes précipitées ces dernières années en raison de problèmes sanitaires touchant à grande échelle les résineux (chablis, dépérissements, scolytes, *etc.*). Les effets concomitants de l'importante consommation en bois des industries de transformation des résineux et de l'évolution de peuplements résineux en peuplements feuillus dans de nombreuses forêts, entraînera inévitablement d'ici quelques décennies une pénurie de l'offre et donc, une hausse du prix du bois résineux. Par conséquent, la compétitivité des feuillus sur les marchés devrait s'accroître, et la substitution partielle des résineux par des feuillus dans le contexte industriel semble réaliste

(Kleinschmit 2017 ; Teischinger 2017). La production de placages, de panneaux de bois et de produits d'ingénierie à partir de bois feuillus a d'ailleurs été redéveloppée au cours de cette décennie (Berthold *et al.*, 2017 ; Kumar *et al.*, 2018).

Le moteur principal de l'utilisation du bois en Europe est la construction, qui constitue un marché croissant (Richter 2011 ; Berthold *et al.*, 2017). Les taxes sur le carbone favorisent l'utilisation du bois pour la séquestration de dioxyde de carbone et pour sa substitution aux matières premières non renouvelables (Richter 2011 ; Caurla *et al.*, 2013). Des législations tendent à fixer un pourcentage obligatoire de bois dans les nouvelles constructions (par exemple en France ; Richter 2011), et encouragent l'utilisation du feuillu (par exemple en Allemagne ; Bollmus *et al.*, 2017).

La mode actuelle favorise les couleurs claires en ameublement. Le plus grand fabricant et négociant de meubles au monde, IKEA, utilise 18 % de bois de bouleau, qui est la deuxième essence utilisée après le pin (Trubins 2009). Selon des scieries en Belgique et en France, jusqu'à présent, la qualité médiocre des grumes (**Chapitre 2**) ne leur permettait pas de proposer des produits en bouleau à leurs clients. Cependant, certaines d'entre elles souhaiteraient utiliser du bouleau local, par exemple, en ameublement, dans la construction ou en tant que bardage extérieur après traitement thermique. Ces possibilités sont examinées non seulement en Europe occidentale (par exemple, Boedts 2016), mais aussi en Europe centrale (Boruvka *et al.*, 2019).

5.3.3 Disponibilité et demande en bois de bouleau

Malgré la forte position concurrentielle de l'Europe du Nord, des Pays baltes et de la Russie pour l'exportation de produits en bouleau vers l'Europe occidentale, cette dernière montre un intérêt dans le développement et l'exploitation des ressources locales afin de diminuer le recours au transport, de plus en plus coûteux, de matières premières et de produits. L'introduction d'une taxe carbone appuierait cette tendance (Caurla *et al.*, 2013). Les règlements nationaux, et les freins à l'importation (notamment liés aux conflits internationaux et stratégies et réponses géopolitiques) constituent des incertitudes très problématiques pour les transformateurs. De plus, la production locale donne une image positive aux entreprises.

Encadré 3.2 - Disponibilité en bouleau en Europe du Nord et dans les Pays baltes

En Finlande, en Estonie et en Lettonie, les grumes de bouleau de haute qualité sont principalement utilisées par les industries du contreplaqué et du placage. Étonnamment, la Finlande et la Suède ont peu de grandes scieries de bouleau, mais le sciage est assez développé dans les Pays baltes et en Europe de l'Est, qui accroissent leur production de meubles « prêts à monter » (Verkasalo *et al.*, 2009 ; Kilpeläinen *et al.*, 2011 ; Dudelis 2013).

En Europe du Nord et dans les Pays baltes, la ressource en grumes de bouleau est presque intégralement exploitée, et depuis les années 1990, les industries importent de grandes quantités de grumes de haute et de moyenne qualité, et du bois de pâte à papier, principalement en provenance de Russie (Verkasalo *et al.*, 2015 et 2017). Cependant, au cours des dix dernières années, ces importations ont diminué à cause de la hausse des coûts et de la production croissante de contreplaqué et de bois de sciage en Russie (Verkasalo *et al.*, 2009 et 2017 ; Väkky *et al.*, 2011). Les conflits générés depuis l'invasion russe de l'Ukraine en 2022 aggravent ce problème.

En Finlande et en Suède, le stock de grumes de haute qualité diminue dans les boulaies naturelles (Woxblom *et al.*, 2010 ; Verkasalo *et al.*, 2015). En Finlande, l'approvisionnement futur en bois de placage et de sciage est attendu des plantations de bouleaux verruqueux, complétées par les forêts naturelles mixtes d'épicéas, de bouleaux et de pins (Verkasalo *et al.*, 2009 et 2015). Cependant, le recours à la plantation s'est effondré depuis la fin des années 1990, principalement à cause des importants dégâts causés par les élans (Niemistö *et al.*, 2008 ; Härkönen *et al.*, 2009 ; Viherä-Aarnio 2009 ; Hytönen *et al.*, 2014). En conséquence, la disponibilité en grumes de haute qualité diminue, tandis que la demande reste forte (Heräjärvi 2002 ; Niemistö *et al.*, 2008).

6. Menaces

6.1 Forte croissance juvénile à maîtriser en sylviculture

Le bouleau colonise souvent les jeunes peuplements d'autres essences (**Chapitre 2**). Il les surpasse rapidement en hauteur, entrave leur croissance et risque de leur provoquer des blessures et fourches à cause du fouettage, comme décrit par exemple pour le hêtre (Liziniwicz *et al.*, 2009), le chêne (Liziniwicz *et al.*, 2016), l'épicéa (Dudelis 2013) et le mélèze (*Larix sp.*) (Kaitaniemi *et al.*, 2010). Même si le forestier élimine les bouleaux, ceux-ci rejettent vigoureusement de souche et rétablissent rapidement la concurrence. Les peuplements mélangés avec le bouleau doivent dès lors être gérés et organisés scrupuleusement afin d'éviter ces problèmes.

En outre, si la sylviculture du bouleau ne tient pas compte de sa croissance forte et précoce, elle échouera dans la production de grume de haute qualité. Aussi, les bouleaux qui développent un rapport hauteur/diamètre élevé et une couronne asymétrique, ce qui est le cas dès les premières années dans les régénérations

naturelles denses, présentent un risque élevé de verse avec la neige (de Champs 1987 ; Rytter *et al.*, 2007 ; Hein *et al.*, 2009).

6.2 Maladies et ravageurs

Les bouleaux sont actuellement peu affectés par des parasites ou maladies problématiques, mais le changement climatique et la mondialisation pourraient amener des changements. Quelques exemples ont été signalés ces dernières années :

- en Écosse, des jeunes bouleaux de 5 à 10 ans ont dépéri après leur plantation sur des terres agricoles, probablement à cause de deux champignons pathogènes (De Silva *et al.*, 2008, Green *et al.*, 2007) ;
- les défoliations dues aux insectes pourraient au moins doubler dans les boulaies d'Europe du Nord, mais devraient rester marginales dans les régions plus méridionales (Kozlov 2008) ;
- entre le début des années 1930 et la fin des années 1950 en Amérique, les bouleaux ont connu un dépérissement dont la cause n'a jamais été déterminée (McLaughlin 2000) ;
- en 2015 et en 2016, dans la région de Berlin, le « virus d'enroulement des feuilles de bouleau » (*Birch leaf roll-associated virus*) a causé des dégénérescences de houppiers et le dépérissement précoce de bouleaux de bord de route (Landgraf *et al.*, 2017 ; Rumbou *et al.*, 2018). Ce phénomène a été décrit pour la première fois en Europe du Nord, plus fréquemment depuis l'été 2002, touchant des bouleaux d'âge et de dimension divers dans des parcs et en forêt (Von Bargen *et al.*, 2009) ;
- un coléoptère, *Agrius anxius*, endémique d'Amérique du Nord, a entraîné au cours du 20^{ème} siècle la mort de bouleaux verruqueux importés sur ce continent. L'insecte n'a à ce jour jamais été détecté en Eurasie (Muilenburg *et al.*, 2012).

6.3 Peu de demande en bouleau par les industries

En Europe du Nord, la grande disponibilité en bois de bouleau, qui est le principal feuillu, a facilité le développement d'un marché spécifique et l'établissement d'industries, alors qu'en Europe occidentale, la gestion forestière et l'utilisation industrielle du bois feuillu reposent principalement sur le chêne et le hêtre, et quelques feuillus nobles (frêne, érable sycomore, merisier ou chêne rouge d'Amérique). La (re)connaissance du potentiel d'utilisation du bois de bouleau, proche de celui du hêtre, suffira-t-elle à convaincre l'industrie et les consommateurs d'Europe occidentale à changer respectivement leurs habitudes de production et de consommation ? Le bouleau n'est pas assez connu comme matériau de construction potentiel par les industries de la construction, les entrepreneurs et les architectes. Des normes industrielles (en particulier le marquage CE), des méthodes de triage, des règles de classement et des pratiques d'évaluation sont nécessaires pour que les produits en bois de bouleau puissent être utilisés dans les usines (Verkasalo *et al.*,

2017). Des déclarations environnementales de produits (EPD) sont également nécessaires pour réglementer les marchés intérieurs et d'exportation.

6.4 Méconnaissance du bouleau de la part des forestiers

En dehors de la Finlande et des Pays baltes, il n'y a pas de formation ni de sensibilisation adéquate des professionnels et des propriétaires forestiers sur la gestion sylvicole du bouleau et sur les utilisations de son bois. Les forestiers ne sont dès lors pas enclins à le laisser se développer sur les parcelles, ni à s'engager dans sa sylviculture. De plus, sans connaissances sur ses besoins sylvicoles, ils risquent d'échouer dans la production de grumes de haute qualité.

7. Discussion

Dans ce chapitre, nous avons analysé le potentiel du bouleau pour la gestion forestière et l'industrie du bois dans le contexte climatique et socio-économique changeant de l'Europe occidentale. Les principales forces et faiblesses du bouleau ont été identifiées, ainsi que les opportunités et menaces le concernant (Tableau 3.2).

Parmi ses forces, une grande variété de conditions climatiques lui convient ; il est performant sur presque tous les types de sols (lorsqu'on additionne les niches écologiques des bouleaux verruqueux et pubescent) ; il possède une capacité d'adaptation physique aux modifications de son environnement et une grande diversité génétique ; à ce jour, il n'est pas sérieusement affecté par des parasites ou maladies ; dans les trouées suffisamment lumineuses pour permettre sa croissance normale, il est l'une des essences les plus résistantes en cas de surpopulation de gibier.

De plus, cet arbre indigène favorise la biodiversité : a) par les espèces qui lui sont directement associées ; b) par les conditions de luminosité qu'il confère au sous-étage ; c) en constituant le stade de début de succession forestière. De nombreuses espèces animales, fongiques et végétales se nourrissent ou trouvent leur habitat dans les boulaies.

Le bouleau améliore les conditions de croissance ligneuse d'une station en optimisant le fonctionnement du sol (par exemple, sa porosité, l'infiltration de l'eau, sa fertilité, l'activité des microorganismes et de l'entomofaune) et la régulation de la lumière et du microclimat. Il peut se montrer complémentaire aux autres essences dans une diversité de peuplements mélangés. Le bouleau protège également d'autres essences contre certains types de parasites en raison de sa croissance en hauteur rapide et précoce et de l'émission de composés chimiques volatils. Le bouleau agit comme une essence d'abri, qui protège et facilite le développement d'autres essences, plantées ou naturellement régénérées.

En outre, le contexte socio-économique et climatique actuel tend à accroître la présence du bouleau dans les forêts. Il colonise par exemple les coupes rases et trouées forestières non reboisées, notamment après des tempêtes ou des

dépérissements d'autres essences (**Chapitre 2**), ou confrontées à la surpopulation de gibier. Il bénéficie également des politiques promouvant la diversification des forêts, d'une perception favorable du public pour ses rôles écologiques dans l'écosystème et pour ses atouts en tant qu'essence esthétique, mais aussi depuis peu de la part de forestiers et industriels qui s'intéressent à son potentiel de production de bois de valeur : les caractéristiques visuelles et mécaniques du bois de bouleau sont adaptées à de nombreux usages, y compris l'ameublement et la construction.

Sa croissance rapide et précoce devrait permettre d'obtenir des grumes de haute qualité, c'est-à-dire droites, de dimension suffisante et sans nœuds ni pourriture, avant 60 ans. Toutefois, cela nécessite une sylviculture adaptée pour maîtriser ses faiblesses, afin d'optimiser l'accroissement diamétrique et de contrôler le risque de pourriture liée aux plaies, aux branches mortes et au vieillissement. Au vu du contexte industriel de l'Europe occidentale, c'est la production de ce type de grume, valorisable par les scieries et les unités de tranchage et de déroulage, qui devrait être visée dans un premier temps par la sylviculture du bouleau, pour espérer un revenu nettement supérieur à celui des bois conventionnels (Hynynen *et al.*, 2010 ; Vanhellefont *et al.*, 2016). Avant qu'une filière bouleau ne se mette en place, ce sont les grosses grumes sans défauts qui ont le plus de chances d'avoir une valorisation noble. D'autant plus qu'actuellement, il n'y a pas encore de perspective pour les industries d'Europe occidentale de devenir compétitives dans le micro-déroulage de grumes de bouleau de qualité moyenne (dimension 28-38 cm), comme cela est largement développé en Finlande, en Lettonie, en Estonie ou en Russie. Les bouleaux qui ne bénéficient pas de cette sylviculture offrent des possibilités de matière première pour la fabrication des panneaux de particules ou de fibres de bois, du papier et du carton, parfois même pour la construction, et des produits bioénergétiques, mais ils peuvent également fournir des PFNL. En outre, ils contribuent à la biodiversité, à l'amélioration des propriétés du sol et peuvent être utilisés pour leurs atouts sylvicoles au service des autres essences.

Actuellement, dans la plupart des pays d'Europe occidentale, les valorisations industrielles spécifiques au bois de bouleau se limitent à la fabrication du papier, du carton et des panneaux de particules et de fibres. En Europe du Nord et dans les Pays baltes, l'industrie est largement développée. La Finlande, les Pays baltes et la Russie exportent de grands volumes de contreplaqué de bouleau et de bois scié vers l'Europe occidentale, mais aussi des grumes de bouleau de haute qualité pour la fabrication de placages, principalement en Allemagne et au Royaume-Uni, et du bois de bouleau de trituration et de pâte à papier (Luostarinen *et al.*, 2000 ; Heräjärvi 2002 ; Verkasalo *et al.*, 2007). Néanmoins, la ressource en bouleau est en augmentation en Europe occidentale, tandis que l'Europe du Nord pourrait être confrontée à une diminution dans sa disponibilité en grumes de haute qualité. Le coût du transport et la conscientisation environnementale des entreprises et des consommateurs peuvent encourager l'utilisation des ressources locales. Les contraintes majeures à son utilisation sont les caractéristiques de la ressource, actuellement dispersée et de qualité médiocre (**Chapitre 2**). Des volumes plus

importants de bouleau, dont des grumes de haute qualité, pourraient cependant être formés assez rapidement à partir des nouvelles régénérations naturelles (**Chapitre 2**). La mobilisation du bois peut être soutenue par des normes sur les produits et des normes environnementales, et par des investissements dans les technologies de production dans les petites et moyennes entreprises de transformation du bois, ainsi que dans les PFNL (sève, champignons, produits d'extraction, chimie du bois et de l'écorce, *etc.*). Le programme de recherche européen EHIA (European Hardwoods Innovation Alliance), lancé en 2016, a prédéfini 16 thèmes d'innovation et de recherche sur l'utilisation à valeur ajoutée des feuillus en Europe, dont le bouleau (Kleinschmit 2017). Ces thèmes peuvent servir de lignes directrices lors des premières étapes de l'évaluation des matières premières, du choix de produits, des initiatives de développement de produits et de la mise en place de chaînes de valorisation et de production, d'approvisionnement, de transformation et de distribution.

Le défi est de convaincre les forestiers de s'investir dans le bouleau alors que sa transformation, ses produits et ses marchés sont encore inconnus en Europe occidentale. Il faut toutefois citer l'existence d'un marché très valorisant pour les grumes de haute qualité produites par une sylviculture adaptée depuis plusieurs décennies en Sarre, en Allemagne (Bonaventura *et al.*, 2016). En raison de sa vigueur et de son tempérament de colonisateur, le bouleau a aussi été considéré comme une mauvaise herbe envahissante. En effet, dans les jeunes peuplements, les forestiers doivent strictement contrôler sa régénération afin qu'il n'entrave pas le développement des autres essences. Cependant, suite aux récentes crises sanitaires forestières, de plus en plus de forestiers recherchent des solutions alternatives en matière de sylviculture et d'essences d'avenir (**Chapitre 1**), et certains d'entre eux sont confiants quant au développement de marchés pour le bois de bouleau de haute qualité. Quelques industries du bois montrent de l'intérêt pour introduire cette essence dans leur chaîne de valorisation. De toutes façons, les industries devront indéniablement s'adapter au fait que certaines essences commerciales, qui forment la base du marché du bois d'aujourd'hui, risquent de voir leur disponibilité diminuer dans le futur, alors que la demande de produits bois est forte et en hausse. Le bouleau possède des propriétés intéressantes et sa récolte, son transport et sa première transformation (par exemple le sciage ou le déroulage) sont similaires à ceux des résineux. La contrainte majeure posée par le bouleau dans la chaîne d'approvisionnement est l'intolérance des grumes à un long stockage en forêt, ou sur les quais des scieries.

Tableau 3.2 Synthèse des Atouts, Faiblesses, Opportunités et Menaces du bouleau pour la gestion forestière et l'industrie du bois dans le contexte changeant, climatique et socio-économique, de l'Europe de l'Ouest.

ATOUTS	FAIBLESSES
<p>Capacité d'adaptation</p> <ul style="list-style-type: none"> - diversité génétique et plasticité phénotypique élevées, et court temps de génération ; - performant (en additionnant les niches écologiques des 2 espèces) dans un large éventail de climats et sols ; - <i>a priori</i> résistant aux stress climatiques. <p>Productif</p> <ul style="list-style-type: none"> - accroissement moyen en volume de 5 à 10 m³ ha⁻¹ a⁻¹ à 50 ans, voire plus. <p>Améliore résilience et biodiversité forestières</p> <ul style="list-style-type: none"> - en se régénérant abondamment dans les trouées, restaurant le potentiel de production bois des forêts ; - en améliorant le fonctionnement du sol (porosité, infiltration de l'eau, fertilité, activité des microorganismes et de l'entomofaune, <i>etc.</i>) ; - en créant des conditions facilitant l'immigration et le développement d'autres essences en sous-bois ; - grande diversité d'espèces spécifiques et/ou associées à la luminosité du sous-bois et/ou au stade de succession forestière qu'il forme. <p>Bonnes propriétés visuelles et techniques du bois.</p> <p>Aspect esthétique et paysager de l'arbre.</p>	<p>Faible résistance aux microorganismes</p> <ul style="list-style-type: none"> - une plaie engendrée par les opérations sylvicoles ou le gibier entraîne une pourriture ; - dès 60 ans, le bois et les racines risquent de se décolorer ou de pourrir ; - les produits en bois ne peuvent pas être utilisés à l'extérieur sans traitement spécifique (classe 5 de durabilité) ; - les grumes ne tolèrent pas un stockage prolongé en forêt ou sur le quai des scieries en raison de dépréciations par les champignons et insectes. <p>Croissance en diamètre affectée par la concurrence intraspécifique dès le jeune âge.</p> <p>Certains insectes nuisent à la qualité du bois</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le frelon européen peut causer des fourches ; - <i>Phytobia betulae</i> provoque des traces noires dans le bois à la base de la grume. <p>Important arbre aéroallergénique</p>

OPPORTUNITES	MENACES
<p>Une plus grande place avec les changements globaux</p> <ul style="list-style-type: none"> - en colonisant les espaces ouverts par des chablis et déperissements d'autres essences, les jeunes plantations, les coupes rases non replantées ou terres agricoles abandonnées ; - en étant une des essences les plus résistantes aux dégâts de gibier dans les grandes trouées ; - convenant à une variété de peuplements mélangés et/ou comme peuplement d'abri d'autres essences, avec des propriétés spécifiques pour en protéger certaines contre des ravageurs ; - favorisé par les politiques forestières européennes pour transformer les plantations monospécifiques en forêts plus naturelles incluant des essences indigènes. <p>Grumes de haute qualité produites en moins de 60 ans.</p> <p>Le bois et les PFNL permettent de nombreuses utilisations.</p> <p>Demande croissante de produits à base de bois dans le secteur de la construction, à laquelle le bouleau peut répondre.</p> <p>La pénurie probable future en bois résineux pourrait encourager l'industrie à mieux valoriser la ressource feuillue, dont le bouleau grâce à sa rectitude, sa courte révolution, sa récolte, son transport et sa transformation en partie similaires aux résineux.</p>	<p>Par sa croissance précoce rapide, le bouleau peut entraver la croissance et la qualité des autres essences dans un mélange ;</p> <p>L'apparition ou l'introduction d'un ravageur ou d'une maladie affectant sa survie, par exemple <i>Agrilus anxius</i>.</p> <p>La transformation, les produits et le marché du bouleau sont méconnus en dehors de la Finlande, des Pays baltes et de la Russie. Il peut être difficile de convaincre :</p> <ul style="list-style-type: none"> - les propriétaires forestiers sur la gestion rentable et les marchés potentiels du bouleau ; - les industries du bois et les entreprises de construction sur sa disponibilité, son potentiel et sa compétitivité ; <p>Trop peu d'information des professionnels et des propriétaires forestiers sur la gestion des bouleaux.</p> <p>Absence de normes CE et de méthodes de classement et d'évaluation pour les produits en bois de bouleau.</p>

8. Conclusions et perspectives

L'analyse a mis en évidence : a) le rôle positif du bouleau pour la biodiversité, pour le fonctionnement des écosystèmes et au service d'autres essences, dans un contexte de volonté d'adaptation et de renforcement de la résilience des forêts ; b) que la transformation du bois de bouleau pour produire du sciage, du placage, du contreplaqué, du GLT, du CLT, du papier et des panneaux, ou des produits d'extraction et des PFNL, est parfaitement connue et maîtrisée, en particulier en Europe du Nord ; et c) la possibilité de produire du bois de bouleau de haute qualité dans nos régions, à condition de maîtriser ses faiblesses sylvicoles. Le bouleau a un grand potentiel de développement dans le contexte forestier et industriel d'Europe occidentale, en considérant les objectifs écologiques et les évolutions socio-économiques, et compte tenu des incertitudes liées aux changements globaux.

Toutefois, ces données semblent contradictoires avec le manque d'intérêt pour le bouleau de la part des forestiers en Europe occidentale. Cela s'est traduit par l'absence d'opérations sylvicoles en sa faveur et même par l'élimination volontaire de sa régénération naturelle au sein des peuplements forestiers. Cette situation n'a pas permis le développement d'une ressource en bois de qualité, et l'industrie ne s'est dès lors pas intéressée à sa valorisation. Par conséquent, en l'absence d'un marché spécifique pour les grumes de bouleau, et méconnaissant ses exigences sylvicoles pour pouvoir produire du bois d'œuvre, des forestiers montrent des réticences à investir dans sa production, maintenant ainsi la piètre qualité de la ressource. Pour briser cette spirale négative, les besoins prioritaires en matière de recherche, de développement et de sensibilisation semblent se résumer en trois objectifs :

1. Sensibiliser, d'une part, les forestiers sur la possibilité de produire et de vendre des grumes de haute qualité lorsqu'une gestion forestière adéquate est appliquée, et d'autre part, informer les scieries et les entreprises de transformation du bois, de la construction, les architectes, mais aussi les consommateurs (*Business to Business* et *Business to Consumer*) sur les possibilités offertes par les matières premières à base de bouleau, ainsi que sur les produits et les utilisations.
2. Définir des directives sylvicoles pour le bouleau, adaptées à l'Europe occidentale, en tenant compte des caractéristiques de l'essence (exigence en lumière, croissance rapide et précoce, courte durée de vie, grande sensibilité à la pourriture) afin de créer et de mettre sur le marché une ressource en bois d'œuvre, des PFNL, et de contribuer à la biodiversité et au fonctionnement des écosystèmes.
3. Développer l'industrie de transformation du bois de bouleau et les marchés correspondants, fournir des normes pour le classement et les méthodes d'évaluation afin de mieux définir les utilisations potentielles du bois pour les architectes et entreprises du bâtiment.

4

Croissance diamétrique de bouleaux verruqueux bénéficiant d'une sylviculture d'arbre-objectif en Europe occidentale



Ce chapitre est adapté de l'article scientifique :

Dubois, H.; Claessens, H.; Ligot, G., 2021. Towards silviculture guidelines to produce large-sized silver birch (*Betula pendula* Roth) logs in western Europe. *Forests*, **12**, 599, 14p

<https://doi.org/10.3390/f12050599>

1. Introduction

Pour produire en Europe occidentale des grumes de bouleau de haute qualité, c'est-à-dire droites, de dimension suffisante pour une utilisation rentable en sciage, déroulage ou tranchage, et exemptes de nœuds et de coloration ou de pourriture, des interventions sylvicoles précises sont nécessaires (**Chapitre 3**). En effet, le bouleau possède des caractéristiques très spécifiques qui le distinguent des essences de production conventionnelles : 1) une forte sensibilité de son bois à la coloration et à la pourriture, liées aux plaies, aux branches mortes qui se détachent très tardivement du tronc, et au vieillissement (Luostarinen *et al.*, 2000 ; Niemistö *et al.*, 2008 et 2019) ; 2) une dynamique rapide de croissance diamétrique, particulière aux essences pionnières ; 3) une grande exigence en lumière et une faible résistance à la concurrence (**Chapitre 3**).

D'après Hein *et al.* (2009), dans le sud-ouest de l'Allemagne, l'accroissement du diamètre du tronc à 1,30 m de hauteur (d130) est potentiellement élevé pendant ses 10 à 20 premières années de vie. Dans les régénérations naturelles de bouleau, qui peuvent être très denses (par exemple, Lemaire (1998) comptait près de 170 000 semis/ha avant 7 ans), contraignant fortement le développement de la cime (Zâlitis *et al.*, 2007 ; Rytter *et al.*, 2007 ; Hynynen *et al.*, 2010 ; Rytter, 2013), l'accroissement diamétrique des dominants semble maximal lorsque le peuplement a 5 à 7 ans, et diminue ensuite fortement (Lemaire 1998 ; Prévosto *et al.*, 1998 et 1999). Et d'après Cameron (1996), "*au plus longtemps un peuplement de bouleaux reste sans gestion, au moins il réagit à l'éclaircie*". Vanhellefont *et al.* (2016) ont constaté que l'accroissement diamétrique était étroitement lié à l'âge et à la taille de la cime des bouleaux, et qu'ils ne retrouvaient jamais une croissance élevée si l'expansion de leur cime était entravée pendant leur jeunesse. Quant aux propriétés physiques et mécaniques du bois de bouleau, elles sont conservées quelle que soit la largeur des cernes (Cameron *et al.*, 1995).

Toutes ces spécificités convergent vers une méthode de sylviculture qui consiste à favoriser la croissance diamétrique précoce d'un nombre limité d'arbres désignés dans le peuplement, appelés arbres-objectif (AO) (Wilhelm *et al.*, 2013), et à les élaguer lorsque les branches sont fines (Hein *et al.*, 2009), c'est-à-dire de diamètre inférieur à 2 à 3 cm (Niemistö *et al.*, 2019), et de préférence vivantes (**Chapitre 3**). Cette sylviculture, dite d'AO, est basée sur une éclaircie locale forte appelée détournement (Baar 2010 ; Wilhelm *et al.*, 2013), qui élimine tous les arbres qui concurrencent la cime de l'AO, et ce aussi souvent que nécessaire, de façon à lui

assurer une croissance libre permanente pour un potentiel de croissance maximal. Elle permet également aux bouleaux d'atteindre rapidement une dimension commerciale, avant que le bois ne se dégrade à cause de la sénescence (risque élevé à partir de 60 ans ; Luostarinen *et al.*, 2000 ; Niemistö *et al.*, 2008 ; Hein *et al.*, 2009). De surcroît, ce traitement est particulièrement adapté aux régénérations naturelles, au sein desquelles la densité et la conformation des individus est très variable, ainsi que dans les peuplements mélangés, où la concurrence doit être gérée notamment en fonction de la composition et de la répartition spatiale des essences. L'effet de ce traitement sylvicole sur l'accroissement diamétrique du bouleau n'a cependant jamais été étudié (par exemple Hein *et al.*, 2009 ; Vanhellefont *et al.*, 2016).

En effet, dans les conditions de l'Europe occidentale, très peu de bouleaux ont même bénéficié d'une sylviculture adaptée aux caractéristiques de l'essence. En Grande-Bretagne, Cameron (1996) a suggéré de commencer à dépresser les boulaies à partir d'une hauteur moyenne de 3 à 6 m, lorsque les arbres ont environ 3 à 6 ans. En Espagne, cette opération est recommandée dès 2 à 3 ans (Gómez-García *et al.*, 2014). En Allemagne, Wilhelm *et al.*, (2013) proposent de commencer les détourages et élagages des AO entre 12 et 15 ans (correspondant à 12-15 mètres de hauteur). Cette méthode est efficace dans des cas spécifiques où elle a localement donné de très bons résultats (Bonaventura *et al.*, 2016), mais elle semble devoir être adaptée dans les autres contextes, notamment compte tenu de la densité des régénérations dominées par le bouleau (Lemaire *et al.* 1998 ; Zâlitis *et al.*, 2007). Lemaire (2000 et 2004), en Belgique, conseillait quant à lui de débiter les détourages vers 4 à 7 ans.

L'objectif de cette étude est de quantifier l'évolution diamétrique du tronc à 1,30 m et le développement latéral de la cime de bouleaux bénéficiant d'une sylviculture d'AO. Etant donné les possibles divergences dans la croissance des bouleaux verruqueux (*Betula pendula* Roth) et pubescent (*B. pubescens* Ehrh) (Niemistö *et al.*, 2008), nous nous sommes limités au seul bouleau verruqueux, de loin le plus abondant en Europe occidentale (**Chapitre 2**).

Plus précisément, trois objectifs spécifiques ont été poursuivis :

1. Identifier l'évolution générale du diamètre des bouleaux soumis à la sylviculture d'AO, afin d'estimer la dimension des grumes qui pourraient être produites avant 60 ans ;
2. Ajuster une relation allométrique entre le diamètre du tronc et celui de la cime de bouleaux bénéficiant de la sylviculture d'AO, afin de fixer les normes de distance de désignation entre AO, liée à l'espace nécessaire pour permettre un développement optimal de la cime ;
3. Comparer le gain d'accroissement diamétrique de différents scénarios d'intervention très précoce (dès 1 à 5 ans) ou plus tardifs (dès 9 à 19 ans) avec un scénario sans sylviculture (témoin), afin d'identifier la période optimale pour débiter les détourages.

Dans ce but, nous avons récolté des données dans des dispositifs expérimentaux de détournage de bouleaux-objectif installés dès 2000 et, à partir de 2015, nous avons installé des dispositifs expérimentaux de détournage dans des jeunes peuplements et réalisé une campagne de mesures dans des peuplements de bouleau bénéficiant d'une sylviculture d'AO. Cependant, en raison de la rareté en bouleaux bénéficiant de détournage, de la jeunesse des dispositifs expérimentaux, et de la grande diversité des conditions des boulaies (notamment la station, la structure du peuplement et les modalités de sylviculture d'AO appliquées), cette étude est exploratoire. Elle a pour but d'identifier les premières tendances observables, déjà porteuses d'informations pour la gestion forestière et pour les recherches à suivre.

2. Matériel et Méthode

2.1 Sélection et description des sites d'étude

Les sites d'étude se trouvent dans le sud de la Belgique et dans le nord-est de la France (Figure 4.1), dans la zone bioclimatique océanique tempérée de l'Europe (Lindner *et al.* 2010). Afin de saisir un maximum d'opportunités, nous avons produit et rassemblé un ensemble hétérogène de données d'AO bénéficiant de détournages. Quatre jeux de données (A, B, C et D) ont été rassemblés, totalisant 814 bouleaux-objectif (Tableau 4.1) :

A) 87 bouleaux-objectif dans des régénérations naturelles de bouleau âgées de 8 à 41 ans dans cinq sites (sites 1 à 5) qui constituent le réseau expérimental « bouleau » mis en place entre 2000 et 2005 par la CARE « *Forest is Life* » de Gembloux Agro-Bio Tech. Les détournages et les mesures y ont été effectués sur une période allant de 12 à 19 années ;

B) 142 bouleaux-objectif et 110 bouleaux-objectif témoins (sans sylviculture) dans trois régénérations naturelles de bouleau constituant chacune un dispositif expérimental de comparaison d'âge de première intervention (sites 6 à 8) :

- l'expérience du site 6, installée en 2000, compare les accroissements diamétriques dans trois modalités d'âge de premier détournage (1 an⁷, 12 ans et 19 ans) et un témoin ;
- l'expérience du site 7, installée en 2015 dans le cadre de cette étude, compare des AO détournés à 4 ans avec des AO témoins ;
- l'expérience du site 8, aussi installée en 2015, compare des AO détournés à 5 et à 9 ans avec des AO témoins.

⁷ Bouleaux qui ont bénéficié d'une croissance pratiquement libre de compétition dès le départ sans qu'il ne s'agisse d'une action sylvicole volontaire de détournage. Nous les avons dès lors considérés comme AO détournés dans l'analyse.

C) 429 bouleaux-objectif âgés de 7 à 42 ans dans 15 sites (sites 9 à 23), la plupart mesurés à partir de 2015 pour cette étude, dans des régénérations naturelles de bouleau, parfois mélangé à d'autres essences. La sylviculture d'AO a été initiée et menée par le forestier local. Ces opportunités d'expériences ont été repérées grâce à une prise de contact avec les administrations forestières wallonne et française, et au moyen d'une annonce publiée dans la revue belge *Silva Belgica* (revue technique belge principalement adressée à un public de forestiers en propriété privée) ;

D) 46 bouleaux, issus de 15 sites (sites 24 à 38), qui se sont régénérés et ont grandi naturellement en forêt, presque sans concurrence. Ils ont été repérés lors des prospections décrites ci-avant. Leur intérêt est de compléter l'échantillon avec des bouleaux plus âgés et de plus grande dimension. Compte tenu du développement de leur cime et de leur fut, ils ont été considérés comme AO, même si aucune information ne documente leur passé sylvicole. Ceux dont l'âge a pu être déterminé⁸ ont de 27 à 66 ans.

La plupart des sites concernent des sols frais à légèrement secs avec un statut nutritif pauvre à moyen (Figure 4.2), représentatifs des sols où les bouleaux se développent le plus fréquemment dans la zone d'étude (**Chapitre 2**). Les données hydriques et trophiques du sol sont disponibles pour 31 sites, sur base de la cartographie du Fichier Ecologique des Essences (Petit *et al.*, 2017) et confirmée par un sondage pédologique sur le terrain. Leur altitude varie de 77 à 549 m (moyenne de 354 m) (Tableau 4.1).

⁸ Certains arbres parmi les plus gros avaient un début de pourriture du cœur qui a empêché la mesure de l'âge.

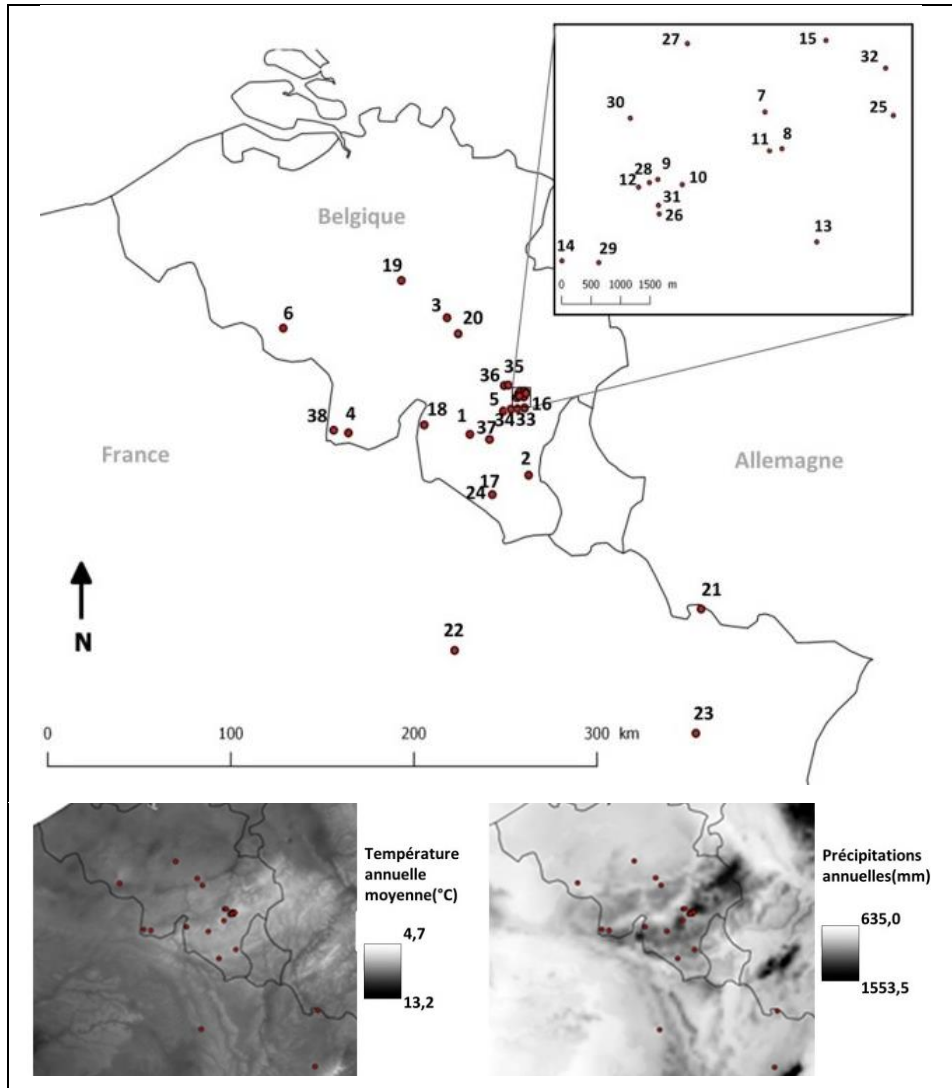


Figure 4.1 Localisation des sites et gradient climatique (température annuelle moyenne et précipitations annuelles ; données de Latte *et al.*, 2020 basées sur Cornes *et al.*, 2018) dans la zone d'étude.

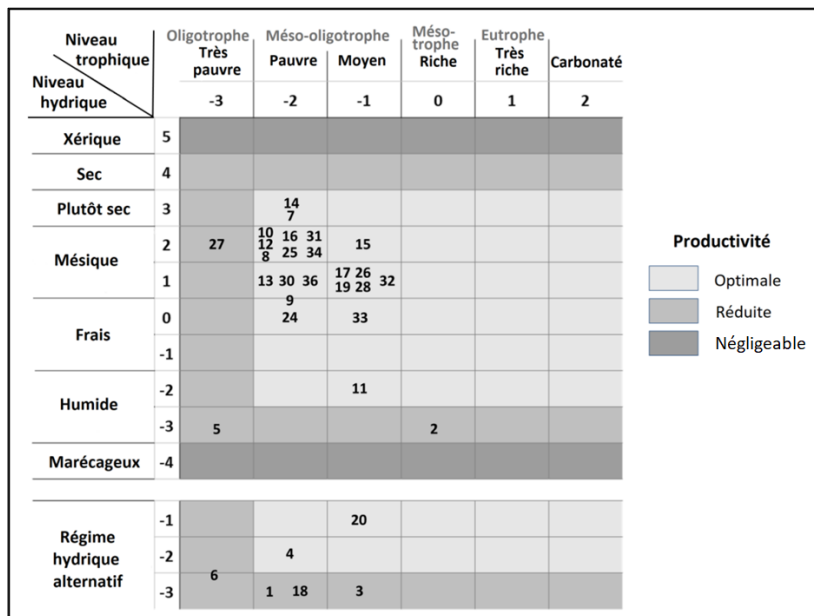


Figure 4.2 Niveaux trophique et hydrique du sol des sites (identifiés par leur numéro, sauf 21, 22, 23, 29, 35, 37, 38) et productivité des bouleaux (teinte des cellules) sur la base du Fichier Ecologique des Essences (Petit *et al.*, 2017).

Tableau 4.1 Précipitations annuelles et température annuelle moyenne (données de Latte *et al.*, 2020 basées sur Cornes *et al.*, 2018) et altitude de chaque site

Site	Précipitations annuelles (mm)	Température annuelle moy. (°C)	Altitude (m)	Site	Précipitations annuelles (mm)	Température annuelle moy. (°C)	Altitude (m)
1	1109	7,7	453	20	975	8,9	241
2	1107	7,7	450	21	864	9,9	250
3	923	9,1	204	22	843	9,8	250
4	1073	8,8	303	23	973	9,6	350
5	1236	7,7	458	24	949	8,2	360
6	787	9,7	77	25	1337	7,2	506
7	1276	7,5	516	26	1022	8,7	358
8	1276	7,7	470	27	1276	7,7	438
9	1022	8,7	327	28	1022	8,7	327
10	1089	8,6	360	29	952	9,2	256
11	1276	7,8	447	30	1106	7,9	437
12	1022	8,8	321	31	1022	8,6	349
13	1072	8,1	395	32	1402	7,3	505
14	952	8,6	362	33	1016	8,1	419
15	1375	7	549	34	995	7,5	392
16	958	7,7	368	35	928	9,2	194
17	954	8,2	360	36	926	8,9	256
18	1053	8,4	319	37	1129	8,2	448
19	789	9,8	111	38	1017	8,9	276

Tableau 4.2 Description des données de chaque placette : modalité sylvicole traduite par l'âge du premier détournage ("-" = pas de détournage ; "*" = croissance libre sans sylviculture) et âge au premier mesurage ; âge auquel la largeur de la cime a été mesurée ; durée de suivi ("-" = une seule mesure) ; nombre d'AO et d130 moyen, minimal et maximal lors de la dernière mesure. En cas de pourriture du cœur, l'âge des bouleaux n'a pas été déterminé.

Site	Age au 1 ^{er} détournage mesurage (1 seule valeur si identiques)	Age mesure diamètre de cime	Durée du suivi (ans)	Nombre d'AO final	d130 (cm)	
					Moyen	(Min- Max)
A) Suivi long dans le réseau expérimental	1	10	27	19	12	24,7 (21,3–28,6)
	2	11	26	18	12	19,5 (16,9–25,8)
		8	23	18	17	17,6 (13,7–21,0)
	3	12	27	18	16	25,7 (16,2–32,5)
		20 12	27	18	3	24,0 (22,0–26,1)
4	23 27	38	18	22	25,7 (19,1–32,1)	
5	25	35	14	5	25,6 (22,0–29,3)	
B) Expériences de détournage précoce	6	1* 12	29	20	10	34,6 (30,6–40,4)
		12	29	20	6	25,9 (22,6–29,6)
		19 12	29	20	8	22,9 (15,9–29,6)
		- 21	-	11	7	21,3 (17,8–24,8)
	7	4	5	7	49	9,1 (6,5–14,3)
		- 4	5	7	61	7,9 (4,1–13,0)
	8	5	9	7	36	8,6 (4,3–13,6)
		9 5	9	7	33	7,7 (4,5–11,6)
	- 5	-	7	42	6,8 (3,5–12,1)	
C) Peuplements bénéficiant d' une sylviculture d' AO	9	11	21	15	18	24,0 (15,9–29,9)
		11	16	10	24	20,2 (15,6–28,3)
	10	8	9	6	68	12,2 (8,1–19,4)
	11	14	14	2	20	13,6 (6,7–21,8)
	12	17	17	4	11	18,3 (14,2–26,8)
	13	23	23	2	15	23,0 (18,0–29,0)
	14	1* 16	16	1	2	22,3 (21,7–22,8)
	15	17	17	4	4	20,1 (15,3–25,5)
	16	30 35	35	2	8	28,6 (22,8–35,0)
	17	4 9	9	1	28	16,0 (12,4–23,6)
	18	10 12	16	7	73	18,6 (12,4–27,7)
	19	1* 39	39	3	20	39,9 (32,5–56,7)
	20	7	8	4	38	12,9 (8,9–19,1)
21	17	25	8	38	23,1 (19,3–33,5)	
22	9	15	6	31	16,5 (12,7–23,9)	
23	15	23	8	31	24,1 (19,7–30,4)	

D) Bouleaux forestiers avec une cime développée	24	-	1	9	44,8	(33,7–56,7)
	25	-	2	4	40,1	(36,6–44,6)
	26	- 59	2	1	58,6	
	27	-	5	2	29,2	(29,0–29,3)
	28	- 45	3	1	50,9	
	29	- 65	1	2	53,1	(51,1–55,1)
	30	- 59	4	2	46,0	(45,2–46,8)
	31	- 56	2	1	40,7	
	32	- 47	2	1	56,3	
	33	-	2	1	47,5	
	34	- 49	2	8	39,3	(32,3–43,9)
	35	-	-	2	43,5	(34,7–52,5)
	36	- 27	2	1	47,1	
	37	-	-	1	30,5	
	38	-	-	10	47,4	(36,6–58,6)
Nombre d'AO total			814			

2.2 Sélection et soin des AO

Au sein des peuplements, les bouleaux-objectif ont été sélectionnés en fonction de leur vigueur (dominance dans le peuplement), de la qualité de leur tige (franc-de-pied, rectitude, absence de grosse branche basse ou de blessure) et de leur distance par rapport aux autres AO (pour permettre leur développement à long terme). La sélection a été faite de façon identique dans les placettes avec sylviculture et dans les placettes témoins.

Les bouleaux-objectif (excepté les témoins) ont bénéficié de leur premier détourage alors qu'ils avaient, selon les sites, entre 1 an⁹ et 30 ans (Tableau 4.3). Les détourages devaient être répétés aussi souvent que nécessaire selon la méthode du *crown-touching* (Wood *et al.*, 1996) : tous les arbres qui touchent la cime du bouleau-objectif sont éliminés. Les concurrents plus éloignés qui peuvent la toucher avec les mouvements provoqués par le vent doivent également être éliminés pour éviter les dommages dus aux collisions, spécificité du bouleau en raison de la flexibilité de sa tige (Meng *et al.*, 2006). Cette méthode subjective a été préférée à la méthode *cutting-distance* qui élimine systématiquement les arbres situés à une distance fixe de l'AO (Wood *et al.*, 1996), d'autant plus qu'il n'existe pas de référence adaptée au bouleau. La méthode *crown-touching* est en outre plus efficace pour considérer les cas particuliers comme les arbres penchés (Wood *et al.*, 1996), et pour s'adapter à la structure du peuplement (dimension, distance, densité et essence

⁹ Bouleaux qui ont bénéficié d'une croissance pratiquement libre de compétition dès le départ, sans qu'il ne s'agisse d'une action sylvicole volontaire de détourage. Nous les avons dès lors considérés comme AO détourés dans l'analyse.

de compétiteurs) très variable en régénération naturelle, et à la flexibilité spécifique de la tige du bouleau avec le vent.

Les bouleaux-objectif détourés ont également été élagués. Les branches mortes (proportion d'autant plus grande que l'AO est âgé et le peuplement dense) et les branches vivantes jusqu'à une hauteur variant généralement entre 7 et 9 mètres (parfois moins si l'AO présente une branche de plus de 3 cm de diamètre, par exemple) sont soigneusement coupées. Dans le cas des très jeunes bouleaux, la coupe des branches vivantes est répartie sur 2 à 3 passages, afin que l'arbre ait toujours au moins 50 % de sa hauteur constituée de cime vivante. Il est cependant arrivé sur des sujets plus jeunes de ne préserver que 30 % de la hauteur de l'arbre en cime vivante (avant la croissance en hauteur de l'été) pour respecter l'objectif qualitatif : des branches qui risquent de devenir trop grosses pour pouvoir être élaguées lors du passage suivant doivent être éliminées. Il s'agit donc d'un compromis entre croissance optimisée (supposée par la quantité de branches vivantes) et qualité du fut. Au-dessus de la hauteur d'élagage fixée, la cime doit toujours rester vigoureuse, grâce au détournement.

En résumé, les arbres-objectif détourés sont élagués, et les arbres-objectif témoins ne sont ni détourés, ni élagués.

Tableau 4.3 Etendue du jeu de données des bouleaux-objectif détourés lors de leur dernière mesure (une seule mesure par arbre).

Dernière mesure de chaque bouleau-objectif (<i>n</i> = 996)	Moyenne	Min.	Médiane (Q1-Q2)	Max.
d130 (cm)	18,6	2,4	16,2 (10,6–23,3)	58,6
Age (ans)	20,4	5	19 (12–25)	66
Age au premier détournement (ans)	10,4	1	8 (8–14)	30

2.3 Mesures

La circonférence à 1,30 m a été mesurée au mètre ruban, afin d'en déduire le diamètre. Dans la plupart des cas, cette mesure a été répétée entre 1 et 6 fois, à intervalles variables selon les dispositifs (par exemple, tous les ans dans les détournements les plus précoces des sites 7 et 8, et tous les 3 ans environ dans les dispositifs plus anciens). Souvent, les arbres ont été mesurés à partir de la même année que leur premier détournement (Tableau 4.2), mais parfois avant (sites 3 en partie, 6 en partie et 8 en partie) ou après (sites 4, 6 en partie, 14, 16, 17, 18 et 19). La hauteur totale de l'AO et la hauteur de sa cime vivante ont parfois été mesurées, au moyen d'un Vertex IV.

Pour calculer le diamètre de cime des AO, nous avons fait la moyenne des huit distances (dans les directions cardinales et intercardinales) mesurées entre le centre du tronc et la projection verticale de l'extrémité de la branche. Nous avons utilisé pour ce faire une boussole, un Vertex IV et un clinomètre Suunto pour assurer une visée verticale. Cette mesure a été réalisée une seule fois. L'âge des AO lorsque leur

diamètre de cime a été mesuré est repris dans le tableau 4.2. Les cimes des AO témoins n'ont pas été mesurées à cause de l'impossibilité dans les jeunes peuplements d'en distinguer le pourtour. La cime de quelques AO détournés n'a pas pu être mesurée en raison de la régénération du sous-bois qui empêchait leur visibilité.

L'âge a été compté à partir des cernes annuels sur des rondelles prélevées à la base du tronc d'au moins deux bouleaux dominants (en hauteur, et en grosseur pour un comptage facilité), qui pouvaient être abattus (c'est-à-dire non-AO), par peuplement. Nous avons émis l'hypothèse que la régénération naturelle du bouleau dans nos peuplements s'était opérée sur environ 3 années maximum (ce qui correspond à une réalité de terrain conforme, résultant d'une colonisation rapide de la parcelle et de la fructification annuelle du bouleau), et que les dominants étaient parmi les plus âgés. Il s'agit donc d'une estimation de l'âge maximum du peuplement. Dans le cas particulier des bouleaux les plus âgés (jeu de données D), le comptage de cernes a été réalisé à partir d'une carotte dendrométrique prélevée à l'aide d'une tarière de Pressler, directement sur l'AO, car ces arbres constituaient souvent l'unique représentant « bouleau » du peuplement. L'âge de certains d'entre eux n'a pas pu être déterminé à cause de la pourriture du cœur, ou parce que le propriétaire refusait ce prélèvement. Le nombre de cernes a été déterminé avec précision à l'aide du logiciel WinDENDRO sur les rondelles et carottes de bois poncées au grain 320 et scannées à très haute résolution (scanner Epson Expression 10000 XL).

2.4 Analyses des données

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R (version 3.4.2) (R Core Team 2017) et les packages dplyr (Wickham *et al.*, 2019), nlme (Pinheiro *et al.*, 2017) et ggplot2 (Wickham, 2016).

2.4.1 Analyse descriptive de l'évolution diamétrique

Nous avons utilisé les données de l'ensemble des AO détournés (à l'exception de ceux dont l'âge n'a pas pu être déterminé) pour décrire graphiquement l'amplitude des trajectoires d'évolution diamétrique. Plusieurs voies de modélisation ont été testées mais aucune n'a été retenue. En effet, les bouleaux des différentes placettes ont bénéficié de conditions de croissance diamétrique très contrastées, et nos données n'offraient pas de possibilités satisfaisantes pour les agréger pour la modélisation.

Par exemple, les bouleaux des très jeunes expérimentations (sites 7 et 8 du jeu de données B), dont le suivi est récent, ont bénéficié de détournages dynamiques, alors que dans les plus vieux dispositifs expérimentaux (jeu de données A et site 6), nous avons constaté *a posteriori* que la méthode *crown-touching* n'avait pas été strictement appliquée. La technique des AO était encore peu pratiquée dans les années 2000 et les besoins spécifiques des bouleaux inconnus (Hein *et al.*, 2009 ; Wilhelm *et al.*, 2013). En conséquence, les opérateurs ont conservé une compétition trop importante, au moins lors de certaines périodes, et les cimes des AO n'étaient

plus en croissance libre, ce qui s'est traduit par leur remontée naturelle au-delà de la hauteur d'élagage. Aussi, les AO n'ont pas toujours été mesurés depuis leur premier détournage. Le jeu de données C, quant à lui, enrichit l'analyse avec des situations et des âges contrastés, mais l'historique sylvicole n'est pas toujours parfaitement connu. Le protocole de sylviculture d'AO y est généralement bien appliqué mais le suivi est récent. Enfin, le jeu de données D comprend de plus vieux bouleaux identifiés sur base de critères d'aspect extérieurs, mais sans connaissance de leur historique de développement. Ces problèmes contraignent d'autant plus les analyses que nos AO sont issus de régénérations naturelles de densités contrastées (souvent fortes en moyenne, et localement très fortes ou avec des arbres peu concurrencés) entre et au sein de chaque peuplement. Or, dans le cas du bouleau, qui a une croissance très précoce mais non soutenue, la littérature indique que cette situation de départ pourrait être très déterminante de la dynamique ultérieure de croissance diamétrique (**Chapitre 3**). L'âge du premier détournage se montre dès lors inefficace à lui tout seul pour distinguer les trajectoires d'évolution diamétrique.

Nous avons tenté de créer un indice pour quantifier « l'historique sylvicole » de chaque AO afin de voir dans quelle mesure il pouvait influencer leur trajectoire d'accroissement diamétrique. Cet indice devait synthétiser *a posteriori* pour chaque AO les effets notamment de la densité de départ et de l'âge et de la qualité (pour la mise en croissance libre) des interventions passées. Les indices qui utilisent la hauteur, comme l'élancement, ont été écartés car d'une part, nous ne possédions pas toujours cette donnée, et d'autre part, ils sont influencés par les rythmes de croissance, qui varient avec l'âge (Ilomäki et al., 2003). Nous avons produit un indice basé sur l'écart relatif entre la surface horizontale de la cime de l'AO (SC_t) et la surface de la cime moyenne correspondant au diamètre de son tronc ($SC_{moy.}$), selon l'équation (1) produite en 2.4.1) :

$$\frac{(SC_t - SC_{moy.})}{SC_t}$$

Cet indice est basé sur l'hypothèse que, plus un bouleau a pu bénéficier d'une croissance libre de sa cime, plus sa cime est large pour un diamètre donné (Hein *et al.*, 2009). Cependant, il y avait trop d'informations manquantes sur la situation de départ des AO pour le valider, mais surtout, peu d'interprétabilité vers la pratique. Par exemple, un AO qui s'est régénéré avec très peu de compétition mais qui a été détourné tardivement, n'est pas distingué d'un AO qui a souffert dès sa régénération d'une forte compétition, mais a bénéficié de détournages précoces. Ensuite, la largeur de la cime des AO dans nos données est parfois mesurée beaucoup plus tard, mais d'autres fois très proche du premier détournage (Tableau 4.2), ne donnant que trop peu de recul.

Face à ces difficultés, nous avons privilégié la simple analyse graphique de l'ensemble des relevés diamétriques, pour profiter de l'originalité du jeu de données qui réside dans son grand nombre de bouleaux ayant bénéficié de détournages, certes d'intensité variable, mais à tout le moins d'une sylviculture d'un dynamisme rare pour cette essence. L'ambition est de donner un premier ordre de grandeur de

l'évolution de la grosseur des fûts dans le cadre d'une sylviculture dynamique spécifique à l'essence et d'ouvrir des pistes pour la sylviculture, notamment grâce à des sous-jeux de données faisant l'objet d'analyses spécifiques (point 2.4.3).

Les encadrés 4.1 à 4.3 présentent des descriptions complémentaires qui n'ont pas fait l'objet de la publication scientifique. Elles concernent principalement les sites 7 et 8, car le protocole de détournage y a été rigoureusement appliqué et des comparaisons intra-sites entre différentes modalités de sylviculture sont possibles. Ces exemples montrent la diversité des situations, notamment liée à la compétition variable entre et au sein des peuplements. L'effet sur l'accroissement de différents facteurs est mis en évidence par analyse de la variance sur la fonction « $\ln()$ » de R. Nous ne souhaitons pas à ce stade aller plus loin avec des régressions. Ces analyses, simples et exploratoires, présentent des tendances qui se dessinent dans ces dispositifs après quelques années de suivi seulement. Elles servent aussi à illustrer la complexité de la réponse de l'évolution diamétrique du bouleau face aux opérations sylvicoles, notamment en comparant des individus appartenant à des conditions apparemment proches, mais y répondant différemment. La nécessité pour la modélisation d'un plus grand jeu de données et d'un plus grand recul est dès lors évidente.

2.4.2 Développement de la cime

Nous avons modélisé l'allométrie entre le diamètre de la cime et le diamètre du tronc de 616 bouleaux-objectif. Nous avons ajusté un modèle linéaire à effets mixtes (Equation 1) en tenant compte du regroupement des observations par placette. Le diamètre de la cime a été choisi comme variable de réponse parce que sa mesure est sujette à une plus grande erreur que la mesure du diamètre du tronc. Ce choix est également justifié par le fait que, généralement, le diamètre de la cime n'est pas connu et on cherche à le prédire, alors que le diamètre du tronc est facilement mesuré. Le modèle a été évalué en calculant l'erreur quadratique moyenne (RMSE).

$$C_{ij} = \beta_0 + \beta_1 d130_{ij} + \alpha_j + \epsilon_{ij}, \quad (1)$$

où C_{ij} est le diamètre (m) de cime du bouleau-objectif i dans la placette j , β_0 et β_1 sont les effets fixes, $d130_{ij}$ est le diamètre (cm) du tronc de l'individu i , α_j est l'effet aléatoire entre placettes, et ϵ_{ij} est la variation résiduelle au sein de la placette.

2.4.3 Effet de l'âge du détournage sur la croissance diamétrique du tronc

L'effet de la précocité du détournage sur l'accroissement du diamètre du tronc a été analysé avec les données des 3 dispositifs expérimentaux des sites 6, 7 et 8 (jeu de données B). La significativité de l'effet de chaque modalité de traitement a été vérifiée avec des tests ANOVA et de Tukey. Les conditions d'application de ces tests ont été vérifiées. Comme le traitement variait d'un site à l'autre, et que chaque boulaie avait sa densité initiale propre, les analyses ont été distinguées par site.

3. Résultats

3.1 Analyse descriptive de l'évolution diamétrique

L'âge des bouleaux-objectif du jeu de données varie de 4 à 66 ans et leur diamètre de 1,2 à 58,6 cm (Figure 4.3). En considérant leur dernière mesure, le diamètre moyen est de 18,6 cm (Tableau 4.3). La plupart des observations concernent des bouleaux de moins de 35 ans (Figure 4.3), et l'âge moyen lors de la dernière mesure est de 20 ans (Tableau 4.3). Cependant, le grand nombre d'AO mesurés dans les parcelles d'expérience avec de très jeunes bouleaux (sites 7 et 8) tire vers le bas l'âge moyen et l'âge moyen au premier détourage (Tableau 4.3), alors que peu de sites bénéficient d'un détourage si précoce.

Le graphique (Figure 4.3) montre une grande dispersion des trajectoires d'évolution diamétrique pour les AO détourés (AO témoins exclus). Par exemple, vers l'âge de 40 ans, le diamètre varie entre 18 et 56 cm. Nos résultats montrent que les bouleaux-objectif ayant la meilleure croissance peuvent atteindre un diamètre de 40 cm aux alentours de 30-40 ans ou de plus de 50 cm entre 40 et 60 ans. Néanmoins, à 20 ans, certains bouleaux-objectif ne parviennent pas à atteindre un diamètre de 10 cm, malgré le détourage.

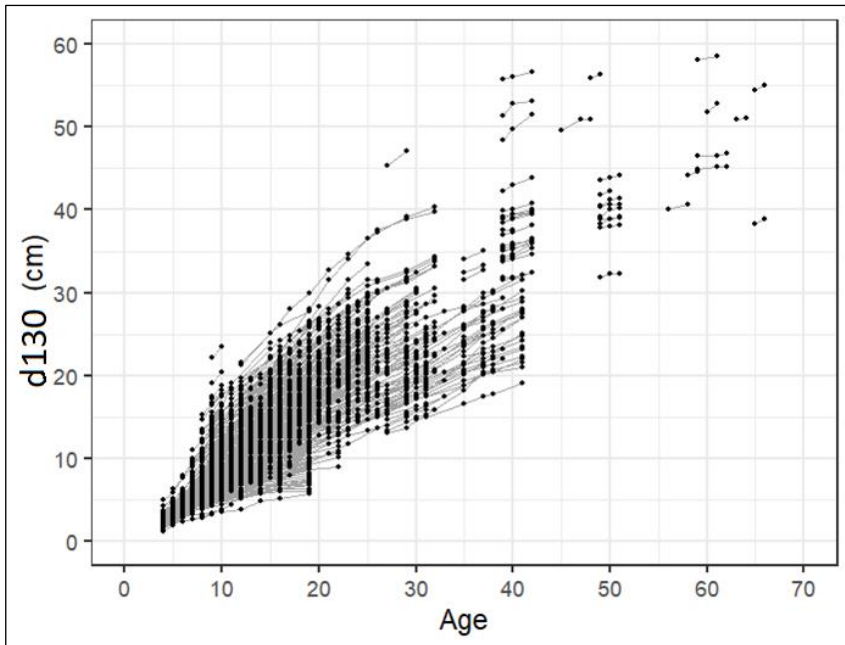


Figure 4.3 Evolution du d130 de bouleaux-objectif détourés (AO témoins exclus). Les lignes relient les mesures successives (points) d'un même AO.

3.2 Développement de la cime

Il existe une forte relation linéaire entre le diamètre de la cime et celui du tronc du bouleau (Figure 4.4 et Tableau 4.4). L'erreur quadratique moyenne est de 0,61 m. Pour un diamètre de tronc donné, la plupart des diamètres de cime ne s'écartent pas de plus de 1 m de la prédiction, et l'écart maximal est d'environ 2 m, à l'exception de quelques valeurs extrêmes (Figure 4.4).

En comparaison avec le modèle de Hemery *et al.* (2005) établi sur 55 bouleaux ne bénéficiant pas de détournage dans des forêts d'Angleterre, d'Écosse et de Pologne (ligne en pointillés Figure 4.4), notre modèle prédit un plus important diamètre de cime pour un diamètre de tronc donné, et la pente de la régression est légèrement plus élevée (ligne en trait plein Figure 4.4). Les arbres détournés de notre jeu de données ont donc un rapport « diamètre de cime/d130 » plus élevé. Ce rapport s'établit entre environ 25 pour les petits AO (10 cm de diamètre) et 20 pour les plus gros (60 cm de diamètre). Pour les bouleaux non-détournés de Hemery, ce rapport varie entre environ 18 (pour les plus petits AO) et 16 (pour les plus gros).

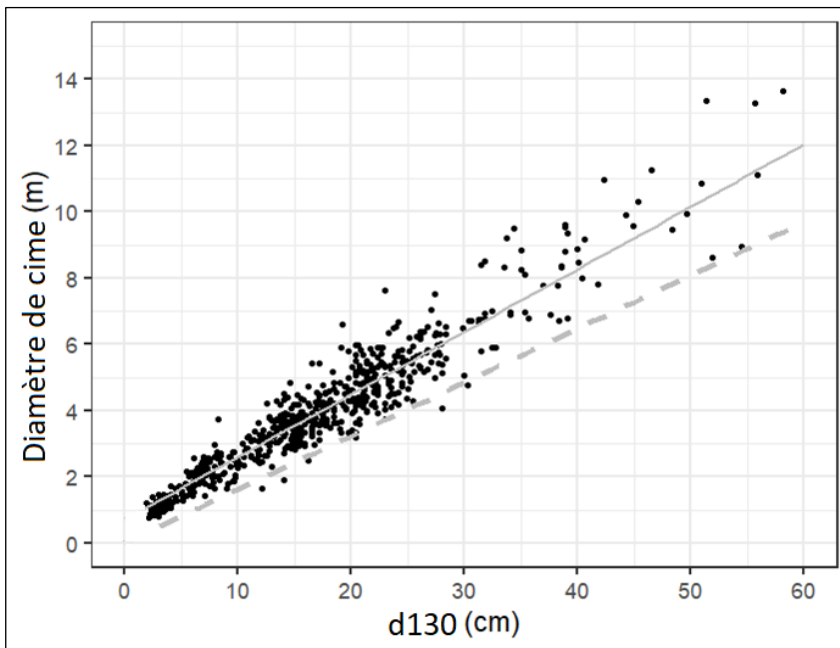


Figure 4.4 Nuage de points représentant le d130 des AO et le diamètre de leur cime. La ligne grise en trait plein représente les prédictions de notre modèle (Equation (1)) et celle en pointillés le modèle d'Hemery *et al.* (2005).

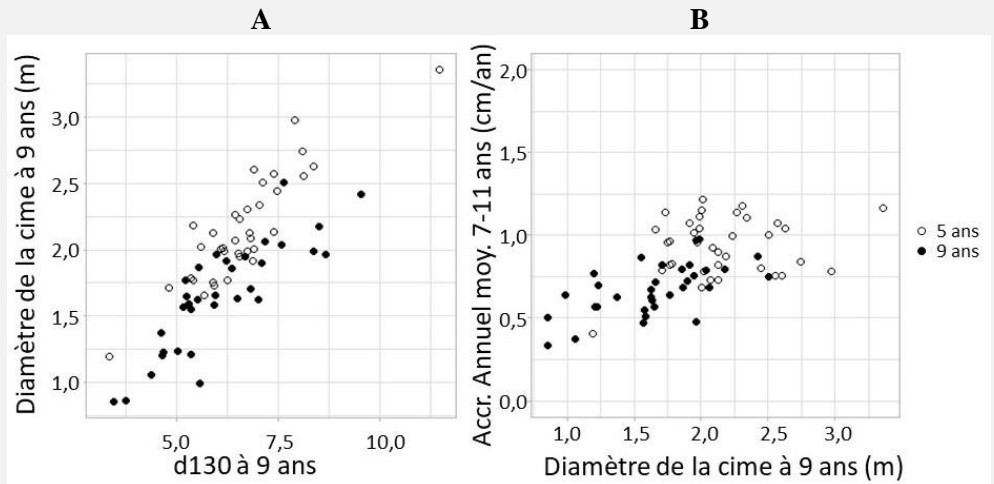
Tableau 4.4 Paramètres du modèle à effets mixtes de prévision du diamètre de cime.

Degrés de liberté	615			
		Estimation	Std erreur/Std dev	p-value
Effets fixes	β_0	0,761	0,110	<0,001
	β_1	0,186	0,00409	<0,001
Effets aléatoires placette	α		0,320	
	ϵ		0,0856	

Encadré 4.1 - Analyses complémentaires - Diamètre de cime

(***: p-value < 0,001; **: 0,001 < p-value < 0,01; ns: p-value > 0,05)

Le site 8 permet de comparer le diamètre de la cime d'AO de 9 ans détourés depuis 4 années (modalité « 5 ans ») à celui d'AO qui n'ont pas encore bénéficié de détourage (modalité « 9 ans »). La relation entre le diamètre de cime et le d130 est positive pour chacune des modalités (***), mais les bouleaux détourés depuis 4 années ont une plus large cime pour un d130 donné que ceux de la modalité « 9 ans » (***)(A).



Pour un diamètre de cime donné, l'accroissement diamétrique est plus important pour les bouleaux détourés que pour les non-détourés (***), et pour un accroissement diamétrique donné, les AO détourés ont une plus large cime (***)(B). Vanhellemont *et al.* (2016) et Hein *et al.* (2009) avaient constaté une relation positive entre l'accroissement diamétrique et la dimension de la cime de bouleaux sans sylviculture. Notre modalité « 9 ans » le confirme (***), mais pas la modalité 5 ans (ns), où un plus grand diamètre de cime n'apparaît pas être lié à une capacité d'accroissement supérieure.



Figure 4.5 Illustration de 3 développements de cimes de bouleaux à différents stades de développement et bénéficiant d'une croissance libre (sur la dernière photo, les personnes se sont positionnées à l'aplomb de l'extrémité de la cime, afin de projeter son étendue au sol).

3.3 Effet de l'âge du premier détourage sur le diamètre du tronc

L'effet de l'âge du premier détourage a été analysé sur les trois dispositifs expérimentaux conçus à cet effet (sites 6, 7 et 8). On y observe que l'accroissement diamétrique est lié au traitement sylvicole (Figures 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 et Tableau 4.5).

Site 6

Sur le site 6, plus le premier détourage est précoce, plus le diamètre moyen est important à la fin de la période de mesure, lorsque les arbres ont 32 ans (Figure 4.6). À 32 ans, le diamètre moyen des AO de la modalité « 1 an » était de 34,6 cm (écart type de 3,1 cm) et 2 des 10 bouleaux ont même atteint un diamètre de 40 cm. En revanche, dans la modalité « 19 ans », le diamètre moyen n'était que d'environ 22,9 cm ($\pm 4,1$ cm). À 32 ans, le diamètre dépasse de 7 %, de 21 % et de 62 % celui du témoin pour les modalités « 19 », « 12 » et « 1 an » respectivement. L'accroissement diamétrique moyen des bouleaux de la modalité « 1 an » était de 1,3 cm/an ($\pm 0,7$ cm/an) entre 12 et 21 ans. Pendant cette période, il était de 0,5 à 0,8 cm/an dans les autres traitements sylvicoles. Les bouleaux détourés à partir de 12 ans n'ont que peu profité de l'opération. Nous n'avons pas observé d'augmentation significative de l'accroissement de leur diamètre, mais leur accroissement diamétrique moyen était légèrement supérieur à celui des AO des modalités « 19 ans » et témoin (Figure 4.6). Les bouleaux détourés à partir de 19 ans n'ont pas profité du détourage tardif, leur accroissement diamétrique étant comparable à celui des AO témoins.

Toutefois, les différences d'accroissement diamétrique moyen entre les traitements se stabilisent avec le temps (Figures 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10). Lorsque les AO étaient âgés de 12 à 18 ans, la différence entre traitements était statistiquement significative (la modalité « 19 ans », qui n'avait pas encore été détournée, fait office de témoin). Entre 19 et 25 ans, l'accroissement était significativement différent dans toutes les modalités, sauf entre les modalités témoin et « 19 ans ». De 26 à 32 ans, les accroissements étaient assez similaires entre les traitements, mais les AO de la modalité « 1 an » ont cru de façon significativement plus élevée que ceux du témoin.

La figure 4.6 montre que quelques AO, bien que performants, ont été abattus à 25 ans dans les modalités « 12 » et « 19 ans ». En fait, lors de l'installation du dispositif en 2000, sans connaissance approfondie sur le développement de la cime du bouleau, les opérateurs ont sous-estimé la distance nécessaire entre les bouleaux-objectif, de telle sorte qu'après quelques rotations, des AO ont dû être sacrifiés pour en maintenir d'autres en croissance libre. Un AO a disparu accidentellement dans le dispositif témoin. Il n'y a pas eu de mortalité naturelle.

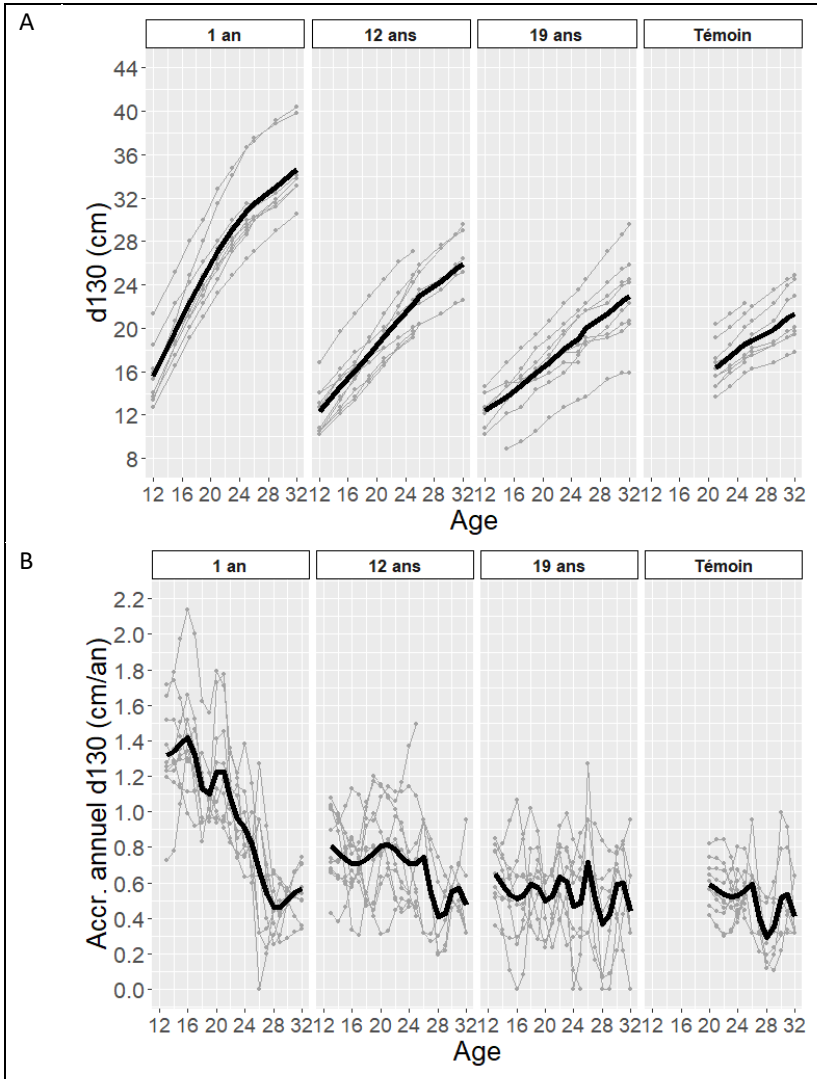


Figure 4.6 Évolution (A) du d130 (cm) et (B) de l'accroissement annuel en d130 (cm/an) des AO (moyenne en gras) de chaque traitement sylvicole du site 6.

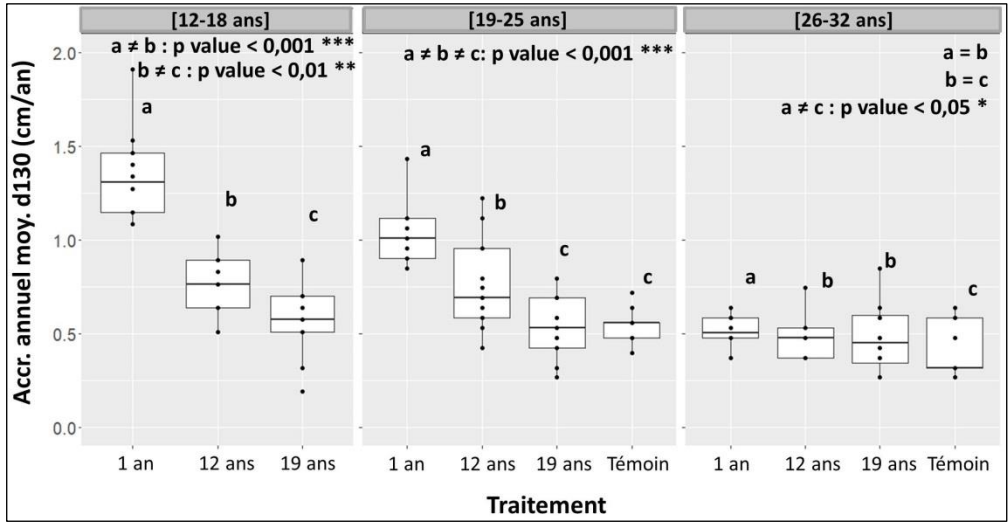
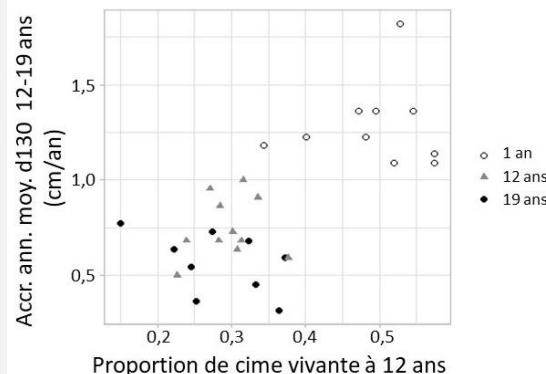


Figure 4.7 Boxplots de l'accroissement annuel moyen en d130 sur les intervalles d'âge 12-18, 19-25 et 26-32 ans pour chaque traitement du site 6. Les groupes significativement différents ont été distingués par le test de Tukey, et sont identifiés par des lettres différentes.

Encadré 4.2 - Analyses complémentaires site 6 – Proportion de la hauteur en cime vivante (*)** (***: p-value < 0,001; **: 0,001 < p-value < 0,01; ns: p-value > 0,05)

Sur le site 6, à 12 ans, la proportion de hauteur de cime vivante moyenne des AO des modalités « 12 ans » et « 19 ans » n'est que d'environ 30 %, ce qui est inférieur aux 50 % recommandés pour une croissance optimale du bouleau (Cameron 1996 ; Zálitis *et al.*, 2007 ; Niemistö *et al.*, 2008 ; Hynynen *et al.*, 2010). Cette proportion est respectée pour la plupart des AO de la modalité « 1 an ».



Sur l'ensemble des AO, il y a une relation positive entre l'accroissement diamétrique moyen entre 12 et 19 ans et la proportion de cime vivante à 12 ans (***). Si on analyse séparément chaque modalité, il y a étonnement une relation négative dans la « 19 ans » (**), la seule à ne pas avoir bénéficié de détournage sur la période. Dans les autres modalités, la proportion de cime vivante n'a pas d'effet sur la croissance diamétrique (ns).

Sites 7 et 8

Sur le site 7, l'accroissement diamétrique du tronc des AO détourés a augmenté pendant les 2 années qui suivaient le premier détourage à l'âge de 4 ans, puis s'est stabilisé à une moyenne d'environ 1,2 cm/an ($\pm 0,2$ cm/an) (Figure 4.8 et Tableau 4.5). A l'inverse, les accroissements diamétriques moyens des AO témoins ont diminué de manière régulière pendant les 6 années de suivi. À la fin, lorsque les arbres ont atteint l'âge de 10 ans, l'accroissement moyen des AO témoins valait la moitié (0,6 cm/an $\pm 0,3$) de celui des AO détourés (Tableau 4.5).

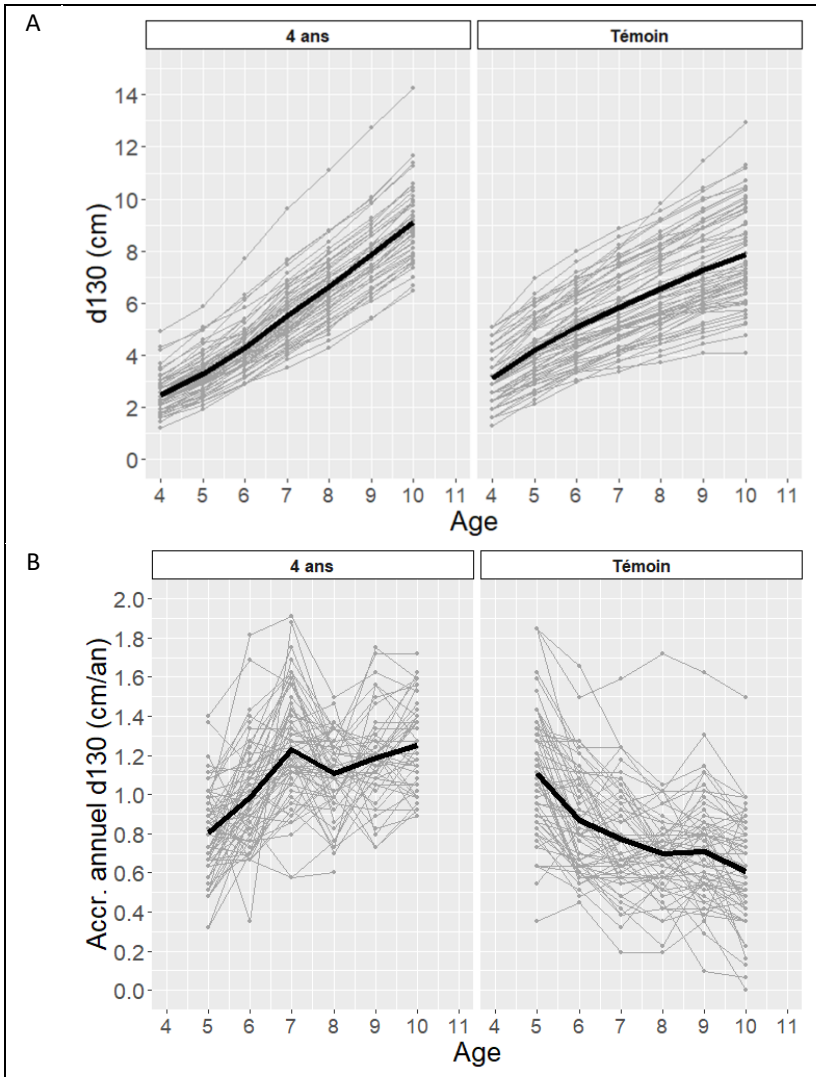


Figure 4.8 Évolution (A) du d130 (cm) et (B) de l'accroissement annuel en d130 (cm/an) des AO (moyenne en gras) de chaque traitement sylvicole du site 7.

Sur le site 8, aucune différence statistique entre les modalités n'a été constatée les 2 premières années qui suivaient le premier détourage. L'accroissement diamétrique évoluait entre 0,6 et 0,8 cm/an (Tableau 4.5). Les différences sont devenues significatives à partir de 8 ans. De 8 à 9 ans, l'accroissement diamétrique moyen des AO détourés dès 5 ans était d'environ 0,9 cm/an ($\pm 0,2$ cm/an) alors qu'il était d'environ 0,5 cm/an ($\pm 0,2$ cm/an) dans les deux autres modalités où aucun détourage n'avait encore eu lieu (Figure 4.9 et Tableau 4.5).

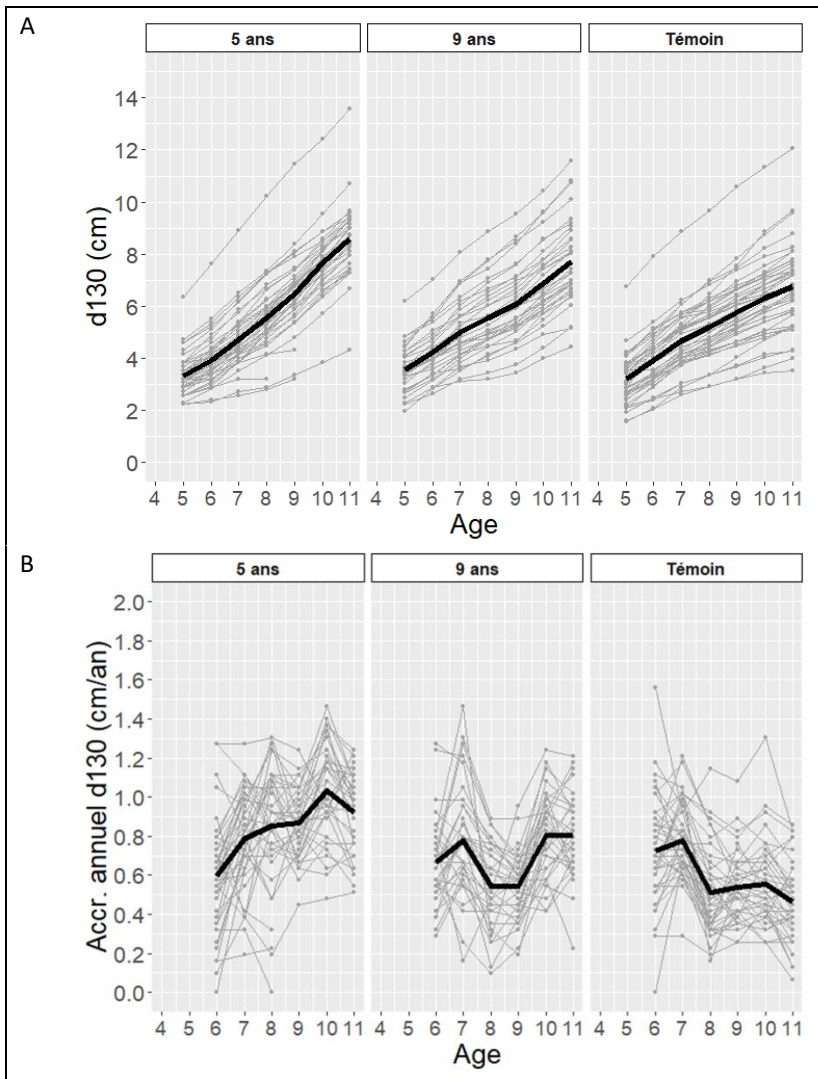


Figure 4.9 Évolution (A) du d130 (cm) et (B) de l'accroissement annuel en d130 (cm/an) des AO (moyenne en gras) de chaque traitement sylvicole du site 8.

L'accroissement était significativement différent dans toutes les modalités du site 8 après 10 ans. Après le premier détourage, l'accroissement a augmenté dans la modalité « 9 ans » pour atteindre 0,8 cm/an ($\pm 0,2$ cm/an) à 10 ans. A cet âge, c'est dans la modalité « 5 ans » que l'accroissement moyen est le plus élevé ($1,0 \pm 0,2$ cm/an), et dans le témoin qu'il est le plus faible ($0,6 \pm 0,2$ cm/an) (Figure 4.9 et Tableau 4.5).

Tableau 4.5 Valeurs de l'accroissement moyen en d130 par site, traitement et année de suivi. Les niveaux de p-value des tests ANOVA et Tukey sont indiqués (***) : p-value < 0,001 ; * : $0,01 < p\text{-value} < 0,05$; n.s. (non significatif) : p-value > 0,05). Les groupes significativement différents sont distingués par des lettres.

Accroissement moyen du d130 (cm) et significativité des différences entre les traitements (lettres)	Age							
	5	6	7	8	9	10	11	
Site 7	4-ans	0,81 a	0,99 a	1,23 a	1,11 a	1,19 a	1,25 a	
	Témoin	1,11 a	0,87 a	0,77 b	0,70 b	0,71 b	0,61 b	
		n.s.	n.s.	***	***	***	***	
Site 8	5-ans		0,60 a	0,80 a	0,85 a	0,87 a	1,03 a	0,92 a
	9-ans		0,66 a	0,78 a	0,54 b	0,54 b	0,80 b	0,80 b
	Témoin		0,73 a	0,78 a	0,51 b	0,54 b	0,55 c	0,47 c
			n.s.	n.s.	***	***	***	a-c, b-c: *** a-b: *

Sur le site 7, des AO ont été abandonnés à 6 et à 9 ans dans la modalité « 4 ans », parce qu'ils allaient entrer en compétition avec d'autres AO. Il s'agissait d'AO surnuméraires sélectionnés au départ, afin de prévoir des « arbres de rechange » au vu des risques élevés de dégâts de cervidé et de frelon (**Chapitre 3**) dans la zone. Sur le site 8, 3 AO de la modalité 5 ans, qui avaient été sélectionnés parmi les plus fins arbres du peuplement, ont dépéri à 9 ans. Pour un âge donné, en deçà d'un certain diamètre, qui semble spécifique au site (ici environ 2,4 cm à 5 ans), 3 AO sur 8, qui pourtant n'avaient pas l'accroissement diamétrique le plus défavorable au départ, ont dépéri. De fortes attaques de frelon durant la période de mesure pourraient les avoir affaiblis.

Les AO du site 7 sont plus performants que ceux du site 8, à tel point que jusqu'à leurs 7 ans, même les AO témoins du site 7 étaient en moyenne plus performants que les AO détourés du site 8 (Figure 4.10).

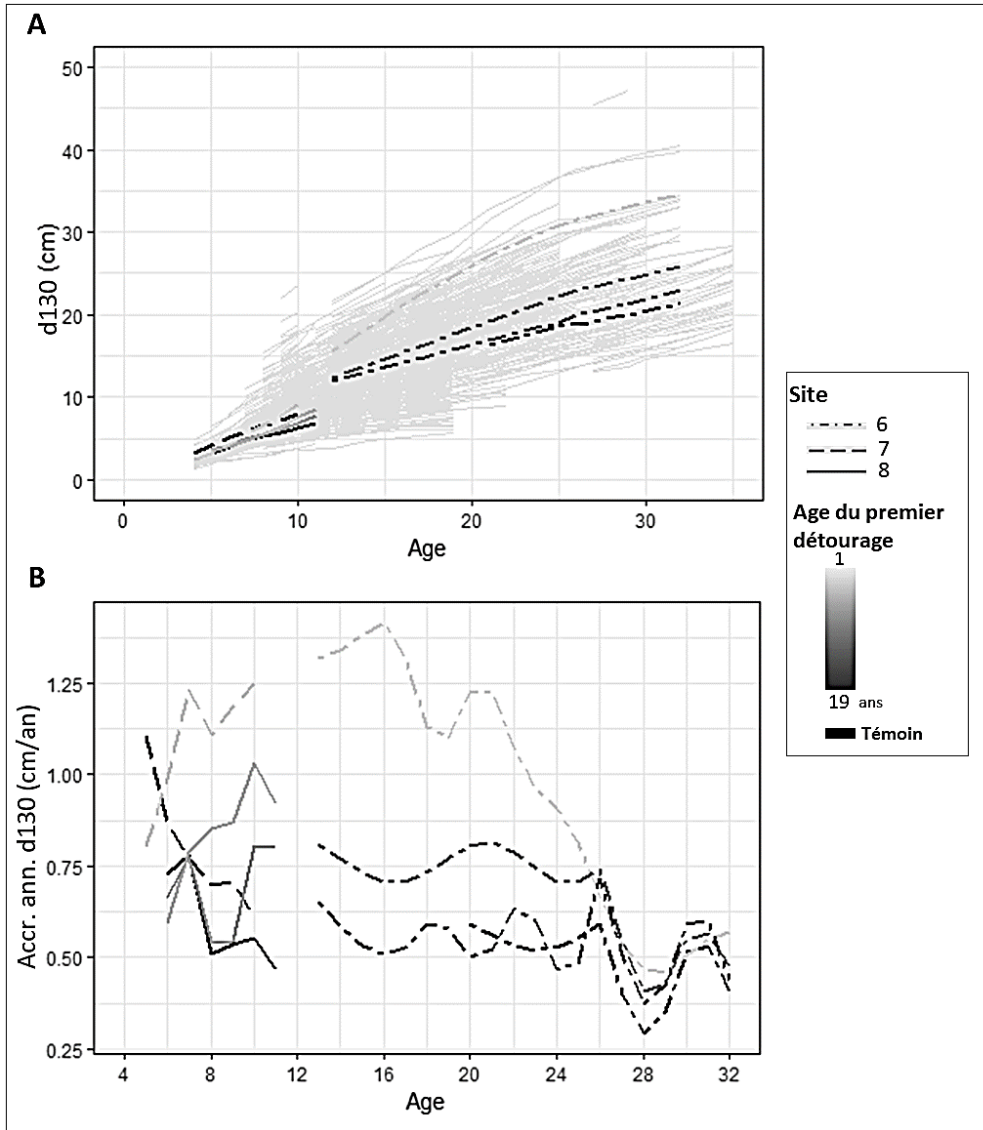


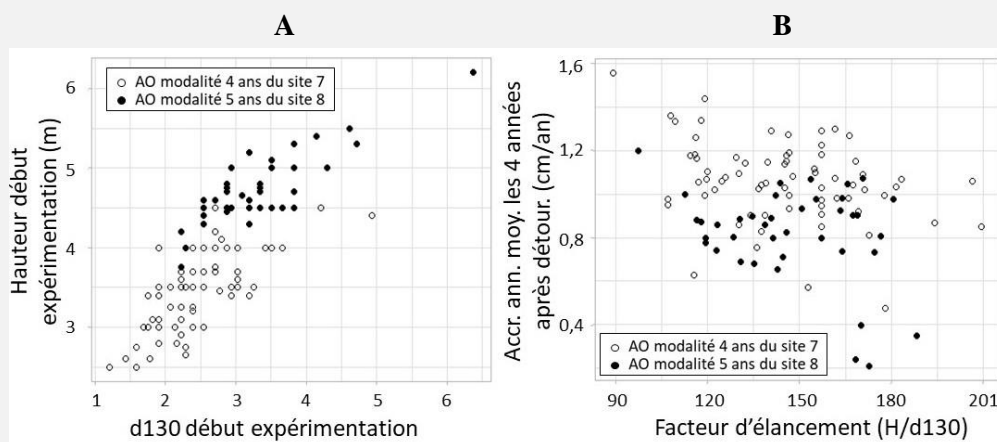
Figure 4.10 Evolution du d130 et de l'accroissement en d130 dans les sites 6, 7 et 8 selon les traitements. En A, superposition des courbes de croissance moyennes par site et par modalité de traitement (lignes plus épaisses) aux courbes de croissance de tous les individus échantillonnés jusqu'à 35 ans (issues de la figure 4.3). En B, courbes d'évolution de l'accroissement annuel moyen par site et par modalité.

Encadré 4.3 - Analyses complémentaires - Sites 7 et 8

(***: p-value < 0,001; **: 0,001 < p-value < 0,01; ns: p-value > 0,05)

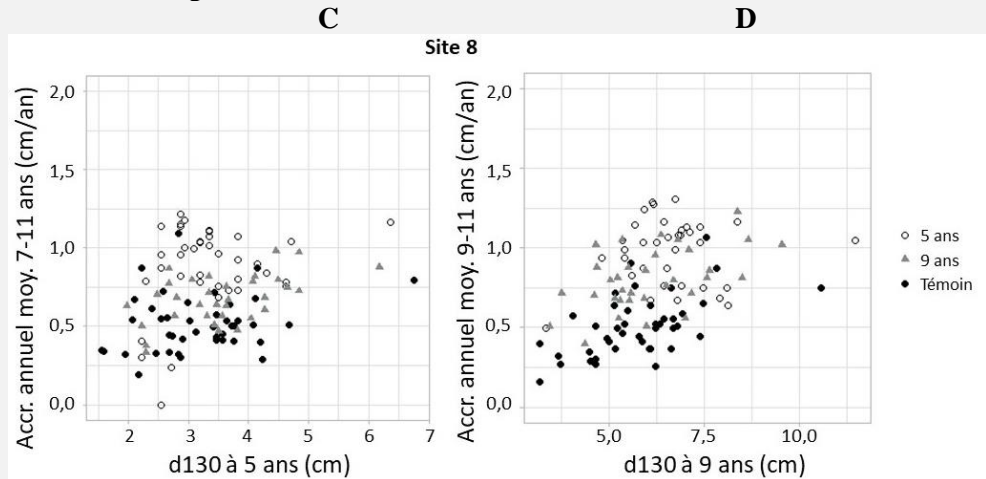
- Hauteur et élancement

Les sites 7 et 8 sont dans des localisation proches, à une altitude avoisinant 500 mètres (Tableau 4.1), sur des sols pauvres, et plutôt secs, surtout pour le site 7 (Figure 4.2). Ils se distinguent principalement par leur âge de premier détournage (4 et 5 ans respectivement, tous deux effectués la même année). Avant le premier détournage à 5 ans, les AO du site 8 étaient, pour un d130 donné, plus grands (A). La hauteur plus importante est due à leur année de différence d'âge moyen, mais ils sont un peu plus élancés. Il y a également une relation positive entre le diamètre et la hauteur des AO (A). La variation de la hauteur au sein d'un site peut être liée à la vigueur individuelle de l'arbre, mais aussi à une possible différence d'âge (de 1 à 2 ans), qui est une réalité dans les régénérations naturelles. Les 3 AO de la modalité 5 ans qui ont dépéri n'étaient pas plus élancés que les autres AO de petit d130. Nous observons que pour un facteur d'élancement donné, l'accroissement des AO est supérieur pour le site 7 les 4 années qui suivent leur détournage (B). Pour chacun des sites, un plus fort élancement est globalement associé à un plus faible accroissement (***)(B).

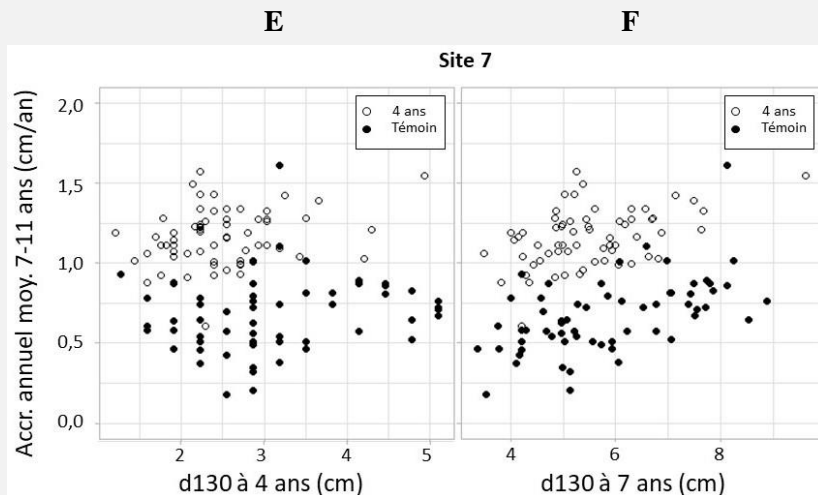
**- Diamètre et accroissement diamétrique**

Sur le site 8, la relation entre le d130 à 5 ans et l'accroissement diamétrique des AO de 7 à 11 ans est plutôt positive (***) pour les modalités « 9 ans », témoin et « 5 ans », mais cette dernière est marquée par une grande dispersion pour les AO de diamètre inférieur à 3 cm (C). A l'exception de quelques individus peu performants dans les plus petits diamètres, la dispersion des d130 apparaît plutôt être due à un retard au départ qu'à une moindre performance en accroissement diamétrique. Les trajectoires d'évolution diamétrique des AO sont d'ailleurs généralement assez parallèles (Figure 4.9). En contraste, dans les modalités témoins et « 9 ans », les gros dominent naturellement, et les dominés tendent à l'être de plus en plus. En effet, la relation entre le d130 à 9 ans et l'accroissement moyen sur les deux années suivantes est positive (***) pour les modalités témoin et « 9 ans » (D). Leur d130 et leur

accroissement diamétrique paraissent donc être liés à la compétition qu'ils subissent (cas du témoin) ou ont subi plus longtemps (« 9 ans »). En revanche, pour les AO libres de compétition depuis leurs 5 ans, il n'y a plus de relation entre l'accroissement et le diamètre (ns). En effet, entre le début et la fin de la période de mesure, la dispersion entre les diamètres évolue peu pour les AO détournés (Figure 4.9), à l'exception de quelques individus particulièrement performants ou faibles, mais elle est augmentée dans les modalités « 9 ans » et témoin.



Sur le site 7, la réponse des AO détournés est différente que sur le site 8. La relation entre l'accroissement diamétrique et la dimension au début de l'expérience à 4 ans est plutôt positive (***) pour la modalité « 4 ans » et ** pour le témoin (**E**). A 7 ans, la relation positive (***) entre l'accroissement diamétrique et le d130 devient plus marquée, dans les deux modalités (**F**). C'est peut-être une indication que le statut social des AO commence à mieux se définir. La figure 4.8 montre une dispersion plus importante des d130 en fin de période de mesurage, et ce davantage dans le cas du témoin.



– Indice de compétition

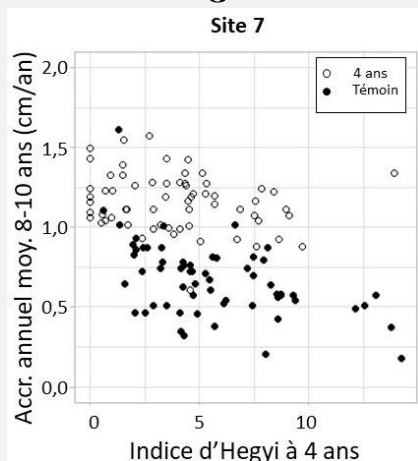
Sur les sites 7 et 8, nous avons récolté pour chaque AO les données nécessaires à la construction de l'indice spatial de compétition d'Hegyi (Maleki et al., 2015) à 4 et 5 ans, respectivement :

$$\text{Indice d'Hegyi} = \sum_i^n \left(\frac{G_i}{G_t} \times \frac{1}{D_i} \right)$$

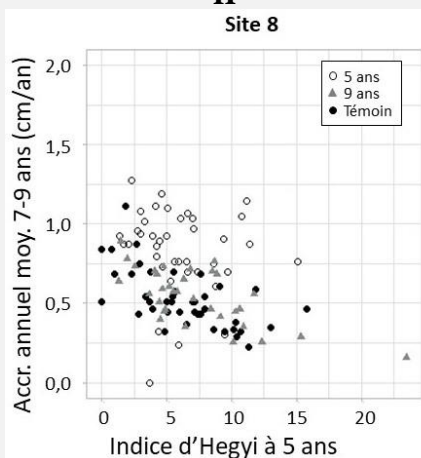
G_t est la circonférence de l'AO, G_i la circonférence du compétiteur i , D_i la distance entre l'AO et le compétiteur i , et n le nombre de compétiteurs de l'AO. Les compétiteurs sont les arbres qui ont été coupés (auraient été coupés dans les modalités témoin et 9 ans pour assurer la croissance libre) à 4 et 5 ans, pour les sites 7 et 8 respectivement.

Cet indice donne un poids plus important aux compétiteurs les plus gros et les plus proches de l'AO, d'autant plus si celui-ci est de plus faible dimension.

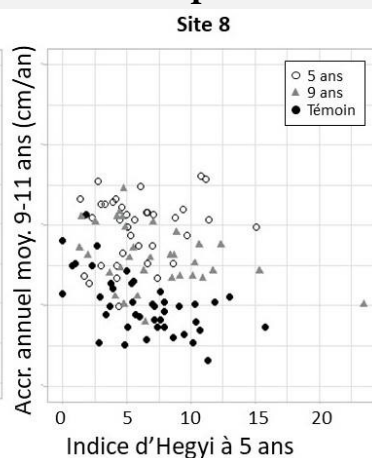
G



H



I

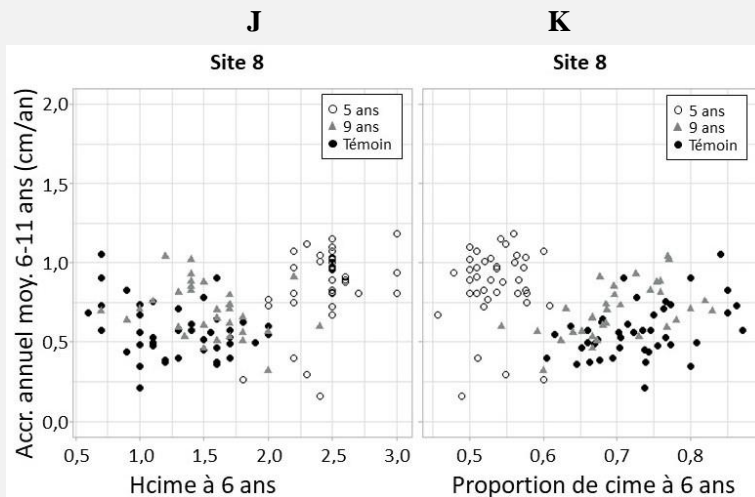


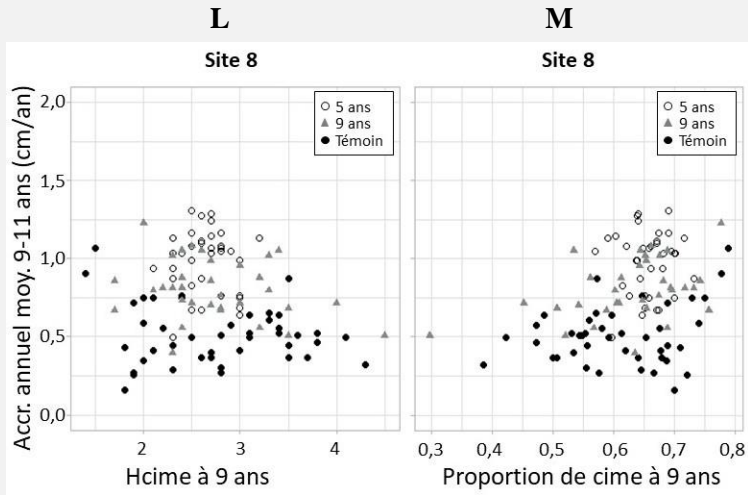
L'indice d'Hegyí prend des valeurs contrastées dans les deux sites, confirmant la variabilité de la compétition au sein des peuplements (**G**, **H** et **I**). Sur le site 7, il existe une relation négative (***) entre l'accroissement diamétrique entre 8 et 10 ans et l'indice d'Hegyí à 4 ans, pour chacune des modalités (**G**). On constate aussi que quelques AO de la modalité « 4 ans » étaient déjà en croissance libre, avant le détournage. Les données sont cependant assez dispersées, et on remarque par exemple qu'un des AO détournés a un très bon accroissement malgré qu'il fasse partie des AO au plus fort indice d'Hegyí avant détournage. Le détournage précoce lui a permis de conserver son potentiel de croissance. On constate également qu'un AO témoin très performants (Figure 4.8) a un indice d'Hegyí très faible : sa cime a de l'espace pour croître naturellement librement, malgré l'absence de sylviculture.

Sur le site 8, les accroissements entre 7 et 9 ans sont liés avec l'indice d'Hegyí à 5 ans dans les modalités témoin (***) et « 9 ans » (***), mais pas dans la modalité « 5 ans » (ns) (**H**). Les 3 AO de la modalité « 5 ans » qui ont dépéri (les plus petits accroissements diamétriques) n'ont pas un indice d'Hegyí parmi les plus élevés. Entre 9 et 11 ans, l'accroissement diamétrique moyen reste lié à l'indice d'Hegyí pour les modalités témoin (***) et « 9 ans » (***), et faiblement mais dans le sens positif cette fois, pour la modalité « 5 ans » (*) (**I**). Le détournage à 5 ans semble avoir modifié la dynamique de dominance qui, naturellement, est en partie imposée par la compétition dans ce type de régénération naturelle. Par contre, en comparaison avec la modalité « 5 ans », le détournage à 9 ans apparaît un peu tardif (du moins les 2 années qui suivent) pour gommer l'effet de la compétition de départ.

- Hauteur de cime et proportion de la hauteur en cime vivante

Sur le site 8, à 6 ans, la hauteur de la cime vivante (Hcime) est bien plus élevée (généralement entre 2 et 3 mètres) que dans les modalités « 9 ans » et témoin (généralement entre 0,5 et 2 mètres), ces dernières n'ayant pas été élaguées (**J**).

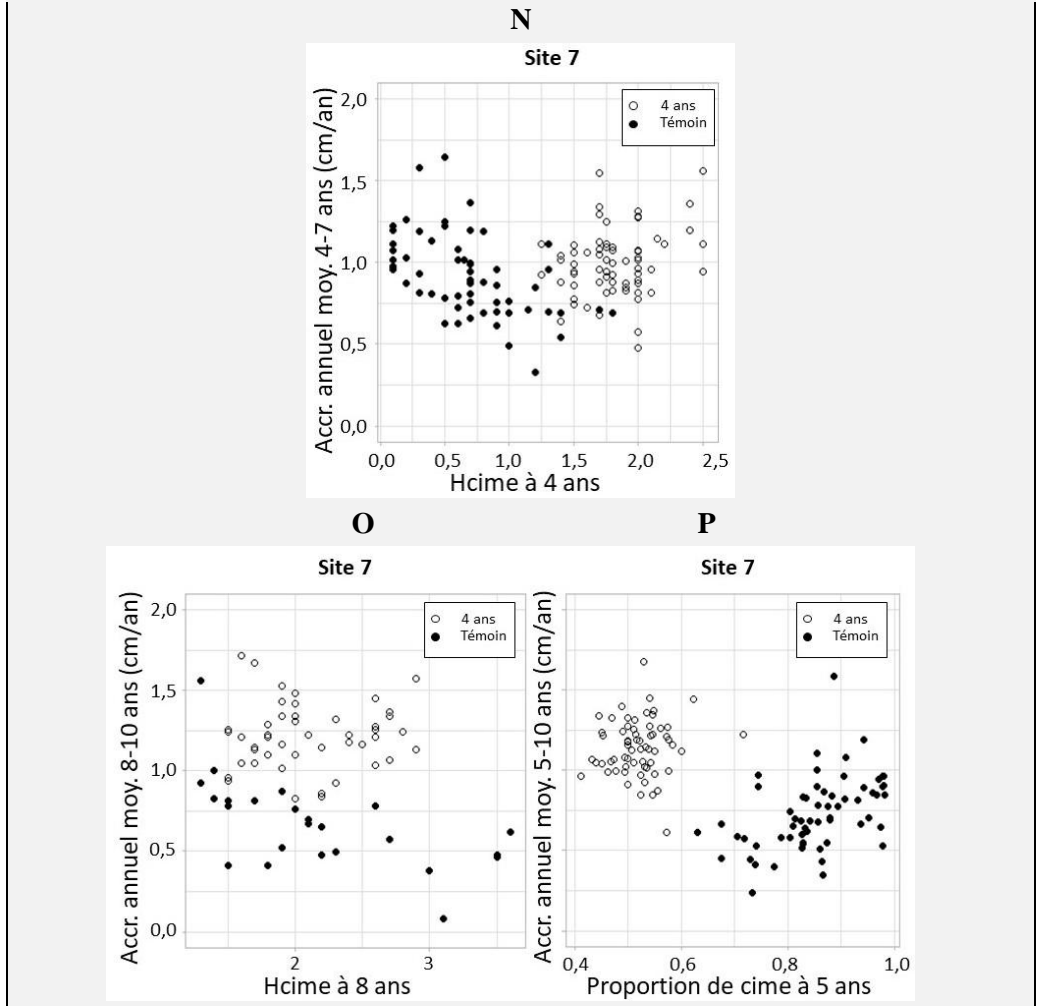




Bien que la dispersion soit forte, il existe une relation entre la hauteur de la cime et l'accroissement diamétrique des AO, positive dans la modalité « 5 ans » (***) et négative dans les deux autres modalités (***) (J).

La montée de l'élagage naturel est importante 3 années plus tard dans les modalités témoin et « 9 ans » (L). La hauteur de cime devient même, pour de nombreux AO témoins, plus élevée que dans la modalité avec élagage. A ce moment, la relation entre la hauteur de cime et l'accroissement diamétrique est négative pour la modalité « 9 ans » (**) et non significative (ns) dans les deux autres modalités. En ce qui concerne la proportion de cime, à 6 ans, malgré l'élagage, elle varie entre 45 et 60 % de la hauteur totale de l'arbre dans la modalité « 5 ans » (K). La dispersion, qu'il s'agisse de la hauteur de cime ou de la proportion de cime, est assez réduite avec l'élagage artificiel (J, K, L et M), alors que dans les modalités témoin et « 9 ans », l'élagage naturel est opéré par la compétition, variable d'un AO à l'autre. A 6 ans (K) et à 9 ans (M), il existe une relation positive (***) entre la proportion de cime et l'accroissement les années suivantes dans les modalités témoin et « 9 ans », mais il n'y a aucune relation (ns) dans la modalité « 5 ans ».

Sur le site 7, la cime très basse à 4 ans sur certains AO de la modalité témoin traduit une moindre compétition au départ (notamment pour les AO dont l'indice d'Hegyi était nul), alors que la hauteur de cime est fixée par l'élagage dans la modalité « 4 ans » (N). L'élagage artificiel concerne donc davantage de branches vivantes que dans la modalité « 5 ans » du site 8, engendrant un plus grand contraste entre les modalités témoin et détournée. Dans cette dernière, la relation entre l'accroissement diamétrique et la hauteur de cime est positive (***) entre 4 et 7 ans (N) et devient non-significative après 8 ans (O), alors que dans la modalité témoin, la relation reste négative (***). Il n'y a pas de relation entre la proportion de cime et l'accroissement diamétrique pour la modalité « 4 ans » (ns), et la relation est légèrement positive (***) dans la témoin (P).



4. Discussion

4.1 Lacunes de l'échantillon et implications sur l'analyse des données

Pour pouvoir modéliser l'accroissement diamétrique des AO de bouleau verruqueux, différents facteurs doivent être quantifiés : l'âge des AO, l'âge de leur premier détournage, leur vigueur (notamment liée à la compétition) au moment du premier détournage et l'effet des conditions stationnelles. La continuité des opérations de détournage doit impérativement être assurée au cours du temps. De nombreuses combinaisons de données sont dès lors nécessaires. Or, dans l'état actuel de la ressource en bouleau, qui n'est qu'exceptionnellement favorisée par la sylviculture, il était illusoire de constituer ce jeu de données idéal. Notre nombre d'observations par site, par âge et par traitement ne permet de représenter que trop peu de combinaisons (Tableau 4.2 et Figure 4.3), avec des reculs variables. De plus :

- comme expliqué dans la section matériel et méthode (point 2.4), le protocole de détournage n'a pas été suffisamment efficace pour permettre la croissance libre des AO dans plusieurs dispositifs, particulièrement dans ceux installés au début des années 2000 (jeu de données A et site 6) ;
- les résultats ont montré que le détournage après 9-12 ans n'a que peu d'effet sur l'accroissement diamétrique (Figures 4.6 et 4.8 et Tableau 4.5). Or, les dispositifs qui bénéficient de la plus longue durée de suivi ont pour la plupart été détournés après 10 ans (Tableau 4.2). D'ailleurs, la proportion minimale de 50 % de hauteur de cime vivante recommandée pour une croissance optimale (Cameron 1996 ; Zâlitis *et al.*, 2007 ; Niemistö *et al.*, 2008 ; Hynynen *et al.*, 2010) n'est souvent plus respectée à cet âge (exemple de l'encadré 4.2). Notre analyse met en évidence l'importance de renforcer l'échantillonnage pour des détournages menés avant 9-12 ans, et même dès 4 ans ;
- la densité, hétérogène et variable d'une régénération naturelle à l'autre, influence le rapport d130/âge des individus (Prévosto, 2005). Comme discuté au point 2.4, l'âge du premier détournage ne peut donc suffire pour caractériser l'effet de la sylviculture sur l'accroissement diamétrique d'un bouleau-objectif. Il faudrait relativiser la vigueur de l'AO à ce moment, d'autant plus que combinée à l'âge du premier détournage, son effet sur l'accroissement diamétrique semble pouvoir se marquer de façons contrastées (comme dans l'exemple de l'encadré 4.3). Un indice spatial de compétition tel que l'indice d'Hegyí (Prévosto, 2005 ; Contreras *et al.*, 2011 ; Maleki *et al.*, 2015) pourrait être utilisé. Cette donnée n'était disponible que pour les sites 7 et 8 (encadré 4.3 G, H et I), et il nous faudrait un peu plus de recul pour en évaluer l'efficacité ;

- les caractéristiques de la station ont probablement aussi un effet sur l'accroissement et le rapport $d_{130}/\text{âge}$ au premier détourage, qui n'est pas connu ;

Compte tenu de tous ces éléments, la quantité de données apparaît faible pour pouvoir comparer ces différentes expériences, d'autant plus que les années de croissance peuvent concerner des conditions météorologiques contrastées, et que le comportement du bouleau verruqueux face aux extrêmes climatiques n'est pas connu non plus.

4.2 Développement de la cime des AO

Le diamètre de la cime, lié à la capacité photosynthétique d'un arbre, est l'un des facteurs déterminants de l'accroissement du diamètre du tronc (Cole *et al.*, 1994). Nous avons trouvé une forte relation entre le diamètre de la cime et le diamètre du tronc des bouleaux-objectif (Figure 4.4), comme cela a déjà été décrit pour certaines essences pionnières héliophiles (Cameron, 1996 ; Hemery *et al.*, 2005). Notre modèle prévoit cependant un plus important diamètre de cime pour un diamètre de tronc donné que le modèle de Hemery *et al.* (2005). Cette divergence pourrait être en partie liée au traitement, ce qui corrobore les observations de Hein *et al.* (2009). Pour en mesurer l'éventuel effet, il est utile d'avoir des mesures de largeur de cime plusieurs années après le détourage. Ce fut souvent notre cas (Tableau 4.2), mais, les dispositifs qui bénéficient d'un plus grand recul n'ont pas bénéficié de détourages optimaux. Toutefois, seulement 4 années après la mise en croissance libre, un effet commence à se marquer dans notre dispositif du site 8, en comparaison avec une modalité non-détourée (Encadré 4.1).

Lintunen *et al.*, 2010 constatent que le bouleau verruqueux modifie l'architecture de sa cime avec la compétition. Par exemple, en compétition avec un autre bouleau, il a tendance à réduire la longueur et l'angle des rameaux et des branches, pour former une cime plus dense qu'en compétition avec *Larix sibirica*. Nos résultats laissent penser qu'il pourrait y avoir, en croissance libre, une plus importante expansion latérale de la cime pour un diamètre de tronc donné. Nous n'avons pas relevé les aspects architecturaux, mais nous avons remarqué sur le terrain que les cimes des AO présentaient aussi une variabilité dans leur forme (plutôt conique, losangique ou cylindrique), et dans leur densité en feuilles et en branches, dont l'insertion se montrait plutôt horizontale ou remontant carrément dans la cime, et ce parfois dans une même parcelle. Ces aspects font probablement aussi partie de notre erreur résiduelle, qui est peut-être également liée à des facteurs génétiques (Tigerstedt *et al.*, 1995) ou stationnels. La largeur de la cime est également affectée par les collisions entre cimes voisines, phénomène assez important en bouleau (Meng *et al.*, 2006).

Notre modèle de développement des cimes est conçu pour les bouleaux bénéficiant d'une sylviculture d'AO, bien que pas toujours optimale, dans les conditions de l'Europe occidentale. Il est utile pour pouvoir prévoir l'espace nécessaire au développement des cimes des bouleaux-objectif jusqu'à leur récolte. Par exemple, si

l'objectif est de produire des arbres de diamètre 40, 50 ou 60 cm, le diamètre de la cime à la fin de la révolution, et donc la distance requise entre les bouleaux-objectif, est respectivement d'environ 8, 10 ou 12 m (Figure 4.4). Cette donnée est également importante pour permettre au gestionnaire de bien organiser, dans l'espace et dans le temps, les mélanges d'essences.

4.3 Accroissement diamétrique selon l'âge du premier détournage

Nos résultats ont confirmé les conclusions de Prévosto *et al.* (1998 et 1999) et de Lemaire (1998). Sans intervention sylvicole, la compétition dans les régénérations naturelles peut réduire l'accroissement diamétrique dès l'âge de 4 à 7 ans. Nous avons mis en évidence cet effet sur les bouleaux âgés de 4 à 5 ans dans les sites 7 et 8 (Figures 4.8 et 4.9 et Tableau 4.5). Sur ces sites, l'accroissement diamétrique moyen des AO détournés le plus tôt a été en moyenne de 40 % plus important entre leurs 4 et 10 ans par rapport à celui des AO témoins. Sur le site 8, les AO détournés pour la première fois à 9 ans n'ont pas récupéré, au cours des deux années suivantes, le niveau d'accroissement de ceux détournés à 5 ans (Figure 4.9 et Tableau 4.5). En plus de stimuler la croissance très précoce des AO, le détournage des bouleaux à un très jeune âge peut également avoir des effets à plus long terme (Cameron 1996 ; Hein *et al.*, 2009 ; Vanhelimont *et al.*, 2016). Sur le site 6, entre 12 et 24 ans, les accroissements diamétriques les plus élevés ont toujours été observés pour les AO détournés le plus tôt. À 26 ans, le diamètre des AO de la modalité « 1 an » était en moyenne respectivement de 9, 11 et de 13 cm plus élevé que celui des AO détournés à partir de 12 ans, de 19 ans et témoins. Les modalités « 12 ans » et « 19 ans » n'ont dès lors pas permis un gain en diamètre significatif par rapport au témoin. La cause de la diminution de l'accroissement diamétrique dans les quatre modalités n'est cependant pas claire : est-ce dû à l'âge ? Aux caractéristiques stationnelles ? Au retour de la compétition pour les cimes ? Le détournage précoce permet néanmoins de réduire la révolution du peuplement (Rytter *et al.*, 2007 ; Rytter, 2013) et d'assurer la production de grumes de dimensions commerciales avant que le bois ne se déprécie naturellement. Ces expériences permettent de mieux comprendre les grandes différences de trajectoires d'évolution diamétrique des AO dans la figure 4.3, bien qu'il y ait probablement aussi un effet stationnel et du peuplement (notamment sa densité) au départ. Par exemple, sur le site 19, le diamètre à 42 ans des bouleaux varie de 32,5 à 56,7 cm (Tableau 4.2), et les AO de 20 ans de diamètre inférieur à 10 cm font partie des peuplements dont les détournages n'ont été ni précoces, ni intenses.

Les AO détournés sont également élagués. L'enlèvement de branches mortes n'a aucun effet sur la croissance diamétrique, mais l'enlèvement de branches vivantes dans le bas de la cime, parfois nécessaire pour la qualité, pourrait avoir un effet. Une simulation basée sur une expérience en Suède (Skovsgaard *et al.*, 2021) prévoyait une importante différence d'accroissement diamétrique (25 à 50 %) entre des bouleaux verruqueux éclaircis selon s'ils subissaient, ou non, un élagage très sévère

(prélèvement de 33 à 66 % de la longueur de cime vivante). L'effet négatif possible de l'élagage sur la croissance diamétrique n'est pas dissociable dans notre analyse car l'élagage a été, dans les jeux de données A et B au moins, réalisé au même moment que le détournement. Nous cherchions à évaluer la sylviculture d'AO, et il en ressort qu'un AO détourné et élagué est plus performant qu'un bouleau témoin, dès le très jeune âge. D'ailleurs, pour ces derniers, la compétition force la remontée naturelle de la cime (Ilomäki *et al.*, 2003 ; Konôpka *et al.*, 2020, Encadré 4.3 J à P, Figure 4.11). Certains AO sont élagués plus sévèrement que d'autres, pour les impératifs de qualité du bois en raison de la présence de branches qui deviennent grosses. Ces AO naturellement plus isolés ne montrent pas un accroissement inférieur aux autres AO suite à un élagage plus sévère (Encadré 4.3 J à P). Leur vigueur compense peut-être l'effet négatif possible sur l'accroissement diamétrique d'une cime temporairement moins longue.

Les bouleaux détournés sont soumis à un surcroît de balancement par le vent, et une part de leur accroissement diamétrique pourrait être due à cette contrainte, comme cela a été démontré pour le hêtre (Fournier *et al.*, 2015).



Figure 4.11 La compétition a provoqué une importante mortalité des branches basses de ce jeune AO qui vient d'être détouré (le cercle rouge correspond à une hauteur de 1m30).
L'élagage artificiel ne concernera que des branches mortes.

4.4 Objectif de production de bois

Nos résultats ont mis en évidence la capacité à produire, dans les conditions écologiques étudiées, des bouleaux verruqueux d'environ 50 cm de diamètre en moins de 60 ans, âge maximum de récolte étant donné le risque élevé de développer de la pourriture (Luostarinen *et al.*, 2000 ; Niemistö *et al.*, 2008 ; Hein *et al.*, 2009). Cette affirmation est basée sur les neuf bouleaux forestiers (Figure 4.3) de nos données répondant simultanément à ces deux critères d'âge et de dimension. Très peu de bouleaux de grande dimension et de plus de 40 ans ont été mesurés. Ce type de bois n'est actuellement pas fréquent (**Chapitre 2**). Considérant que la plupart de nos AO de plus de 20 ans (jeu de données A) n'ont probablement pas reçu un traitement suffisamment dynamique, et compte tenu des conséquences négatives de la compétition sur l'accroissement diamétrique, comme démontré par nos expériences comparatives, on peut considérer que cet objectif n'est pas trop ambitieux. L'objectif de production de bouleaux de 60 cm de diamètre proposé par Hein *et al.* (2009), Wilhelm *et al.* (2013), Vanhellemont *et al.* (2016) ou dans Bonaventura *et al.* (2016) semble réaliste, compte tenu également de l'interprétation graphique du développement potentiel futur des plus jeunes AO (Figure 4.3). D'après les études de marché (Hein *et al.*, 2009 ; Hynynen *et al.*, 2010 ; Wilhelm *et al.*, 2013) et les ventes de grumes de bouleau de grande valeur en Sarre (Bonaventura *et al.*, 2016), cette dimension semble correspondre au maximum visé pour les grumes de bouleau de haute qualité. Par ailleurs, des bouleaux de 40 cm de diamètre pourraient être produits en moins de 40 ans.

5. Conclusion

Notre analyse de l'accroissement diamétrique de 814 bouleaux verruqueux-objectif dans 38 régénérations naturelles confirme qu'il est possible de produire en Europe occidentale des grumes d'un assez grand diamètre pour le marché du bois d'œuvre.

Cependant, les grumes doivent être produites rapidement pour limiter le risque de coloration et de pourriture du bois. Pour ce faire, le bouleau a besoin d'une sylviculture spécifique très dynamique, caractérisée par des opérations très précoces, pour profiter de son potentiel de croissance élevé mais non soutenu.

Dans le contexte des régénérations naturelles denses de bouleau, comme c'est généralement le cas par exemple après coupe rase, nous concluons que la clé pour produire des grumes de grande dimension est de permettre la croissance libre de la cime des arbres à partir de 4 à 5 ans, et au plus tard 9-12 ans, en lien avec la densité locale de départ. La sylviculture d'AO, qui permet de focaliser les opérations sylvicoles sur le développement individuel des arbres, est un moyen efficace pour répondre à ce besoin. Sur la base du développement de la cime des bouleaux-objectif, nous fournissons également des consignes sur l'espacement entre les AO.

L'intérêt des forestiers pour le bouleau est encore rare et récent, mais croissant. Notre étude a dès lors été limitée par la disponibilité des données, en particulier d'arbres plus âgés mais détourés très précocement, et par la qualité du détourage, qui ne fut pas toujours optimale. Le suivi à long terme des dispositifs expérimentaux et le mesurage de nouveaux peuplements est nécessaire pour accumuler des données dans des boulaies gérées avec une sylviculture d'AO. Ainsi, avec un jeu de données plus équilibré selon l'âge des arbres et l'âge du début des détourages, un modèle d'évolution diamétrique en fonction de la sylviculture pourrait être ajusté, incluant d'autres variables telles que les effets de la station.

5

Discussion, perspectives et conclusion



1. Méthodologie – un équilibre entre science et pratique

Cette recherche visait à apporter des réponses pratiques face à de nouveaux défis, comme l'adaptation de la gestion forestière en proie à des problèmes sanitaires, par la diversification au moyen de nouvelles essences. Concernant le bouleau, il existait très peu de données et de connaissances scientifiques adaptées au contexte de l'Europe occidentale, mais les interrogations sont nombreuses, émanant d'acteurs non scientifiques, et des éléments de réponse sont dispersés dans de rares essais empiriques en forêt. Nous avons dès lors dû associer la science (installation et suivi de dispositifs expérimentaux, recherche bibliographique, échanges scientifiques, analyse de données) et l'expérience empirique (échanges avec des forestiers et industriels du bois en Europe occidentale et en Finlande, sylviculture sur le terrain) (Figure 5.1). Cette association fut très bénéfique.

Par exemple, à la typologie (**Chapitre 2**) établie scientifiquement sur des données très précises, nous avons adjoint une catégorie correspondant aux jeunes stades de la succession forestière. Cette dernière n'a pas pu être identifiée par les données de l'IPRFW, en raison du seuil de mesure des circonférences, de la durée des cycles d'inventaire (> 10 ans), et de la rapidité de la colonisation du bouleau. Or, ce sont ces régénérations qui font l'objet des questionnements des forestiers, et qui conviennent le mieux, aujourd'hui, à la sylviculture pour la production de bois d'œuvre de bouleau de haute qualité. Cette dernière affirmation a été confirmée, notamment par la mise en évidence des exigences du bouleau pour une croissance diamétrique suffisante (**Chapitre 4**).

Pour pouvoir discuter et organiser de façon réaliste les informations scientifiques issues de la littérature, l'analyse AFOM (**Chapitre 3**) demande une connaissance préalable des enjeux socio-économiques et des attentes liées à la gestion forestière et à l'industrie du bois, pour comprendre la place potentielle du bouleau dans ce contexte. Les opportunités et menaces, par exemple, dépendent de l'environnement du sujet d'étude, qui évolue, et dont les tendances ne sont pas toujours décrites dans la littérature. Les échanges sur le terrain ont aussi permis d'insister sur certains éléments, par exemple la forte sensibilité du bouleau à la pourriture en cas d'élagage de trop grosses branches, qui s'est avérée être la cause assez récurrente d'échecs dans la production de grumes de bois d'œuvre.

L'étude simultanée, d'une part, des premiers résultats des 3 axes de recherche (**Chapitres 2, 3 et 4**), et d'autre part, du bouleau sur le terrain, notamment par le partage de connaissances avec des professionnels, a soulevé la nécessité de compléter les dispositifs expérimentaux existants (jeu de données A du **Chapitre 4**) avec des données relatives à des bouleaux détourés encore plus précocement. Finalement, l'ajout des expériences de détourage dès 4 et 5 ans (sites 7 et 8) a mis en évidence l'un des grands fondements de la sylviculture du bouleau : l'effet particulièrement négatif de la compétition sur la croissance diamétrique dans les

régénérations naturelles denses, comme c'est typiquement le cas après les coupes rases. Cela a également permis de mieux comprendre les différences d'accroissement observées entre les modalités dans le site 6. Sans les données rajoutées à partir de 2015 (sites 7 et 8 du jeu de données B et jeux de données C et D), les résultats globaux auraient annoncé une croissance plus faible pour le bouleau, et très peu d'effet du détournement (ce qui est le cas passé un certain âge). Aussi, compléter le manque de données par différentes expériences *in situ*, imparfaites, initiées par des forestiers (sites 9 à 23), n'aura pas permis de créer aujourd'hui un modèle d'accroissement diamétrique, conformément aux contraintes discutées dans le **Chapitre 4**, mais a apporté de précieuses informations pour la pratique. Une thèse ne dure que quelques années, ce qui est bref pour décrire le développement d'un arbre, d'autant plus s'il s'accommode de toutes sortes de situations (**Chapitre 2**), et en régénération naturelle. De plus, pour répondre à leurs questionnements actuels, les praticiens ont besoin de réponses rapides, car les boulaies ne peuvent attendre pour recevoir les opérations sylvicoles lorsque l'objectif est de fournir du bois d'œuvre.

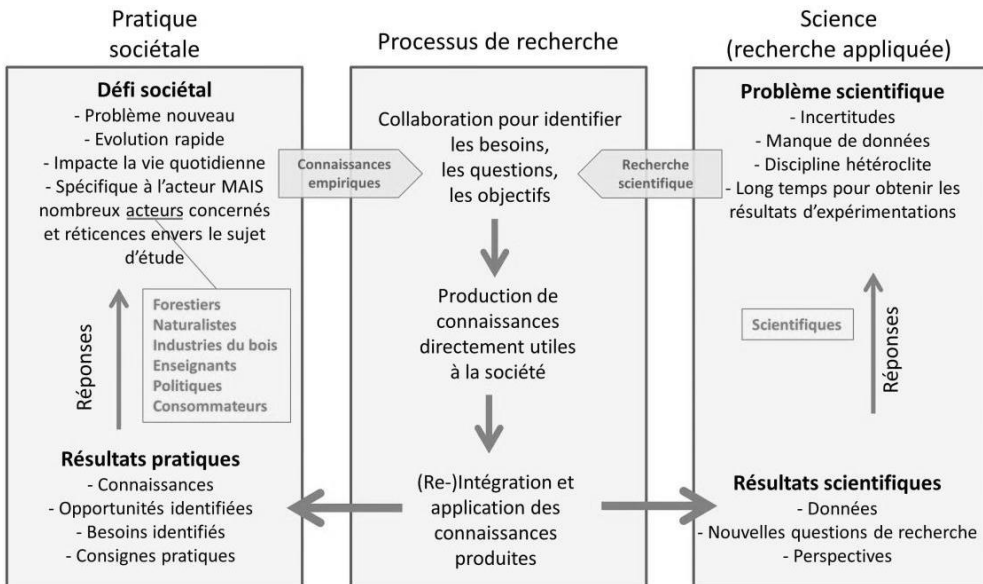


Figure 5.1 Illustration schématique du lien entre la recherche scientifique et les connaissances empiriques dans la thèse (adapté de Lang *et al.*, 2012)

L'implication des riches connaissances empiriques, acquises de façon informelle, a permis d'orienter les objectifs, d'ajuster la méthodologie générale, notamment le protocole des dispositifs expérimentaux, et de guider et enrichir les discussions. Ces informations sont souvent difficiles à incorporer de façon objective dans la science, d'autant plus qu'elles peuvent avoir une portée locale. Cependant, la collaboration entre la science et la pratique est indispensable pour apporter des réponses réalistes, surtout lorsque les informations sont rares, et si le sujet est tributaire des évolutions

de l'environnement et du monde socio-économique, plus rapides que les essais expérimentaux. Vu que l'intégration du bouleau dans la gestion forestière était jusqu'à ce jour assez exceptionnelle, il était nécessaire d'échanger avec toute personne ayant une expérience sur le sujet. Cette recherche exploratoire donne dès lors des pistes pour les besoins supplémentaires en recherche (voir point 3.2), et fixe des balises pour l'expérimentation future (par exemple, le besoin d'augmenter l'échantillonnage dans de très jeunes peuplements détourés).

2. Le bouleau, essence d'avenir dans nos forêts de production ?

Les effets des changements globaux prennent de court les forestiers, mais aussi les industries de transformation du bois. La rentabilité des productions sylvicoles simplifiées, telles que les monocultures résineuses, se retrouve parfois soudainement compromise, comme dans les cas de dépérissements massifs, notamment liés aux scolytes. Parmi les voies d'adaptation possible, la diversification des forêts s'avère une stratégie incontournable. Le bouleau rencontre de plus en plus d'opportunités pour se régénérer en forêt (**Chapitres 2 et 3**). Cependant, la filière bois, de l'amont pour ce qui est de la sylviculture, à l'aval pour la transformation du bois, n'a aucune expérience sur cette essence (**Chapitres 3 et 4**).

C'est souvent lors de la genèse d'un nouveau peuplement, par exemple après une coupe rase qui suit la récolte de bois murs, un dépérissement, des attaques de scolytes, ou des chablis, que les forestiers s'interrogent sur les essences à favoriser, aujourd'hui et pour le futur. Peuvent-ils tirer profit de cette régénération, gratuite, de bouleau ? Quels intérêts auraient-ils à l'inclure dans une révolution temporaire, par exemple entre deux générations résineuses ? Dans l'esprit de la plupart des forestiers d'Europe occidentale, le bouleau est une « mauvaise herbe envahissante », qui « détruit » les plantations d'autres essences, ne générant que de faibles revenus dans la filière du bois énergie ou du papier. Ces problèmes, liés aux faiblesses du bouleau (**Chapitre 3**), peuvent cependant être réglés par des actions sylvicoles appropriées. Par la synthèse de nos résultats, nous développons un argumentaire par rapport à l'utilisation du bouleau dans la gestion forestière, en nous appuyant sur un enchaînement de questions qui reflètent les interrogations et les doutes des forestiers que nous avons pu rencontrer au cours de nos recherches.

2.1 Le bouleau pourrait-il générer un revenu ?

L'aspect économique fait souvent partie des considérations du propriétaire dans les forêts de production. Cette question se décline en 2 parties : les propriétés du bois ou des PFNL de bouleau conviennent-elles à des valorisations rémunératrices ? Sa disponibilité suffirait-elle à supporter un marché rémunérateur ?

2.1.1 Les propriétés du bois ou des PFNL conviennent-elles à des productions valorisables sur le marché ?

Le bois du bouleau jouit d'excellentes propriétés techniques et esthétiques (voir **Chapitre 3**, point 3.4), permettant de nombreuses valorisations (voir **Chapitre 3**, points 5.2 et 5.3), entre autres en tant que bois d'œuvre d'ameublement et de construction, mais il est également particulièrement adapté pour la production de panneaux aux multiples fonctions et de papier de haute qualité (Luostarinen *et al.*, 2000 ; Verkasalo *et al.*, 2009 ; Woxblom *et al.*, 2010 ; Ehrhart *et al.*, 2015 ; Jeitler *et al.*, 2016 ; **Chapitre 3**). Le bouleau fait aussi l'objet de marchés à haute valeur ajoutée pour ses PFNL tels que la sève, dont la commercialisation est rentable dès que le peuplement a une dizaine d'années (Verkasalo *et al.*, 2017 ; Bilek *et al.*, 2018), plusieurs types de champignons cultivés en symbiose, ainsi que de nombreuses molécules pharmaceutiques dans son bois et son écorce (Verkasalo *et al.*, 2017). La sève de bouleau, qui commence à être commercialisée par des entreprises locales en Europe occidentale, reçoit un très bon accueil de la part des consommateurs. L'Europe occidentale peut en outre profiter de la longue expérience de transformation, d'utilisation et de commercialisation du bois et des PFNL de bouleau en Europe du Nord et dans les Pays baltes (**Chapitre 3**).

Trois qualités de grumes de bouleau sont distinguées selon leurs valorisations potentielles (**Chapitre 3**) :

1. Les grumes de bois d'œuvre de haute qualité (de l'ordre de minimum 40 cm de diamètre, idéalement 50 cm ; droites ; sans nœuds ou avec de rares nœuds sains ; sans coloration), valorisables en tranchage, en déroulage ou en sciage.

Le bouleau n'a que très rarement bénéficié des conditions de croissance qu'exigent son tempérament héliophile (Cameron 1996 ; Hemery *et al.*, 2005) et ses sensibilités pour pouvoir produire ce type de grume en Europe occidentale (Hein *et al.*, 2009 ; Niemistö *et al.*, 2019 ; **Chapitres 3 et 4**). L'observateur l'associe dès lors souvent aux boulaies d'allure abandonnée, à l'arbre courbé, souvent en cépée, de faible diamètre, au bois coloré ou pourri (**Chapitre 2**). Or, dans les conditions écologiques de l'Europe occidentale, il est possible de produire des bouleaux commercialisables (Hein *et al.*, 2009 ; Hynynen *et al.*, 2010 ; Wilhelm *et al.*, 2013 ; Bonaventura *et al.*, 2016) de haute qualité (**Chapitre 3**) au diamètre de 40 cm dès 30 à 40 ans ou de 50-60 cm en 40 à 60 ans (Hein *et al.*, 2009 ; Wilhelm *et al.*, 2013 ; Vanhellefont *et al.*, 2016 ; Bonaventura *et al.*, 2016 ; **Chapitre 4**). Les grumes de bouleau de haute qualité ont une place de choix dans l'ameublement et dans la construction ;

2. Les grumes de bois d'œuvre de qualité moyenne (diamètre d'au moins 28 cm ; légère courbe acceptée ; quelques nœuds acceptés ; pourriture ou coloration limitée du cœur acceptées), valorisables en déroulage pour produire du contreplaqué ou en sciage. La construction peut accepter des grumes de qualité moyenne, même colorées, pour les éléments non-

apparents, pour autant que les nœuds soient limités et qu’il n’y ait pas de pourriture. Le secteur du transport les valorise également largement sous forme de panneaux (Luostarinen *et al.*, 2000 ; Verkasalo *et al.*, 2009 ; Woxblom *et al.*, 2010 ; Ehrhart *et al.*, 2015 ; Jeitler *et al.*, 2016 ; Verkasalo *et al.*, 2017) ;

3. Les bois de qualité inférieure (trituration), c’est-à-dire de toute dimension et conformation, valorisables en papier, en carton, en panneaux de fibres ou de particules ou en bois énergie.

2.1.2 Le bouleau n’est-il pas trop rare ou disséminé pour pouvoir réellement supporter un marché valorisant en Europe occidentale ?

Le bouleau se distribue très largement en Eurasie. Son abondance et sa proportion parmi les autres essences forestières sont croissantes vers le nord, où il constitue le principal feuillu en Finlande, en Norvège, en Suède, en Russie, et dans certains pays de l’Europe de l’Est (Hynynen *et al.*, 2010 ; **Chapitre 2**). A l’échelle de l’Europe occidentale, de nombreuses autres essences, résineuses et feuillues, se développ(ai)ent de façon plus compétitive dans les stades matures. Pourtant, bien que les forestiers aient presque systématiquement lutté contre sa présence, le bouleau occupe tout de même de 0,5 à 6 % du volume forestier total, selon le pays. Cependant, l’essentiel de la ressource est disséminé dans des peuplements d’autres essences, ce qui complexifie sa mobilisation. Mais surtout, les bois de diamètre supérieur à 38 cm sont rares (ils ne représentent que 7 % du volume forestier total en Wallonie), dont très peu (< 4 %) sont droits et peu branchus (**Chapitre 2**). Par ailleurs, il est très probable qu’une grande proportion de ceux-ci contienne de la pourriture (liée à l’âge, à d’anciennes plaies ou aux branches mortes), défaut fréquent en bouleau et rédhibitoire pour une utilisation en tant que bois d’œuvre (**Chapitre 3**).

En revanche, la ressource en bouleau montre une expansion conséquente, en surface et en volume (**Chapitre 2**), et cette tendance devrait très probablement s’accroître dans le cadre des évolutions climatiques et socio-économiques (**Chapitre 3**). Le bouleau se régénère dans les trouées de chablis ou dans les peuplements touchés par des dépérissements, de plus en plus fréquents. Son abondance est aussi dans une certaine mesure conditionnée à l’homme qui peut, volontairement ou non, favoriser son installation, et lutte de moins en moins contre lui. Ainsi, le bouleau profite des coupes rases non replantées, parfois à cause de l’inquiétude croissante vis-à-vis de la pérennité des principales essences commerciales, des coûts associés au boisement, ou des échecs de plantation (mauvaise reprise des plants, dégâts de gibier, dégagements insuffisants). Les politiques forestières lui sont également favorables. Il s’inscrit dans l’esprit prôné par les certifications forestières (PEFC, FSC), qui visent entre-autres à diversifier les peuplements et à inclure les essences indigènes actuellement d’importance commerciale mineure (**Chapitre 3**).

Si nous prenons l'exemple de la Finlande, qui est naturellement très riche en bouleau pubescent (**Chapitre 2**), la majorité des bois, de qualité inférieure et/ou de faible dimension, est déchiquetée pour l'énergie et la fabrication de panneaux et de papier. Les grumes de bois d'œuvre, naturellement formées ou, de plus en plus, issues de plantations gérées de bouleaux verruqueux, concernent 10 % du volume de bois de bouleau commercial (Verkasalo *et al.*, 2017). Ces dernières sont principalement valorisées en (micro-)déroulage pour la fabrication de panneaux contreplaqués (Verkasalo *et al.*, 2017). La ressource en Europe occidentale semble quant à elle insuffisante (**Chapitre 2**) pour rendre cette transformation industrielle compétitive ou rentable à ce jour (**Chapitre 3**). Dès lors, s'inscrire dans la production de bois d'œuvre de haute qualité offre actuellement le plus de chance de valorisation rémunératrice du bois, du moins lorsque la quantité n'est pas élevée dans un premier temps. Dans ce contexte, les grumes qui résulteront des éclaircies d'amélioration ou naturellement formées trouveront des possibilités de valorisation en tant que grumes de qualité moyenne le cas échéant, pour lesquelles des industries du bois locales commencent à montrer un intérêt également, et certainement en tant que bois de qualité inférieure.

Le bouleau pourrait réellement devenir une matière première bois intéressante en Europe occidentale, compte tenu : de l'évolution de la ressource ; de la dimension possible des grumes (Hein *et al.*, 2009 ; Bonaventura *et al.*, 2016 ; **Chapitre 4**) ; de ses bonnes propriétés mécaniques et de son utilisation prometteuse en ameublement, dont la tendance est aux bois clairs, et en construction, par exemple en bois massif ou sous forme de GLT et de panneaux CLT ; du contexte socio-économique (**Chapitre 3**). La demande pour la matière première bois est forte, et les problèmes sanitaires qui touchent les forêts menacent les approvisionnements futurs des essences commerciales habituelles (Kleinschmit *et al.*, 2017 ; Dubois *et al.*, 2020). En Europe du Nord et dans les Pays baltes, les industries importent de grandes quantités de grumes de bouleau de haute et de moyenne qualité, et du bois de qualité inférieure, en provenance de Russie, et les pays d'Europe occidentales importent du bois de bouleau et des produits à base de bois de bouleau depuis les pays du nord de l'Europe, les Pays baltes et la Russie (**Chapitre 3**). La hausse des coûts, notamment du transport et des taxes, avait déjà eu pour conséquence une diminution de ces importations, par exemple nécessaires pour la fabrication de pâte à papier et de panneaux de fibres et de particules de bois dans nos régions. Plus récemment, les réponses géopolitiques liées à l'invasion russe en Ukraine, telles que les embargos sur les produits, exercent une forte pression sur le marché international. Quelle valeur le bouleau peut-il prendre dans ce contexte ? Les industries locales qui valorisent déjà le bouleau s'appuyaient principalement sur des bois importés, mais elles s'intéressent de plus en plus à la ressource locale, de toutes les qualités, et bien plus sérieusement depuis février 2022.

Les caractéristiques du bois de bouleau, sa forme et sa dimension lui permettent d'être récolté et transformé avec les mêmes équipements que pour les résineux. La possibilité de mécaniser l'exploitation constitue un avantage souligné par les

entreprises. Au niveau logistique, une attention particulière doit cependant être portée à la conservation des grumes en cas de stockage prolongé (**Chapitre 3**).

Tant que la ressource en grumes de haute qualité sera rare et disséminée, leur commercialisation pourrait se faire à bord de route (constitution de lots homogènes par leur regroupement) ou sur des parcs à grumes de feuillus précieux (à condition d'être vendues rapidement à cause du risque de pourriture), qui font l'objet de ventes internationales, par exemple entre la France, l'Allemagne, la Belgique et le Luxembourg. A l'heure actuelle, il s'agit encore d'un marché de niche, mais l'exemple de la forêt de Blieskastel en Allemagne est très encourageant : les grumes de bouleau de haute qualité (Figure 5.2) produites grâce à la sylviculture sont vendues à de très bon prix à une clientèle fidélisée (Bonaventura *et al.*, 2016).



Figure 5.2 Ressource en bouleaux de haute qualité dans la forêt de Blieskastel (Allemagne).

Le bouleau présente aussi un avantage considérable par rapport aux autres essences feuillues minoritaires telles que par exemple l'aulne ou le tilleul : si dans un premier temps, les approvisionnements locaux pour une entreprise sont irréguliers, le temps de créer une ressource adaptée, ils peuvent être complétés par les marchés du nord et baltiques, afin d'éviter une rupture de production temporaire.

2.2 Qu'est-ce qui fait du bouleau un choix intéressant pour la gestion d'une parcelle ?

L'installation naturelle du bouleau sur les parcelles est un argument fort en faveur de sa sylviculture, permettant d'économiser les importants frais liés aux plantations (préparation de terrain, plantation, regarnissages, dégagements). Il n'y a dès lors, à ce jour, pas vraiment d'intérêt à planter ou à semer le bouleau, sauf dans les situations de blocage à cause de l'absence de semenciers dans le paysage, ou de la végétation au sol. Cependant, cet argument n'est pas suffisant, et les questions qui suivent doivent nécessairement se poser.

2.2.1 Le bouleau est-il adapté à la parcelle ?

Le choix des essences à favoriser se fait parmi celles qui sont *a priori* adaptées aux conditions stationnelles, actuelles et présumées jusqu'à leur récolte à maturité. Le

bouleau a l'avantage de bien se développer dans une large gamme de températures et de pluviométries, et de supporter des climats contrastés (Ellenberg 1996 ; EUFORGEN 2009 ; **Chapitre 2**). Etant l'une des essences les plus frugales (Noirfalise 1984 ; Atkinson *et al.*, 1992 ; Hynynen *et al.*, 2010 ; **Chapitre 1**), le bouleau (uniquement verruqueux en conditions sèches et pubescent en conditions très humides) est productif sur la majorité des parcelles forestières, même pauvres, comme le montre par exemple la forte croissance diamétrique sur le podzol très pauvre du site 6 (**Chapitre 4** ; Figures 4.2 et 4.6). Sur les sols les plus secs ou les plus humides, où sa productivité décline, il est l'une des rares essences à pouvoir se développer (Petit *et al.*, 2017 ; **Chapitre 3**).

Le bouleau bénéficie aussi d'une capacité d'adaptation physique à l'évolution de son environnement. Avec sa grande diversité génétique conjuguée à son fort pouvoir de reproduction et de dissémination dès ses 5 ans, l'essence est supposée capable de s'adapter relativement rapidement (**Chapitre 3**). En sélection génétique artificielle par exemple, une génération suffit pour obtenir des améliorations significatives (Koski *et al.*, 2005). Dans nos dispositifs expérimentaux, les 3 dernières mesures des sites 7 et 8 (**Chapitre 4**) concernent les saisons de végétation de 2018, 2019 et 2020, qui ont atteint des records de chaleur et de sécheresse¹⁰ en Belgique. Les accroissements des bouleaux (verruqueux) sont restés importants suite au détournage dès 4 ans sur le site 7 (Figure 4.8) et au détournage dès 5 ans sur le site 8 (Figure 4.9), dont les sols sont plutôt pauvres et secs. Toutefois, les modèles d'adaptation des essences au changement climatique se contredisent (**Chapitre 3**). Un suivi à plus long terme, complété d'études dendrochronologiques (de façon analogue à Latte *et al.*, 2016a), est nécessaire, afin de vérifier la résistance potentielle du bouleau verruqueux à un climat devenant plus chaud et plus sec, et de définir l'écogramme du bouleau pubescent dans ces conditions.

La résistance réelle des essences aux modifications, incertaines, du climat reste une inconnue. C'est aussi pour cette raison que le mélange d'essences est toujours recommandé (Brang *et al.*, 2014, Messier *et al.*, 2019). En revanche, avec une sylviculture dynamique, le bouleau atteint des dimensions commerciales entre 40 et 60 ans (**Chapitre 4**). La durée d'exposition aux risques, tels que les tempêtes et événements climatiques extrêmes, est donc raccourcie, et la magnitude de l'évolution du climat sera donc moindre sur la durée de sa révolution, en comparaison avec les autres essences, plus longévives.

Actuellement, aucune maladie ni ravageur n'affecte significativement sa croissance ni sa survie en Eurasie (**Chapitre 3**).

¹⁰ <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/bilans-climatologiques/2016-2020/2020/ete> (consulté le 30 juin 2022)

2.2.3 Le bouleau peut-il intégrer un peuplement mélangé productif ?

Le bouleau peut très bien s'associer avec la plupart des autres essences, pour former des peuplements productifs en termes de quantité et de qualité du bois (Rock *et al.*, 2004 ; Liziniewicz 2009 ; Saha *et al.*, 2012), à un ou à plusieurs étages (Pommerening *et al.*, 2004 ou Stark *et al.*, 2013 et 2015). Dans les mélanges, le bouleau peut participer à la résistance des peuplements contre certains types de ravageurs, grâce à ses caractéristiques spécifiques de croissance rapide et à l'émission de composés volatils chimiques (Castagneyrol *et al.*, 2013 et 2014 ; Jactel *et al.*, 2015 ; Damien *et al.*, 2016). La boulaie est également particulièrement intéressante comme peuplement d'abri, vertical et/ou latéral, qui facilite le développement d'autres essences, plantées ou naturellement régénérées, en diminuant la force du vent, l'évapotranspiration, les extrêmes thermiques, la vigueur de la végétation concurrente, l'ensoleillement direct, *etc.* (Pommerening *et al.*, 2004 ; Stark *et al.*, 2013 et 2015). Le bouleau utilise généralement les ressources de façon complémentaire (Curt *et al.*, 2003 ; Brang *et al.*, 2014), excepté la lumière : sa forte croissance les 20 premières années en font un rude compétiteur, d'où son assimilation à une « mauvaise herbe ». Dès lors, son association avec les autres essences doit être bien organisée et gérée dès les premières années afin qu'il ne leur cause pas de dégâts irréversibles de croissance et de qualité (rectitude, fourches) (**Chapitre 3**). Le sylviculteur doit notamment contrôler l'abondance du bouleau lorsqu'il colonise les jeunes plantations.

Le bouleau ne s'installe pas sous les peuplements matures, même de sa propre espèce, à l'exception de vieilles pineraies claires. Si la présence du bouleau sous forme de peuplements (presque) monospécifiques vient à augmenter, il s'agit d'une essence pionnière de transition. Dans le contexte écologique de l'Europe occidentale, il est naturellement remplacé par les essences plus longévives qui se développent dans son sous-bois. Le bouleau se déplace au gré des ouvertures, se mélange, et ne se comporte comme une essence climacique que dans les conditions extrêmes, telles que sur les tourbières (Noirfalise 1984 ; Hynynen *et al.*, 2010).

2.2.4 Le bouleau est-il adapté aux contraintes cynégétiques ?

Lors de la régénération et des premiers stades de développement, la liste des essences adaptées à une parcelle (sans installer de dispositif de protection) se réduit si l'on considère les contraintes locales, telles qu'un déséquilibre entre l'abondance de gibier et la capacité d'accueil du territoire. Dans les trouées suffisamment lumineuses pour permettre sa croissance normale, le bouleau est particulièrement résistant au gibier, au point que dans certains territoires, il s'impose comme la dernière essence rescapée, grâce à l'effet conjoint de sa moindre appétence (du moins pour le bouleau verruqueux) par rapport à de nombreuses essences, de l'abondance de ses semis naturels et de sa croissance juvénile très rapide qui le met rapidement hors de danger (**Chapitre 3**).

2.2.5 Qu'apporte le bouleau à mes peuplements forestiers ?

L'intégration du bouleau dans les forêts dominées par d'autres essences, en mélange intime ou par zones monospécifiques, améliore la biodiversité : par les espèces qui lui sont directement associées, mais aussi par les conditions de luminosité qu'il confère au sous-étage, favorisant le développement d'autres essences et de la végétation, créant des structures irrégulières. De nombreuses espèces animales, fongiques et végétales se nourrissent ou trouvent leur habitat dans les boulaies (Perala *et al.*, 1990 ; Patterson 1993 ; Felton *et al.*, 2011 ; Branquart *et al.*, 2005 ; Hynynen *et al.*, 2010), dont le gibier, contribuant à l'amélioration de la capacité d'accueil du massif forestier. Produire des bouleaux de grande dimension par la sylviculture, même pour un court temps dans les forêts de production, est également bénéfique à la biodiversité (Paillet *et al.*, 2019). Le bouleau peut d'ores et déjà participer à l'accession à certaines primes locales, labels et certifications de gestion durable (PEFC, FSC), qui pourraient se multiplier à l'avenir.

Le bouleau optimise également le fonctionnement du sol (porosité, activité des microorganismes et de l'entomofaune) et donc des cycles de l'eau (infiltration) et des éléments minéraux (minéralisation des litières), qui est à la base de la fertilité des sols forestiers. Il participe à la restauration des sols tassés par les exploitations, appauvris par les pratiques sylvicoles ou agricoles intensives ou contaminés par certains métaux lourds (**Chapitre 3**). Il contribue dès lors à l'amélioration de la productivité du peuplement qui lui succèdera.

La présence du bouleau en forêt agrément le paysage et les peuplements en les diversifiant, les colorant, les illuminant. Il contribue à rendre la forêt plus accueillante pour sa fonction de loisir, de divertissement et de ressourcement. Le bouleau est également prisé pour la récolte de sa sève, qui peut aussi être réalisée par un public non-professionnel.

2.3 Quelles sylvicultures pour le bouleau ?

Si le choix est d'intégrer le bouleau dans la gestion forestière, il faut définir sa sylviculture, selon les objectifs poursuivis (bouleau en accompagnement au service des autres essences, pour ses atouts du point de vue écologique, pour la production de bois d'œuvre, *etc.*) et le type de peuplement (composition, âge¹¹, densité, *etc.*). La première partie du paragraphe est consacrée à la production de grumes de haute

¹¹ Pour évaluer l'âge, le comptage des cernes du bouleau sur une souche est complexe car la limites entre les cernes est difficile à distinguer (voir Matériel et Méthode du **Chapitre 4**). Dans les 10 à 15 premières années, le bouleau à environ le même âge que sa hauteur en mètres (conditions suffisamment lumineuses et station lui convenant) (Lemaire 1998 ; Diéguez-Aranda et al., 2006 ; Hein et al., 2009 ; Wilhelm et al., 2013). Des études supplémentaires devraient préciser cette approximation, notamment en regard de la station. La date de la mise-à-blanc ou de la trouée permet aussi d'estimer l'âge du bouleau, qui s'installe généralement dans les 3 années qui suivent.

qualité, car les consignes pour y parvenir sont très spécifiques. La seconde partie présente des consignes plus générales, selon le type de peuplement rencontré.

2.3.1 Production de grumes de haute qualité

Deux faiblesses du bouleau (**Chapitre 3**) imposent le respect de règles strictes pour parvenir à produire du bois d'œuvre de haute qualité :

1. La cime du bouleau nécessite une croissance libre pour un développement optimal. Si son expansion est contrainte par d'autres arbres, le bouleau réduit, dès un très jeune âge, son potentiel de croissance diamétrique (**Chapitre 4**). Contrairement à d'autres essences telles que les chênes indigènes ou le hêtre (par exemple dans Wilhelm *et al.*, 2013), le bouleau ne tolère pas de phase de compression latérale (Hein *et al.*, 2009) ;
2. Les grumes doivent être exemptes des défauts rédhibitoires à leur valorisation noble, tels que les nœuds, mais aussi la coloration ou la pourriture du bois, auxquels le bouleau est particulièrement sensible (**Chapitre 3**), liées :
 - au vieillissement de l'arbre. Le terme d'exploitation ne devrait pas dépasser 60 ans pour réduire ce risque (Luostarinen *et al.*, 2000 ; Niemistö *et al.*, 2008 ; Hein *et al.*, 2009) ;
 - aux blessures, en ce compris les dégâts d'exploitation, de gibier, et l'élagage des branches dont le diamètre excède 2 cm, voire maximum 3 cm pour les arbres à forte croissance diamétrique (Hein *et al.*, 2009 ; Niemistö *et al.*, 2019) ;
 - aux branches mortes (Niemistö *et al.*, 2019).

La prise en compte de ces paramètres nous dirige vers la sylviculture d'AO (Wilhelm *et al.*, 2013 et 2017) :

- qui dynamise la croissance individuelle des AO par des détourages, fournissant de manière optimale la lumière et l'espace nécessaire au développement de la cime ;
- qui permet de contrôler leur qualité par un élagage artificiel soigneux. C'est pour cet aspect que la sylviculture d'AO commence aussi à être proposée dans les pays du nord de l'Europe (Skovsgaard *et al.*, 2021) ;
- qui est adaptée au bouleau car la largeur des cernes n'a aucune répercussion sur les utilisations de son bois (Cameron *et al.*, 1995 ; Hein *et al.*, 2009).

La première intervention doit impérativement être précoce. En effet, les bouleaux soumis à une forte concurrence (Figure 5.3A) réduisent durablement leur capacité d'accroissement diamétrique dès 4 à 5 ans (**Chapitre 4**). De plus, leurs branches basses meurent, mais subsistent sur le tronc (Figure 4.11). En outre, ils deviennent élancés et très sensibles aux dégâts de neige (de Champs 1987 ; Skovsgaard *et al.*, 2021). Les bouleaux plus isolés forment quant à eux rapidement des grosses branches (Figure 5.3B), qui peuvent dépasser la dimension seuil maximale d'élagage

liée au risque de pourriture (Niemistö *et al.*, 2019). L'élagage permet aussi d'augmenter la proportion de bois (à l'intérieur du tronc) sans nœud (Hein *et al.*, 2009).

Le détourage doit assurer la croissance libre de la cime, qui s'élargit rapidement en croissance libre (Figure 4.4), et considérer que la flexibilité spécifique du tronc du bouleau engendre des collisions entre cimes voisines sous l'action du vent (Meng *et al.*, 2006). Nous avons constaté qu'il y avait un besoin de mieux décrire, avec des critères plus objectifs, l'intensité idéale de détourage à appliquer au bouleau. Il pourrait s'agir d'une distance (méthode *cutting-distance*), fonction de l'âge et de la dimension de l'AO, qui puisse idéalement être pondérée avec la structure du peuplement (nombre, densité et dimension des compétiteurs).

Les interventions doivent être fréquentes les premières années (selon nos observations dans les dispositifs et essais sur le terrain, tous les 2 à 3 ans entre 4 et 12 ans), dépendant de la structure du peuplement. Dès que l'élagage est finalisé (hauteur de fut sans branches atteinte), les interventions peuvent être plus espacées, à condition que le détourage soit suffisamment fort pour garantir la croissance libre de la cime jusqu'au passage suivant.

Si le sylviculteur démarre plus tardivement les interventions, il risque de devoir revoir à la baisse son diamètre objectif de grume, et, selon ce qui ressort de la mesure des arbres dans nos expériences (Figures 4.3, 4.6, 4.8 et 4.9), d'autant plus que le diamètre du bouleau est faible au départ. La limite d'âge maximale se situe aux alentours de 12 ans (**Chapitre 4**). Dans certains mélanges, cette limite peut sensiblement s'allonger car le grossissement des branches basses du bouleau est contenu par l'essence compagne, qui a généralement une croissance juvénile en hauteur plus faible (Petit *et al.*, 2017), par-dessus laquelle la cime du bouleau peut s'étendre sans compétition (Figure 5.3D) (Heräjärvi 2002 ; Hynynen *et al.*, 2010). Des données supplémentaires sont nécessaires pour pouvoir quantifier par la modélisation le diamètre minimum qu'un bouleau devrait avoir à un âge donné, compte tenu de la station, pour que le détourage lui permette d'atteindre l'objectif de dimension ciblé. A cause de sa sensibilité à la pourriture, retarder les interventions risque de faire brusquement évoluer la qualité du bouleau de « haute » à « inférieure ». Pour cette même raison, les travaux doivent absolument être réalisés avec soin. Ces éléments distinguent le bouleau des chênes sessile et pédonculés, par exemple, résistants à la pourriture et dont les différentes qualités de grume ont des débouchés en bois d'œuvre, ou de l'épicéa, dont les peuplements, même avec très peu d'éclaircies, peuvent fournir des produits bien valorisés sur le marché. La production de bouleaux de haute qualité, exigeant un certain niveau de compétence technique, revalorise le métier de sylviculteur et d'ouvrier forestier.

Le modèle de développement de la cime du bouleau (Figure 4.4) est utile pour répartir les bouleaux-objectif selon la dimension de grume visée, afin qu'ils puissent subsister sans se concurrencer, éventuellement avec d'autres essences en mélange (Baar 2010), jusqu'à leur récolte respective. Par exemple, pour des grumes de 40, 50 ou 60 cm de diamètre, il faut prévoir une distance finale d'environ 8, 10 ou 12

mètres entre deux bouleaux-objectif, respectivement. Lorsque la sylviculture est initiée dès 4 ans, les futurs arbres-objectif sont encore soumis à des risques, par exemple un frotti de gibier, ou de la casse due au frelon (**Chapitre 3**), jusqu'à 10-12 ans environ, lorsque la partie valorisable en bois d'œuvre ne sera plus vulnérable. Partant de ce constat, il est recommandé avant cet âge de conserver un nombre supérieur d'AO que le nombre final prévu. Cela permet de faire une sélection ultérieure parmi les AO les plus performants, lorsque leur statut social dans le peuplement sera mieux défini (Baar 2008). Néanmoins, les modalités de prédésignation (notamment, le nombre d'AO supplémentaires à désigner, leur agencement, et le moment auquel réaliser le choix définitif) doivent être précisées par l'expérience.

A noter que nos données de croissance ne concernent que le bouleau verruqueux, majoritaire. Selon les études finlandaises, le bouleau pubescent est caractérisé par les mêmes exigences sylvicoles que le bouleau verruqueux pour sa croissance diamétrique, mais elle est généralement plus faible (Niemistö *et al.*, 2008 ; Hynynen *et al.*, 2010). Toutefois, le bouleau pubescent est souvent associé à des sols particulièrement contraignants (humidité excessive).

Peut-on parler d'une sylviculture basée sur les processus naturels (O'Hara, 2016) ? En partie, oui, car le forestier tire profit de la régénération naturelle (pas de préparation de terrain ni de plantation), et il permet à un stade de début de succession forestière, intéressant pour de nombreuses espèces, de s'exprimer. Néanmoins, il s'agit d'une sylviculture très interventionniste : le détournement précoce lutte contre la compression et le processus d'élagage naturel (Figure 5.3C).

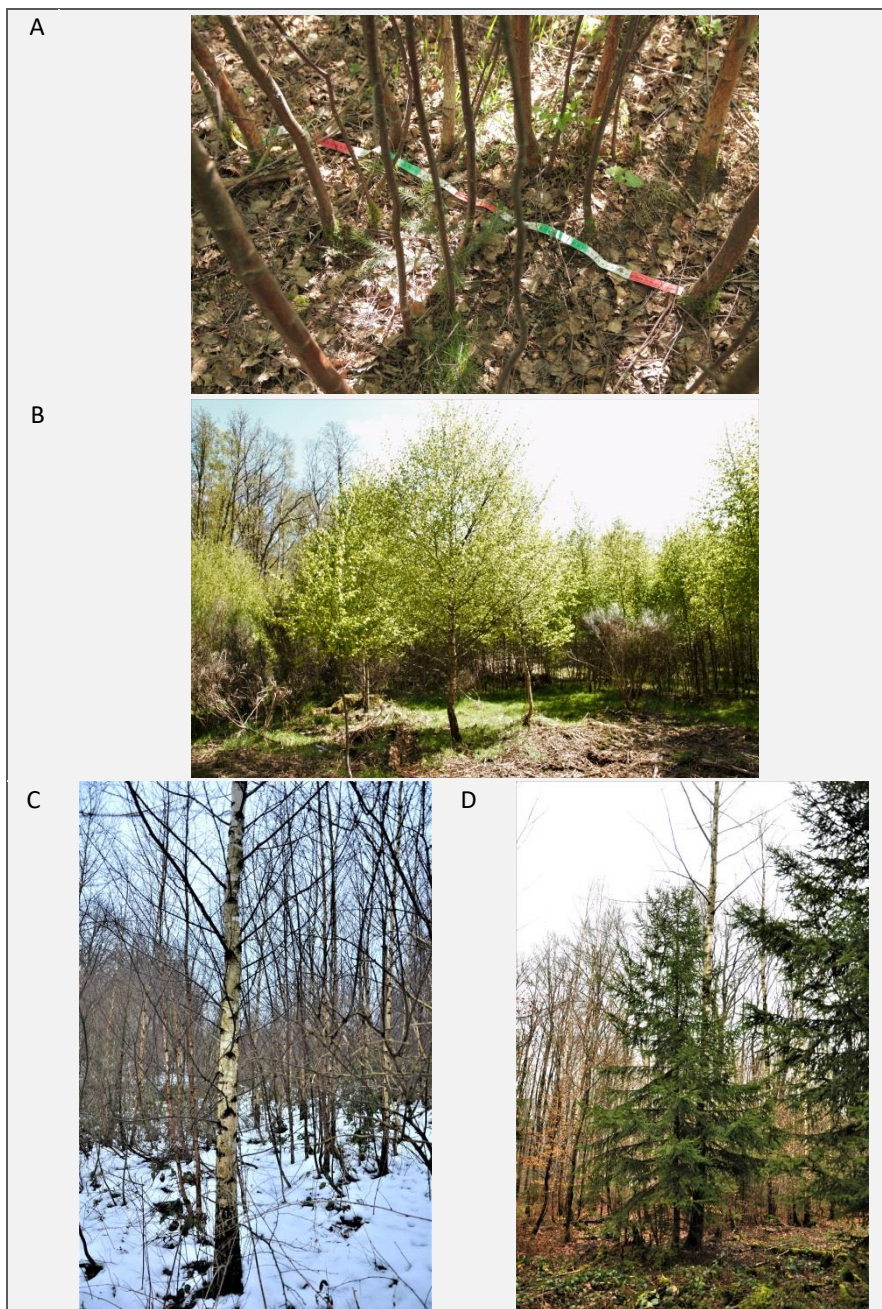


Figure 5.3 (A) densité typique de régénération naturelle du bouleau (le mètre ruban change de couleur tous les 10 cm) ; (B) bouleaux naturellement isolés dès le départ ; (C) par l'élagage naturel, les branches mortes du bouleau subsistent sur le tronc ; (D) dans les régénérations naturelles diversifiées, le bouleau peut parfois étendre sa cime au-dessus des autres essences et bénéficier de la concurrence pour empêcher le grossissement de ses branches basses.

2.3.2 Scénarios de sylviculture dans les peuplements à bouleau

Les peuplements à bouleau se distinguent notamment par la proportion de bouleau (en surface terrière), et par leur structure en taillis, futaie, ou taillis sous futaie (**Chapitre 2**). L'âge du bouleau est également un élément déterminant, étant donné qu'après un certain stade de développement (vers 12 ans), les opérations sylvicoles n'ont que très peu d'effet sur sa croissance diamétrique. L'âge n'étant pas disponible dans les données de l'IPRFW, les recommandations sylvicoles liées à la typologie des peuplements à bouleau (**Chapitre 2**) se limitent à des consignes générales (Figure 5.4) sur base des acquis des **Chapitres 3 et 4**. La fertilité de la station et la région bioclimatique semblent surtout avoir un effet sur les associations d'essences, et sur leur productivité, mais n'influencent pas vraiment les consignes de sylviculture pour le bouleau.

2.3.2.1 Consignes sylvicoles dans les peuplements pauvres en bouleau

Dans les peuplements pauvres en bouleau, ce sont les consignes liées à la typologie propre de(s) (l') essence(s) dominante(s) (résineux, types 2 et 3 de la typologie ; chênes, types 5, 13, 15, 17 et 18 ; feuillus nobles, type 4) qui s'appliquent. De manière générale, tout bouleau qui ne gêne pas une autre essence d'intérêt commercial devrait être maintenu, ne fût-ce que pour son rôle écologique. Un bouleau jeune et de bonne conformation peut être favorisé pour produire du bois d'œuvre (voir ci-dessous points 2.3.2.3 et 2.3.2.4).

2.3.2.2 Spécificité du taillis

Il n'est pas envisageable de produire du bois d'œuvre de haute qualité à partir de brins de taillis de bouleau, qu'il s'agisse de taillis simple (type 10 ; **Chapitre 2**) ou de cépées au sein du taillis sous futaie. La séparation de troncs provenant d'une même souche causera une pourriture. Selon l'IPRFW, cela concerne actuellement de l'ordre de 20 % du volume de bouleau (**Chapitre 2**). Il faut donc envisager les autres valorisations (point 2.3.2.5). A noter que la mécanisation de l'exploitation est plus coûteuse dans les cépées de bouleau que pour les francs de pied.

2.3.2.3 Production de bois d'œuvre dans les jeunes peuplements (< 12 ans)

Lorsque les bouleaux sont jeunes, il est possible d'orienter des individus vers la production de grumes de haute qualité par la technique des arbres-objectif (voir point 2.3.1). Selon le degré de pureté en bouleau du peuplement et du potentiel (écologique ou commercial) des essences qui l'accompagnent, on favorisera parfois les bouleaux (notamment dans les peuplements pauvres en bouleau), et d'autres fois les autres essences (dans les boulaies), de manière à renforcer la diversité spécifique.

Afin de tirer profit de la régénération naturelle (**Chapitre 3**, point 5.1.2.1) dans les coupes rases et trouées, on peut adopter différentes stratégies selon la surface concernée :

- dans les petites trouées (au moins 10 ares), favoriser opportunément les essences qui s'y régénèrent, en veillant à leur répartition spatiale pour permettre leur développement harmonieux à long terme (compte tenu de

- leur besoin en lumière et de l'espace occupé par la cime). Par exemple, dans une trouée d'environ 10 ares bordée par des arbres de grande hauteur, les essences héliophiles comme le bouleau ne se développeront de façon optimale à long terme qu'au centre de celle-ci (Naaf *et al.*, 2007 ; Kelemen *et al.*, 2012 ; Mazdi *et al.*, 2021 ; Figure 4.4) ;
- dans les trouées moyennes (de l'ordre de l'hectare), gérer le bouleau de façon à produire des grumes de bois d'œuvre et/ou profiter de ses atouts sylvicoles au service d'autres essences régénérées naturellement ou plantées localement en enrichissement, en cellules par exemple ;
 - dans les (très) grandes trouées (plusieurs hectares ou dizaines d'hectares), lorsque les moyens financiers sont limités, concentrer les efforts de plantation des autres essences aux zones les plus fertiles et les moins contraignantes (pente, pierres) ou à risque (gibier, exposition au vent, *etc.*). Ailleurs, tirer profit de la régénération naturelle du bouleau, avec une sylviculture adaptée à la production de grumes de bois d'œuvre.

Une autre option dans les peuplements dominés par le bouleau, moins technique, est de réaliser un fort dépressage suivi d'un régime d'éclaircies fortes, pour optimiser la production volumique de grumes de bouleau de qualité moyenne à inférieure (valorisation en trituration et PFNL, voire en sciages de qualité moyenne). Ce type de peuplement doit cependant pouvoir offrir un volume justifiant le déplacement des machines (actuellement, de l'ordre de 25 m³ pour des bois façonnés à route, ou de 200 m³ sur pied). Lemaire (2000) proposait, pour la Belgique, une norme d'éclaircie basée sur la hauteur dominante, visant à maintenir un minimum de 50 % de cime vivante. Cette norme n'a cependant pas été testée *in situ*.

Dans les plantations colonisées par le bouleau, des bouleaux-objectif peuvent être détournés et élagués afin de diversifier la parcelle, de faciliter le développement de la plantation (grâce à l'effet d'abri), ou pour combler un espace où les plants n'ont pas survécu. La densité de bouleaux-objectif doit être contrôlée pour permettre le développement de l'essence plantée, selon les âges de récolte respectifs : par exemple, conserver un bouleau-objectif tous les 20 mètres dans un premier temps, et lorsque la compétition interspécifique s'installe, choisir ceux à conserver selon la santé et le développement chaque individu (exemples dans Dubois *et al.*, 2022).

2.3.2.4 Production de bois d'œuvre dans les plus vieux peuplements (> 12 ans)

Les bouleaux de plus de 12 ans présentant un aspect d'arbre de qualité bois d'œuvre (rectitude, absence de défaut visible tels que des plaies ou des grosses branches mortes) peuvent être détournés s'ils semblent avoir encore du potentiel de croissance diamétrique. C'est parfois le cas lorsqu'ils ont pu profiter de conditions favorables pour développer leur cime (peuplement clair, dépressage naturel par des dégâts de neige ou de gibier, *etc.*). Dans l'attente des modèles de croissance, on pourrait se référer au développement de leur cime : proportion minimale de 50 % de la hauteur de l'arbre et coefficient « diamètre de cime / d130 » supérieur à 20 (Figure 4.4), ce qui attesterait que les bouleaux sont dans des conditions de croissance

relevant de la sylviculture d'AO. Ils peuvent être récoltés s'ils ont une dimension commerciale ou l'âge de 60 ans. La présence de pourriture ne peut être évaluée qu'avant abattage, par un forage de diagnostic.

Lorsque les bouleaux ne semblent plus capables de grossir davantage, leur intérêt réside dans les autres valorisations (voir 2.3.2.5).

2.3.2.5 Autres valorisations du bouleau

Les boulaies et boulaies mélangées ont un intérêt écologique (biodiversité, amélioration du fonctionnement du sol, *etc.*). Elles peuvent également servir à la production de sève (à l'exception des AO qui ne peuvent pas être blessés). Le bouleau peut aussi être valorisé au service des autres essences (abri, contribution à la protection contre des ravageurs) au moyen de trouées réalisées afin de permettre à une régénération naturelle de se développer ou d'y planter localement des cellules d'enrichissement, composées d'autres essences. Les bouleaux peuvent aussi être exploités en bois de trituration pour la pâte à papier et la fabrication de panneaux, ou en chauffage. On peut également choisir de laisser vieillir le peuplement pour que la phase de sénescence des bouleaux puisse s'exprimer, offrant des milieux propices à des espèces spécialisées (Figure 5.5). La boulaie peut aussi être coupée, pour la laisser repousser en taillis (pour des raisons écologiques, ou pour la production de bois de trituration ou de chauffage), ou planter d'autres essences, qui bénéficieront d'un sol amélioré par le bouleau.



Figure 5.5 Les bouleaux en phase de sénescence ont un intérêt pour la biodiversité, et offrent des habitats à diverses espèces (©Daisy Demoor).

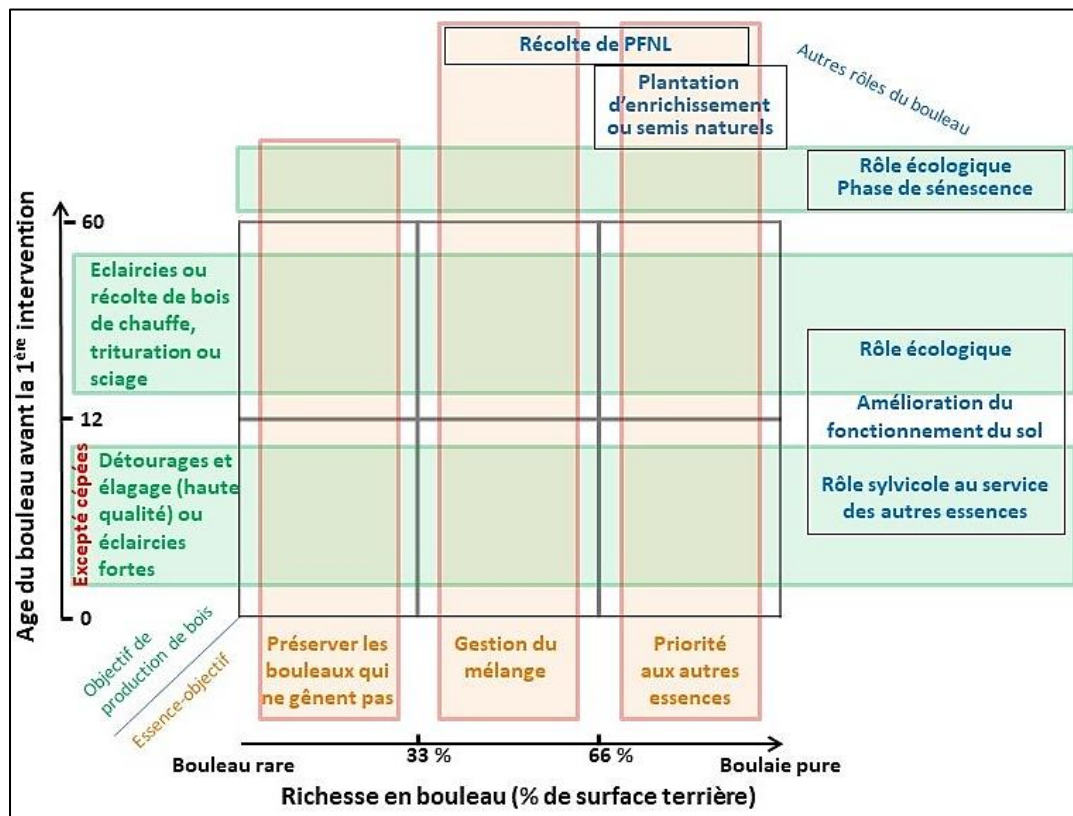


Figure 5.4 Proposition de consignes générales de gestion des peuplements comportant du bouleau selon l'âge du bouleau et sa proportion dans le peuplement, et les objectifs (production de bois et autres apports aux peuplements).

3. Perspectives

La plupart des menaces liées à l'utilisation du bouleau dans la gestion forestière en Europe occidentale identifiées au **Chapitre 3** peuvent être converties en perspectives, notamment du point de vue de la sensibilisation et de la formation des acteurs de la filière bois. Les contraintes méthodologiques, par exemple pour l'analyse de la croissance diamétrique des AO (**Chapitre 4**), mettent quant à elles l'accent sur des besoins en termes de recherche et de développement.

3.1 Sensibilisation et formation

La première étape est de changer la réputation du bouleau par une communication ciblée, en s'appuyant sur ses atouts d'ordre biologique, écologique, sylvicole et économique, et sur les opportunités qui s'offrent à lui dans le contexte des changements globaux, climatiques ou socio-économiques.

La valorisation du bouleau comme bois d'œuvre est actuellement plutôt exceptionnelle en Europe occidentale, ce qui peut freiner les forestiers. Il faut susciter un intérêt auprès de l'industrie du bois, en lui démontrant les qualités du bois de bouleau pour une série d'usages valorisants (bois massif, CLT, GLT, *etc.*). Il est aussi nécessaire de l'informer sur la capacité de nos régions à fournir rapidement du bois d'œuvre de bouleau. Le contexte actuel incertain pour le marché du bois constitue une opportunité pour enclencher un changement dans le monde forestier et industriel. Les problèmes sanitaires des essences commerciales habituelles et les menaces de futures pénuries en bois, ainsi que les approvisionnements qui deviennent de plus en plus coûteux et incertains pour les industries locales qui transformaient du bouleau importé, sont une porte ouverte à la recherche d'alternatives.

Cependant, pour produire du bois d'œuvre de bouleau, il faut maîtriser ses faiblesses sylvicoles. Le réel risque d'échec constitue probablement le plus grand frein à la mise en place d'une filière bouleau. Il faut former le secteur professionnel (gestionnaires forestiers de l'administration et du secteur privé, ouvriers et entrepreneurs), au moyen d'un guide technique combiné à des formations pratiques et un accompagnement sur le terrain, mais aussi via l'enseignement.

Pour briser la spirale négative, la sylviculture du bouleau doit se mettre en place simultanément à la réceptivité des entreprises et des consommateurs pour les produits à base de bouleau. Cette action est urgente, car :

- il y a dès aujourd'hui des parcelles forestières en régénération après coupe rase, qui pourraient bénéficier d'une boulaie transitoire entre deux révolutions de peuplements résineux, par exemple, ou incorporer le bouleau dans un mélange. De nombreux forestiers sont en demande de connaissances sur la façon de conduire de nouvelles essences d'avenir ;
- chaque année perdue sans sylviculture voit disparaître la possibilité de former des grumes de bouleau de haute qualité dans bon nombre de jeunes peuplements : une saison de végétation suffit au bouleau pour réduire sa

capacité de réaction au détournage, mais aussi pour que ses branches deviennent trop grosses que pour pouvoir être élaguées.

Pour pouvoir donner au bouleau sa place méritée d'essence d'avenir pour la gestion forestière, une action du monde politique est nécessaire car :

- la formation des professionnels doit être renforcée ;
- les incitants financiers pour encourager les propriétaires à gérer durablement leurs parcelles doivent être accompagnés de l'encadrement spécifique. L'utilisation accrue de la régénération naturelle, la bonne conduite d'un mélange d'essences, et la production de bois de haute qualité demandent de réelles compétences sylvicoles. Le bouleau est un des piliers de cette nouvelle gestion : il agit comme une espèce parapluie (Roberge *et al.*, 2004), du point de vue de son rôle pour la biodiversité, mais aussi en quelque sorte pour la gestion forestière étant donné qu'il domine presque toujours les régénérations naturelles et qu'il peut être associé à une multitude de peuplements diversifiés ;
- le cadre légal doit être assoupli pour permettre les scénarios sylvicoles liés au bouleau. Par exemple, les codes forestiers et certaines certifications interdisent les coupes rases ou les limitent à une certaine surface, dont le seuil est généralement plus faible en feuillu qu'en résineux. Cela pourrait freiner la conduite de boulaies transitoires entre des révolutions résineuses.

3.2 Recherche et développement

Il est nécessaire d'approfondir les connaissances en matière de sylviculture et de valorisation du bouleau, notamment par :

- le suivi à long terme des dispositifs expérimentaux installés, surtout les plus jeunes, pour mieux comprendre le maintien (ou la perte) de potentiel d'accroissement diamétrique. Ce suivi sera pris en charge par la CARE « *Forest is Life* » de Gembloux Agro-Bio Tech ;
- l'étude du lien entre la productivité des bouleaux verruqueux et pubescent et la station, afin d'éventuellement ajuster leurs écogrammes respectifs (Figures 1.2 et 1.3 ; Petit *et al.*, 2017), d'autant plus en regard du changement climatique. Cela permettrait d'identifier les stations où la sylviculture pour la production de grumes de haute qualité est peut-être inappropriée en raison d'une croissance trop faible ou si le changement climatique pourrait y menacer sa survie avant qu'il n'atteigne une dimension commerciale. Des mémoires de fin d'étude sont en cours à ce sujet ;
- la multiplication des dispositifs expérimentaux pour alimenter le jeu de données et améliorer les connaissances sur l'accroissement diamétrique du bouleau verruqueux en fonction de son âge, de l'âge du premier détournage, de sa vigueur au départ, et de la station. Le bouleau pubescent pourrait également être intégré à cette recherche. La CARE « *Forest is Life* » de

Gembloux Agro-Bio Tech vient d'installer 2 nouveaux dispositifs expérimentaux de détourage, un en bouleau verruqueux et un en bouleau pubescent. Le développement de la sylviculture du bouleau offrira également des opportunités de peuplements à mesurer.

Pour aider le praticien, il faudrait récolter suffisamment de données pour produire un modèle d'accroissement diamétrique capable de répondre à cette question : « sur une station donnée, selon la hauteur dominante ou l'âge du bouleau, pour un objectif de diamètre de grume à un âge donné, quel devrait être le diamètre minimum des AO avant de débiter les détourages ? ». Il faudrait également pouvoir décrire, de façon simple et objective, le protocole optimal de détourage.

Enfin, il faudrait mettre sur pied des groupes de travail et des collaborations entre les scientifiques, les forestiers et l'industrie du bois, afin de pouvoir intégrer les connaissances empiriques de façon formelle et objective, et suffisamment complète et riche.

Pour l'industrie du bois spécifiquement, il faudrait :

- développer les procédés de transformation : CLT, GLT, traitement thermique du bois, *etc.* L'industrie pourra en outre s'appuyer sur l'expérience de l'Europe du Nord et des Pays baltes ;
- inclure le bouleau dans les normes pour permettre son utilisation dans la construction et en architecture.

5. Conclusion

Nous avons réalisé une analyse, exploratoire mais riche d'enseignements, sur le potentiel du bouleau pour la gestion forestière et l'industrie du bois dans le contexte climatique et socio-économique changeant de l'Europe occidentale.

Le bouleau colonise naturellement les trouées forestières sous forme de peuplement souvent monospécifique, pour ensuite laisser la place à d'autres essences. Il s'installe aussi spontanément dans les jeunes plantations et régénérations naturelles d'autres essences, offrant des opportunités de mélange. Il possède les qualités requises pour être considéré comme une essence forestière d'avenir. Il est en effet très intéressant du point de vue autécologique, pour ses fonctions écologiques et sylvicoles au service des autres essences, et son bois peut être valorisé par l'industrie, notamment en bois d'œuvre. Le bouleau s'inscrit pleinement dans la diversification forestière en essences, à l'échelle du massif forestier et du peuplement, et dans les sylvicultures.

L'analyse permet aux décideurs concernés (propriétaires et gestionnaires forestiers, industriels du bois, politiciens, naturalistes, *etc.*) d'évaluer la pertinence de l'utilisation du bouleau selon leurs besoins. Ils pourront identifier des solutions basées sur les atouts du bouleau, limiter les conséquences de ses faiblesses par des actions appropriées, exploiter les opportunités et transformer les menaces en perspectives.

Les données ont permis de cibler des orientations sylvicoles sur la manière de produire du bois d'œuvre de bouleau de haute qualité à partir de la ressource de moins de 9-12 ans, d'estimer le type de grume qui pourrait être produit, et de fixer des recommandations générales pour la sylviculture du bouleau selon le contexte et les objectifs.

Depuis quelques années, la résilience des forêts est au centre d'un nombre croissant de conférences, à portée internationale ou locale, à destination de publics scientifiques ou professionnels. Des primes et labels encouragent les forestiers à former des peuplements mélangés, et les entreprises et consommateurs à s'appuyer sur des matières premières locales. Les résultats de la thèse peuvent informer et orienter les personnes intéressées par les apports possibles du bouleau, mais aussi susciter de l'intérêt chez celles qui excluaient tout potentiel sylvicole ou économique pour cette essence. Ils aboutissent, en complément du doctorat, à un guide technique sur les sylvicultures du bouleau. La vulgarisation auprès des praticiens donne un intérêt concret à cette recherche. L'application des perspectives est indispensable pour que le bouleau puisse pleinement exprimer ses atouts. Aussi, cette recherche ouvre plusieurs voies pour des analyses scientifiques complémentaires.

Nous espérons que cette étude permettra d'offrir un nouvel essor à cette essence remarquable, le bouleau.



Références

- Abegg, M., Brändli, U.-B., Cioldi, F., Fischer, C., Herold-Bonardi, A., Huber, M., Keller, M., Meile, R., Rösler, E., Speich, S., Traub, B., Vidondo, B., 2014. *Quatrième inventaire forestier national suisse - tableaux et cartes des résultats de l'IFN 2009-2013 (IFN4b)*. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL. (<http://www.lfi.ch/resultate/>: disponible en septembre 2016)
- Ahmad, W.; Kuitunen, S.; Borrega, M.; Alopaeus, V., 2016. Physicochemical Modelling for Hot Water Extraction of Birch Wood. *Ind. Eng. Chem. Res.* **55**, 11062–11073
- Altman, J.; Fibich, P.; Santruckova, H.; Dolezal, J.; Stepanek, P.; Kopacek, J.; Hunova, I.; Oulehle, F.; Tumajer, J.; Cienciala, E., 2017. Environmental factors exert strong control over the climate-growth relationships of *Picea abies* in Central Europe, *Science of The Total Environment* **609**, 506-516,
- Araminienė, V., 2014. Varnagirytė-Kabašinskienė, I. Research on birch species in Lithuania: A review study. *Res. Rural Dev.* **2**, 50–56.
- Área de Inventario y Estadísticas Forestales, 2011. *Tablas Resumen Nacional del Tercer Inventario Forestal Nacional. Las Especies Arboreas en el IFN*. Dirección General de Medio Natural y Política Forestal. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (http://origin.magrama.gob.es/en/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/tablas_resumen_IFN3.aspx : disponible en septembre 2016)
- Ascoli, D; Bovio, G., 2010. Tree encroachment dynamics in heathlands of Northwest Italy: The fire regime hypothesis. *iForest* **3**, 137–143
- Aspelmeier, S.; Leuschner, C., 2004. Genotypic variation in drought response of silver birch (*Betula pendula*): Leaf water status and carbon gain. *Tree Physiol.* **24**, 517–528
- Atkinson, M.D., 1992. *Betula pendula* Roth (*B. verrucosa* Ehrh.) and *B. pubescens* Ehrh. *J. Ecol.* **80**, 837–870
- Baar, F., 2008. Sylviculture d'arbres-objectif en hêtre et chêne : retours du terrain. *Forêt Wallonne* **97**, 39-56
- Baar, F., 2010. *Synthèse de réflexions sur la sylviculture d'arbres-objectif en peuplement irrégulier ou équienne, mélangé ou non*, DGARNE, Liège, Belgique, 45 p
- Badeau, V.; Dupouey, J.L.; Cluzeau, C.; Drapier, J.; Le Bas, C., 2004. Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle des grandes essences forestières françaises. In Rapport final du projet CARBOFOR « Séquestration de carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France » (éd. D. Lousteau), Bordeaux-Pierroton : INRA, 101-113
- Beggs, P.J., 2004. Impacts of climate change on aeroallergens: Past and future. *Clin. Exp. Allergy* **34**, 1507–1513
- Berthold, D.; Meinschmidt, P.; Ritter, N., 2017. Hardwood processing in Germany – Challenges and opportunities for the wood based panel industry. In Proceedings of the 6th International Scientific Conference on Hardwood

- Processing, Lahti, Finland, September 25 to 28, 2017; Möttönen, V., Heinonen, E., Eds.; Natural Resources Institute Finland, Helsinki, Finland, 97–108
- Bigot, M., 2000. Des sylvicultures pour la production de bouleau en France. *Informations forêt* **4**, 1–6
- Bilek, B.; Wawer, J.; Szwerc, W.; Słowik, K.; Sosnowski, S., 2018. Birch sap concentrate as a potential modern food product. *Econtechmod Int. Q. J. Econ. Technol.* **7**, 5–9
- Blossfeld, O.; Koroll, U.; Mette, H.-J.; Wonka, R.; Giefing, D., 1981. Untersuchungen zur Qualität und Verwendung der Holzart Birke. *Holztechnologie* **22**, 77–79
- Boedts, M., 2016. *Effet du Traitement Thermique sur les Propriétés Physico-Mécaniques et la Durabilité du Bois de Bouleau*. Master's Thesis, Université de Liège Gembloux Agro-Bio Tech, Gembloux, Belgium, p. 74
- Bollmus, S.; Gellerich, A.; Schlotzhauer, P.; Behr, G.; Militz, H., 2017. Hardwood research at the Georg-August University of Goettingen. In Proceedings of the 6th International Scientific Conference on Hardwood Processing, Lahti, Finland, 25–28 September 2017; Möttönen, V., Heinonen, E., Eds.; Natural Resources Institute Finland: Helsinki, Finland, 116–122
- Bonaventura, S.; von Hofen, D., 2016. Wertholzperspektiven im Biosphärenwald, HOMBURG1, <http://homburg1.de/wertholzperspektiven-im-biosphaerenwald-10909press> article May 13, 2016, Homburg, Germany. Available online: / (disponible le 20/01/2022)
- Bormann, B.T.; Darbyshire, R.L.; Homann, P.S.; Morrisette, B.A.; Little, S.N., 2015. Managing early succession for biodiversity and long-term productivity of conifer forests in southwestern Oregon. *For. Ecol. Manag.* **340**, 114–125
- Boruvka, V.; Zeidler, A.; Holecek, T.; Dudík, R., 2018. Elastic and Strength Properties of Heat-Treated Beech and Birch Wood. *Forests* **9**, 197
- Boruvka, V.; Dudík, R.; Zeidler, A.; Holecek, T., 2019. Influence of Site Conditions and Quality of Birch Wood on Its properties and Utilization after Heat Treatment. Part I—Elastic and Strength Properties, Relationship to Water and Dimensional Stability. *Forests* **10**, 189
- Bossuyt, B.; Deckers, J.; Hermy, M., 1999. A field methodology for assessing man-made disturbance in forest soils developed in loess. *Soil Use and Management* **15**, 14-20
- Brändli, U.-B. (Réd.), 2010. *Inventaire forestier national suisse. Résultats du troisième inventaire 2004–2006*. Birmensdorf, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL. Berne, Office fédéral de l'environnement, OFEV, 312 p
- Brandtberg, P.-O.; Lundkvist, H.; Bengtsson, J., 2000. Changes in forest-floor chemistry caused by a birch admixture in Norway spruce stands. *For. Ecol. Manag.* **130**, 253–264
- Brang, P.; Spathelf, P.; Larsen, J. B.; Bauhus, J.; Boncina, A.; Chauvin, C.; Drössler, L.; Garcia-Güemes, C.; Heiri, C.; Kerr, G.; Lexer, M. J.; Mason, B.; Mohren, F.; Mühlethaler, U.; Nocentini, S.; Svoboda, M., 2014. Suitability of close-to-

- nature silviculture for adapting temperate European forests to climate change. *Forestry*, 87, 492–503
- Branquart, E.; Liégeois, S., 2005. *Normes de Gestion pour Favoriser la Biodiversité Dans les Bois Soumis au Régime Forestier (Complément à la Circulaire n°2619)*. Ministère de la Région Wallonne, Direction Générale des Ressources Naturelles et de l'Environnement: Jambes, Belgium, 84 p
- Burgess, M.D.; Bellamy, P.E.; Gillings, S.; Noble, D.G.; Grice, P.V.; Conway, G.J., 2015. The impact of changing habitat availability on population trends of woodland birds associated with early successional plantation woodland. *Bird Study* **62**, 39–55
- Cameron, A. D.; Dunham, R. A.; Petty, J. A., 1995. The effects of heavy thinning on stem quality and timber properties of silver birch (*Betula pendula* Roth). *Forestry* **68**, 275-285
- Cameron, A.D., 1996. Managing birch woodlands for the production of quality timber. *Forestry* **69**, 357–371
- Castagneri, D.; Nola, P.; Motta, R.; Carrer M., 2014. Summer climate variability over the last 250 years differently affected tree species radial growth in a mesic *Fagus-Abies-Picea* old-growth forest, *For. Ecol. Manag.* **320**, 21-29
- Castagneyrol, B.; Giffard, B.; Péré, C.; Jactel, H., 2013. Plant apparency, an overlooked driver of associational resistance to insect herbivory. *J. Ecol.* **101**, 418–429
- Castagneyrol, B.; Régolini, M.; Jactel, H., 2014. Tree species composition rather than diversity triggers associational resistance to the pine processionary moth. *Basic Appl. Ecol.* **15**, 516–523
- Caurla, S.; Delacote, P.; Lecocq, F.; Barthès, J.; Barkaoui, A., 2013. Combining an inter-sectoral carbon tax with sectoral mitigation policies: Impacts on the French forest sector. *J. For. Econ.* **19**, 450–461
- Chuhina, I.G.; Bagmet, L.V.; 2007a. Interactive Agricultural Ecological Atlas of Russia and Neighboring Countries. Economic Plants and their Diseases, Pests and Weeds. Range of distribution of *Betula pendula* Roth. (Silver birch, weeping birch). [Online]. Available at: http://www.agroatlas.ru/en/content/related/Betula_pendula/map/
- Chuhina, I.G.; Bagmet, L.V., 2007b. Interactive Agricultural Ecological Atlas of Russia and Neighboring Countries. Economic Plants and their Diseases, Pests and Weeds. Range of distribution of *Betula pubescens* Ehrh. (Downy birch, white birch). [Online]. Available at: http://www.agroatlas.ru/en/content/related/Betula_pubescens/map/
- CICES, 2018. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) Guidance on the Application of the Revised Structure (No. V5.1.).
- Cinotti, B., 1996. Évolution des surfaces boisées en France : proposition de reconstitution depuis le début du XIXe siècle, *Rev. For. Fr.* **48**(6), 547-562
- Claessens, H.; Perin, J.; Latte, N.; Lecomte, H.; Brostaux, Y., 2010b. Une chênaie n'est pas l'autre : analyse des contextes sylvicoles du chêne en forêt wallonne, *Forêt.Nature* **108**, 3-18

- Cole, W. G.; Lorimer, C. G.; 1994. Predicting tree growth from crown variables in managed northern hardwood stands. *For. Ecol. Manag.* **67**, 159-175
- Colson, V., 2009. *La fonction récréative des massifs forestiers wallons : analyse et évaluation dans le cadre d'une politique forestière intégrée* (Thèse de doctorat). Gembloux, Faculté universitaire des Sciences agronomiques, 277 p.
- Contreras, M. A.; Affleck, D.; Chung, W., 2011. Evaluating tree competition indices as predictors of basal area increment in western Montana forests, *For. Ecol. Manag.* **262**, 1939–1949
- Cornes, R.C.; van der Schrier, G.; van den Besselaar, E.J.M.; Jones, P.D.; 2018. An ensemble version of the E-OBS temperature and precipitation data sets. *J. Geophys. Res. Atmos.* **123**(17), 9391–9409
- Curt, T.; Prévosto, B., 2003. Rooting strategy of naturally regenerated beech in Silver birch and Scots pine woodlands. *Plant Soil* **255**, 265–279
- Damien, M.; Jactel, H.; Meredieu, C.; Régolini, M.; van Halder, I.; Castagneyrol, B., 2016. Pest damage in mixed forests: Disentangling the effects of neighbor identity, host density and host apparency at different spatial scales. *For. Ecol. Manag.* **378**, 103–110
- de Champs, J., 1987. Mesures sylvicoles préventives. *Rev. For. Fr.* **39**, 313-322
- Degen, T.; Devillez, F.; Jacquemart, A.-L., 2006. Influence des trouées sur la diversité végétale en hêtraie. Cas d'une hêtraie dans les Vosges du Nord. *Forêt Wallonne* **81**, 8-14
- De Jaegere, T.; Hein, S.; Claessens, H., 2016. A Review of the Characteristics of Small-Leaved Lime (*Tilia cordata* Mill.) and Their Implications for Silviculture in a Changing Climate, *Forests* **7**(56), 21p
- Delhaise, C.; Devillez, F., 1991. « Histoire de la forêt wallonne face à l'agriculture. Des origines à nos jours », *Forêt Wallonne* **13**, 2-12
- De Schrijver, A.; Nachtergale, L.; Staelens, J.; Luyssaert, S.; De Keersmaecker, L., 2004. Comparison of throughfall and soil solution chemistry between a high-density Corsican pine stand and a naturally regenerated silver birch stand. *Environ. Pollut.* **131**, 93–105
- De Schrijver, A.; Geudens, G.; Wuyts, K.; Staelens, J.; Gielis, L.; Verheyen, K., 2009. Nutrient cycling in two continuous cover scenarios for forest conversion of pine plantations on sandy soil. I. Nutrient cycling via aboveground tree biomass. *Can. J. For. Res.* **39**, 441–452
- De Silva, H.; Green, S.; Woodward, S., 2008. Incidence and severity of dieback in birch plantings associated with *Anisogramma virgultorum* and *Marssonina betulae* in Scotland. *Plant Pathol.* **57**, 272–279
- Decocq, G., 2001. Echelles des processus écologiques, échelles de mesure de la biodiversité et échelles de gestion en milieu forestier. *Rev. For. Fr.* **53**, 43-49
- Denman, S.; Brown, N.; Kirk, S.; Jeger, M.; Webber, J., 2014. A description of the symptoms of Acute Oak Decline in Britain and a comparative review on causes of similar disorders on oak in Europe. *Forestry* **87**, 535–551

- Diéguez-Aranda, U.; Grandas-Arias, J.A.; Álvarez-González, J.G.; Gadow, K.V., 2006. Site quality curves for birch stands in north-western Spain. *Silva Fenn.* **40**, 631–644
- Dmuchowski, W.; Gozdowski, D.; Bragoszewska, P.; Baczewska, A.H.; Suwara, I., 2014. Phytoremediation of zinc contaminated soils using silver birch (*Betula pendula* Roth). *Ecol. Eng.* **71**, 32–35
- Dodet, M.; Collet, C., 2012. When should exotic forest plantation tree species be considered as an invasive threat and how should we treat them? *Biological Invasions* **14**, 1765–1778
- Dubois, H.; Latte, N.; Lecomte, H.; Claessens, H.; 2016. Le bouleau, une essence qui s'impose. Description de la ressource dans son aire de distribution. *Forêt.Nature* **140**, 44–58
- Dubois, H.; Latte, N.; Claessens, H., 2017a. Les peuplements à bouleau en forêt wallonne : reflet de la sylviculture du 20ème siècle. *Forêt.Nature* **142**, 56–66
- Dubois, H.; Layon, J.; Claessens, H., 2017b. Curiosité: Le «curly birch». Une figuration onquée, rare et recherchée du bois de bouleau. *For. Nat.* **145**, 12–1
- Dubois, H.; Verkasalo, E.; Claessens, H., 2020. Potential of Birch (*Betula pendula* Roth and *B. pubescens* Ehrh.) for Forestry and Forest-Based Industry Sector within the Changing Climatic and Socio-Economic Context of Western Europe. *Forests* **11**(336), 26p
- Dubois, H.; Claessens, H.; Ligot, G., 2021. Towards silviculture guidelines to produce large-sized silver birch (*Betula pendula* Roth) logs in Western Europe. *Forests* **12**(599), 14p
- Dubois, H.; Layon, J.; Claessens, H., 2022. *Sylviculture novatrice d'une essence remarquable, le bouleau*. Éditions Forêt.Nature (parution en automne 2022)
- Dudelis, J., 2013. *Development of Stratified Spruce-Birch Stands in Latvia*. Master's Thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Alnarp, Sweden, 42p
- Dufrêne, M.; Delescaille, L.M., 2005 (Eds). La typologie WalEUNIS des biotopes wallons, version 1.0. (disponible sur <http://biodiversite.wallonie.be>)
- Duncker, P. S.; Raulund-Rasmussen, K.; Gundersen, P.; Katzensteiner, K.; De Jong, J.; Ravn, H. P.; Smith, M.; Eckmüllner, O.; Spiecker, H., 2012. How forest management affects ecosystem services, including timber production and economic return: synergies and trade-offs. *Ecology and Society* **17**(4), 17p
- Dyderski, M. K.; Paż, S.F; Frelich, L. E.; Jagodziński, A. M., 2018. How much does climate change threaten European forest tree species distributions? *Glob Change Biol.* **24**, 1150-1163
- Dzwonko, Z.; Loster, S.; Gawronski, S., 2015. Impact of fire severity on soil properties and the development of tree and shrub species in a Scots pine moist forest site in southern Poland. *For. Ecol. Manag.* **342**, 56–63
- Ehrhart, T.; Brandner, R.; Schickhofer, G.; Frangi, A., 2015. Rolling Shear Properties of some European Timber Species with Focus on Cross Laminated Timber (CLT): Test Configuration and Parameter Study. In Proceedings of the 2nd Meeting of the International Network on Timber Engineering Research,

- Šibenik, Croatia, 24–27 August 2015; Görlacher, R., Ed.; Timber Scientific Publishing, KIT Holzbau und Baukonstruktionen: Karlsruhe, Germany, 61–76
- Ekström, H., 1987. *Lövvirke-Tillgångar och Industriell Användning; Summary: Hardwood-Supplies and industrial utilization*; Swedish University of Agriculture Sciences, Department of Forest Products, Uppsala, Sweden: Volume 197, 123p
- Ellenberg, H., 1996. *Vegetation Mitteleuropas Mit Den Alpen in Ökologischer, Dynamischer Und Historischer Sicht*; Stark veränd. u. verb. Aufl.; Stuttgart: Ulmer, Germany, 1095p
- Ellis, T.M.; Betts, M.G., 2011. Bird abundance and diversity across a hardwood gradient within early seral plantation forest. *For. Ecol. Manag.* **261**, 1372–1381
- Ellis, T.M.; Kroll, A.J.; Betts, M.G., 2012. Early seral hardwood vegetation increases adult and fledgling bird abundance in Douglas-fir plantations of the Oregon Coast Range, USA. *Can. J. For. Res.* **42**, 918–933
- Emmer, I.M.; Fanta, J.; Kobus, A.T.; Kooijman, A.; Sevinck, J., 1998. Reversing borealization as a means to restore biodiversity in Central-European mountain forests—An example from the Krkonose Mountains, Czech Republic. *Biodivers. Conserv.* **7**, 229–247
- Eriksson, H.; Johansson, U.; Kiviste, A., 1997. A site-index model for pure and mixed stands of *Betula pendula* and *Betula pubescens* in Sweden. *Scand. J. For. Res.* **12**, 149–156
- EUFORGEN, 2009. Distribution map of silver birch (*Betula pendula*). [Online]. Available at:
http://www.euforgen.org/fileadmin/templates/euforgen.org/upload/Documents/Maps/PDF/Betula_pendula.pdf
- European Network for Rural Development, 2010. Forestry Measures in the 2007–2013 Rural Development Programmes. NRN Joint Thematic Initiative on Forestry, December 2010 (<http://enrd.ec.europa.eu/enrd-static/fms/pdf/FC89EC44-AA25-C8F5-2A34-C42C0ADC1CD6.pdf>, disponible le 20/01/2022)
- Fahlvik, N.; Agestam, E.; Nilsson, U.; Nyström, K., 2005. Simulating the influence of initial stand structure on the development of young mixtures of Norway spruce and birch. *For. Ecol. Manag.* **213**, 297–311
- Falk, W.; Hempelmann, N., 2013. Species Favourability Shift in Europe due to Climate Change: A Case Study for *Fagus sylvatica* L. and *Picea abies* (L.) Karst. Based on an Ensemble of Climate Models, *Journal of Climatology* **2013**, 18p
- Felton, A.; Lindbladh, M.; Brunet, J.; Fritz, Ö., 2010. Replacing coniferous monocultures with mixed-species production stands: An assessment of the potential benefits for forest biodiversity in northern Europe. *For. Ecol. Manag.* **260**, 939–947

- Felton, A.; Andersson, E.; Ventorp, D.; Lindbladh, M., 2011. A comparison of avian diversity in spruce monocultures and spruce–birch polycultures in southern Sweden. *Silva Fenn.* **45**, 1143–1150
- Felton, A.; Gustafsson, L.; Roberge, J.-M.; Ranius, T.; Hjältén, J.; Rudolphi, J.; Lindbladh, M.; Weslien, J.; Rist, L.; Brunet, J.; Felton, A.M., 2016. How climate change adaptation and mitigation strategies can threaten or enhance the biodiversity of production forests: Insights from Sweden. *Biological Conservation* **194**, 11–20
- Ferreira, O.R.; Jiménez, M.C., 2003. Estrategia reproductiva del abedul frente a los incendios forestales en Galicia (Birch reproductive strategy against forest fires in Galicia). *Cuad. Soc. Esp. Cien. For.* **15**, 171–176
- Forest Service of Ireland 2013 - Department of Agriculture, Food and the Marine, 2013. The Second National Forest Inventory. Republic of Ireland. Results Covering the National Forest Inventory, 2009 to 2012. Departmenture, Food and the Marine. Ireland. 265 p
(https://www.agriculture.gov.ie/media/migration/forestry/nationalforestinventory/2012/NFI%20Ireland%20Results_v12%20V%20Final.pdf disponible en septembre 2016)
- Fournier, M.; Bonnesoeur, V.; Deleuze, C.; Renaud, J.-P.; Legay, M.; Constant, T.; Moulia, B., 2015. Pas de vent, pas de bois. L’apport de la biomécanique des arbres pour comprendre la croissance puis la vulnérabilité aux vents forts des peuplements forestiers, *Rev. For. Fr.* **67**(3), 213-237
- Frauendorfer, R., 1954. *Forstliche Hilfstafeln Schriftenreihe der forstlichen Bundes-Versuchsanstalt Mariabrunn Band II*. Kommissionsverlag der Österreichischen Staatsdruckerei: Wien, Austria, 168 p
- Frei, T.; Gassner, E., 2008. Climate change and its impact on birch pollen quantities and the start of the pollen season an example from Switzerland for the period 1969–2006. *Int. J. Biometeorol.* **52**, 667–674
- Gill, J. A.; Davy, A., J, 1983. Variation and polyploidy within lowland populations of the *Betula Pendula/B.Pubescens* complex, *New Phytol.* **94**, 433-451
- Global Forest Resource Assessment 2015. Country Reports. Available online: <http://www.fao.org/forest-resources-assessment/en/>
- Gobakken, T., 2000. Models for Assessing Timber Grade Distribution and Economic Value of Standing Birch Trees. *Scand. J. For. Res.* **15**, 570–578
- Gomez-Garcia, E.; Crecente-Campo, F.; Tobin, B.; Hawkins, M.; Nieuwenhuis, M.; Dieguez-Aranda, U., 2014. A dynamic volume and biomass growth model system for even-aged downy birch stands in south-western Europe. *Forestry* **87**, 165–176
- Green, S.; MacAskill, G.A., 2007. Pathogenicity of *Marssonina betulae* and other fungi on birch. *Plant Pathol.* **56**, 242–250
- Günzl, L. 1989 Hat die Birke Zukunft? *Österreichische Forstztg.* **11**, 45–47

- Günzl, L.; Krames, U.; Krenn, K.; Hruschka, A.; Neugebauer, A., 1986 *Beurteilung der Eigenschaften von Birken österreichischer Herkunft*; Bericht 1984/85; Österreichisches Holzforschungs Institut Wien: Wien, Austria
- Hakkila, P.; Verkasalo, E., 2009. Structure and properties of wood and woody biomass. In *Forest Resources and Sustainable Management*; Kellomäki, S., Ed.; Paper Engineers' Association: Helsinki, Finland, 133-215.
- Hamrick, J.L., 2004. Response of forest trees to global environmental changes. *For. Ecol. Manage.* **197**, 323–335
- Hanewinkel, M.; Cullmann, D. A.; Michiels, H.-G.; Kändler, G., 2014. Converting probabilistic tree species range shift projections into meaningful classes for management. *Journal of Environmental Management* **134**, 153-165
- Hansson, K.; Olsson, B.A.; Olsson, M.; Johansson, U.; Kleja, D.B., 2011. Differences in soil properties in adjacent stands of Scots pine, Norway spruce and silver birch in SW Sweden. *For. Ecol. Manag.* **262**, 522–530
- Hansson, K.; Froberg, M.; Helmisaari, H.-S.; Kleja, D.B.; Olsson, B.A.; Olsson, M.; Persson, T., 2013. Carbon and nitrogen pools and fluxes above and below ground in spruce, pine and birch stands in southern Sweden. *For. Ecol. Manag.* **309**, 28–35
- Hao, G.-D.; Zheng, Y.; Wang, Z.; Kong, X.; Song, Z.; Lai, X.; Spangfort, M.D., 2016. High correlation of specific IgE sensitization between birch pollen, soy and apple allergens indicates pollen-food allergy syndrome among birch pollen allergic patients in northern China. *J Zhejiang Univ. Sci. B (Biomed. Biotechnol.)* **17**, 399–404
- Härkönen, S.; Pulkkinen, A.; Heräjärvi, H., 2009. Wood quality of birch (*Betula* spp.) trees damaged by moose. *ALCES* **45**, 67–72
- Harmer, R.; Morgan, G.; Beauchamp, K., 2011. Restocking with broadleaved species during the conversion of *Tsuga heterophylla* plantations to native woodland using natural regeneration. *Eur. J. For. Res.* **130**, 161–171
- Hassegawa, M.; Stevanovic, T.; Achim, A., 2016. Relationship between ethanolic extractives of yellow birch and tree characteristics. *Ind. Crops Prod.* **94**, 1–8
- Hein, S.; Winterhalter, D.; Wilhelm, G.J.; Kohnle, U., 2009. Wertholzproduktion mit der Sandbirke (*Betula pendula* Roth): Waldbauliche Möglichkeiten und Grenzen. *Allg. For. Jagdztg.* **180**, 206–219
- Heiskanen, V., 1957. Raudus-ja hieskoivun laatu eri kasvupaikoilla. Summary: Quality of the common birch and the white birch on different sites. *Commun. Inst. For. Fenn.* **48**, 1–99.
- Hemery, G.E.; Savill, P.S.; Pryor, S.N., 2005. Applications of the crown diameter–stem diameter relationship for different species of broadleaved trees. *For. Ecol. Manag.* **215**, 285–294
- Hemery, G.E., 2008. Forest management and silvicultural responses to projected climate change impacts on European broadleaved trees and forests. *Int. For. Rev.* **10**, 591–606
- Hemery, G.E.; Clark, J.R.; Aldinger, E.; Claessens, H.; Malvoti, M.E.; O'Connor, E.; Raftoyannis, Y.; Savill, P.S.; Brus, R., 2010. Growing scattered

- broadleaved tree species in Europe in a changing climate: A review of risks and opportunities. *Forestry* **83**, 65–81
- Heräjärvi, H., 2002. Properties of birch (*Betula pendula*, *B. pubescens*) for sawmilling and further processing in Finland. *Finn. For. Res. Inst. Res. Pap.* **871**, 52.
- Hiltunen, E.; Pakkanen, T.T.; Alvila, L., 2004. Phenolic extractives from wood of birch (*Betula pendula*). *Holzforschung* **58**, 326–329
- Himpens, S.; Laurent, C.; Marchal, D.; et al., 2017. *Le changement climatique et ses impacts sur les forêts wallonnes. Recommandations aux décideurs, propriétaires et gestionnaires – Version 2017*. Ed.: Brieuc Quévy – Avenue Prince de Liège 15 – 5100 Jambes, 84p
- Huffel, G.; Ballu, J.-M.; Morin, G.-A., 2019. *Histoire des forêts françaises. De la Gaule chevelue à nos jours*, Centre National de la Propriété Forestière, Paris, France, 240 p
- Hynynen, J.; Niemistö, P.; Viherä-Aarnio, A.; Brunner, A.; Hein, S.; Velling, P., 2010. Silviculture of birch (*Betula pendula* Roth and *Betula pubescens* Ehrh.) in northern Europe. *Forestry* **83**(1), 103-119
- Hytönen, J.; Saramäki, J.; Niemistö, P., 2014. Growth, stem quality and nutritional status of *Betula pendula* and *Betula pubescens* in pure stands and mixtures. *Scand. J. For. Res.* **29**, 1–11
- IGN, 2013. Données de l’inventaire forestier national (<http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/spip.php?rubrique7> disponible en septembre 2016)
- IGN, 2020. Méthodologie, pour bien comprendre les résultats publiés 2015-2019. Paris, Institut National de l’information géographique et forestière, 39 p
- Iiomäki, S.; Nikinmaa, E.; Mäkelä, A., 2003. Crown rise due to competition drives biomass allocation in silver birch. *Canadian Journal of Forest Research*, **33**(12), 2395-2404
- Jacquemin, F.; Kervyn, T.; Branquart, E.; Delahaye, L.; Dufrière, M.; Claessens, H., 2014. Les forêts anciennes en Wallonie. 1ère partie : Concepts généraux. *Forêt Wallonne* B, 34-49
- Jactel, H.; Barbaro, L.; Battisti, A.; Bosc, A.; Branco, M.; Brockerhoff, E.; Castagnyrol, B.; Dulaurent, A.-M.; Hodar, J.A.; Jacquet, J.-S.; et al., 2015. Insect—Tree Interactions in *Thaumetopoea pityocampa*. In *Processionary Moths and Climate Change: An Update*; Roques, A., Ed.; Springer: Dordrecht, The Netherland, 265–310
- Jeitler, G.; Augustin, M.; Schickhofer, G., 2016. Mechanical properties of glued laminated TIMBER and cross laminated TIMBER produced with the wood species birch. In *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering*, Vienna, Austria, 22–25 August 2016; Eberhardsteiner, J., Winter, W., Fadai, A., Pöll, M., Eds.; TU Verlag: Wien, Austria, 2016; 8 p
- Kaitaniemi, P.; Lintunen, A., 2010. Neighbor identity and competition influence tree growth in Scots pine, Siberian larch, and silver birch. *Ann. For. Sci.* **67**, 604–610

- Kanerva, S.; Smolander, A., 2007. Microbial activities in forest floor layers under silver birch, Norway spruce and Scots pine. *Soil Biol. Biochem.* **39**, 1459–1467
- Karlsson, M.; Nilsson, N.; Örländer, G., 2002. Natural Regeneration in Clear-cuts: Effects of Scarification, Slash Removal and Clear-cut Age. *Scand. J. For. Res.* **17**, 131–138
- Kasurinen, A.; Koikkalainen, K.; Anttonen, M.J.; Possen, B.; Oksanen, E.; Rousi, M.; Vapaavuori, E.; Holopainen, T., 2016. Root morphology, mycorrhizal roots and extramatrical mycelium growth in silver birch (*Betula pendula* Roth) genotypes exposed to experimental warming and soil moisture manipulations. *Plant Soil* **407**, 341–353
- Kelemen, K.; Mihók, B.; Gálhidy, L.; Standovár, T., 2012. Dynamic response of herbaceous vegetation to gap opening in a Central European beech stand. *Silva Fennica* **46**(1), 53–65
- Kennedy, C.E.J.; Southwood, T.R.E., 1984. The Number of Species of Insects Associated with British Trees: A Re-Analysis. *J. Anim. Ecol.* **53**, 455–478
- Kilpeläinen, H.; Lindblad, J.; Heräjärvi, H.; Verkasalo, E., 2011. Saw log recovery and stem quality of birch from thinnings in southern Finland. *Silva Fenn.* **45**, 267–282
- Kint, V.; Geudens, G.; Mohren, G.M.J.; Lust, N., 2006. Silvicultural interpretation of natural vegetation dynamics in ageing Scots pine stands for their conversion into mixed broadleaved stands. *For. Ecol. Manag.* **223**, 363–370
- Kleinschmit, A., 2017. The Broadeaf Citizen – Broadening the innovatice use of European hardwoods. In Proceedings of the 6th International Scientific Conference on Hardwood Processing, Lahti, Finland, September 25 to 28, 2017; Möttönen, V., Heinonen, E., Eds.; Natural Resources Institute Finland, Helsinki, Finland, 14–15.
- Klingeman, B.; Olivier, J.; Frank, H., 2001. Who's doin' all that chewin'? The European Hornet. *Tenn. Green Times* **2**, 34–36.
- Konôpka, B.; Pajtík, J.; Šebeň, V.; Merganičová, K.; Surový, P., 2020. Silver birch aboveground biomass allocation pattern, stem and foliage traits with regard to intraspecific crown competition, *Cent. Eur. For. J.* **66**, 11p
- Koski, V.; Rousi, M., 2005. A review of the promises and constraints of breeding silver birch (*Betula pendula* Roth) in Finland. *Forestry* **78**, 187–198
- Kozlov, M.V., 2008. Losses of birch foliage due to insect herbivory along geographical gradients in Europe: A climate-driven pattern? *Clim. Chang.* **87**, 107–117
- Kreyer, D.; Zerbe, S., 2006. Short-Lived Tree Species and Their Role as Indicators for Plant Diversity in the Restoration of Natural Forests. *Restor. Ecol.* **14**, 137–147
- Kucera, B., 1984. Björkevirkestes mekaniske, teknologikse og fysiske egenskaper. Norges Landbruksvidenskaplige Forskningsråd. *Sluttrapport* **500**, 20p
- Kula, E., 2008. The seasonal population dynamics of moth larvae feeding in birch stands of the Krusne Hory Mountains (The Czech Republic) from 1986–2004. *Ekologia (Bratislava)* **27**, 119–129

- Kumar, A.; Verkasalo, E., 2018. Current status and future implications of Finnish wood-based panel industries. In Proceedings of the 14th Annual Meeting of the Northern European Network for Wood Science and Engineering, 2–3 October 2018; Kallakas, H., Ed.; Tallinn University of Technology: Tallinn, Estonia, 123–126
- Kund, M.; Vares, A.; Sims, A.; Tullus, H.; Uri, V., 2010. Early growth and development of silver birch (*Betula pendula* Roth.) plantations on abandoned agricultural land. *Eur J Forest Res* **129**, 679–688
- Landgraf, M.; Langer, J.; Gröhner, J.; Zinnert, L.; Bandte, M.; von Bargaen, S.; Schreiner, M.; Jäckel, B.; Büttner, C., 2017. Viruserkrankungen im urbanen Grün—Eine Studie an Birken im Berliner Bezirk Steglitz-Zehlendorf. *Jahrb. Baumpflege* **21**, 327–332
- Lang, D. J.; Wiek, A.; Bergmann, M.; Stauffacher, M.; Martens, P.; Moll, P.; Swilling, M.; Thomas, C. J., 2011. Transdisciplinary research in sustainability science: practice, principles, and challenges, *Sustain Sci* **7**, 25–43
- Latte, N.; Lebourgeois, F.; Claessens, H., 2016a. Growth partitioning within beech trees (*Fagus sylvatica* L.) varies in response to summer heat waves and related droughts. *Trees* **30**(1), 189–201
- Latte, N.; Perin, J.; Lejeune, P., 2016b. Evolution récente des surface forestières et de la régénération des coupes rases en Wallonie. *For. Nat.* **141**, 46–51
- Latte, N.; Taverniers, P.; de Jaegere T.; Claessens, H., 2020. Dendroecological assessment of climate resilience of the rare and scattered forest tree species *Tilia cordata* Mill. in northwestern Europe, *Forestry*, 1–10
- Lavaud, F.; Fore, M.; Fontaine, J.-F.; Pérotin, J.M.; de Blay, F., 2014. Allergie au pollen de bouleau (Birch pollen allergy). *Rev. Mal. Respir.* **31**, 150–161
- Lehaire, F.; Ligot, G.; Morelle, K.; Lejeune, P., 2014. Les indicateurs de la pression du cerf élaphe sur la végétation du sous-bois en forêt feuillue tempérée (synthèse bibliographique). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* **18**, 262–272
- Lehnert, L.W.; Bassler, C.; Brandl, R.; Burton, P.J.; Muller, J., 2013. Conservation value of forests attacked by bark beetles: Highest number of indicator species is found in early successional stages. *J. Nat. Conserv.* **21**, 97–104
- Lemaire, J., 1998. *Contribution à l'étude de la sylviculture du Betula pendula Roth. La sylviculture du Betulla pendula Roth au Bois de Lauzelle (Louvain-la-Neuve)*. Master's Thesis, Université Catholique de Louvain, Louvain la-Neuve, Belgium, 175p
- Lemaire, J., 2000. Le bouleau : conduite et sylviculture, *Forêt entreprise* **136**, 25–29
- Lemaire, J., 2004. Culture d'arbre et détournage du bouleau verruqueux, *Forêt entreprise*, **159**, 14–18
- Leuschner, C., 2020. Drought response of European beech (*Fagus sylvatica* L.) - A review, *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* **47**, 22p
- Lindner, M.; Maroschek, M.; Netherer, S.; Kremer, A.; Barbati, A.; Garcia-Gonzalo, J.; Seidl, R.; Delzon, S.; Corona, P.; Kolström, M.; et al., 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *For. Ecol. Manag.* **259**, 698–709

- Lintunen, A., Kaitaniemi, P., 2010. Responses of crown architecture in *Betula pendula* to competition are dependent on the species of neighbouring trees. *Trees* **24**, 411–424
- Liziniwicz, M., 2009. *The Development of Beech in Monoculture and Mixtures*. Master's Thesis, Swedish University of Agricultural Science: Alnarp, Sweden, 47p
- Liziniwicz, M.; Andrzejczyk, T.; Drozdowski, S., 2016. The effect of birch removal on growth and quality of pedunculate oak in a 21-year-old mixed stand established by row planting. *For. Ecol. Manag.* **364**, 165–172
- Lundgren, L. N.; Pan, H.; Theander, O.; Eriksson, H.; Johansson, U.; Svenningsson, M., 1995. Development of a new chemical method for distinguishing between *Betula pendula* and *Betula pubescens* in Sweden, *Can. J. For. Res.* **25**(7)
- Luostarinen, K.; Verkasalo, E., 2000. Birch as Sawn Timber and in Mechanical Further Processing in Finland. A Literature Study. *Silva Fenn. Monogr.* **1**, 40p
- Lutter, R.; Tullus, A.; Kanal, A.; Tullus, T.; Vares, A.; Tullus, H., 2015. Growth development and plant–soil relations in midterm silver birch (*Betula pendula* Roth) plantations on previous agricultural lands in hemiboreal Estonia. *Eur. J. For. Res.* **134**, 653–667
- Maebe, L; Claessens, H; Dufrêne, M, 2019. The critical role of abiotic factors and human activities in the supply of ecosystem services in the ES matrix. *One Ecosystem* **4**, 33p
- Malcolm, D.C.; Worrell, R., 2001. Potential for the improvement of silver birch (*Betula pendula* Roth.) in Scotland. *Forestry* **75**, 439–453
- Maleki, K.; Kiviste, A.; Korjus, H., 2015. Analysis of Individual Tree Competition Effect on Diameter Growth of Silver Birch in Estonia. *Forest Systems* **24**(2), 13p
- Mantau, U.; saal, U.; Prins, K.; Steierer, F.; Lindner, M., 2010. *EUwood—Real potential for changes in growth and use of EU forests; Final report, June 2010*, EUwood: Hamburg, Germany, 160p
- Mauer, O.; Palatova, E., 2003. The role of root system in silver birch (*Betula pendula* Roth) dieback in the air-polluted area of Krušné hory Mts. *J. For. Sci.* **49**, 191–199
- Mazdi, R.A.; Mataji, A.; Fallah, A., 2021. Canopy gap dynamics, disturbances, and natural regeneration patterns in a beech-dominated Hyrcanian old-growth forest. *Baltic Forestry* **27**(1), 10p
- McLaughlin, J., 2000. Pathological effects and management implications. In *Proceedings for the Ecology and Management of White Birch Workshop*, Wawa, ON, Canada, 21–22 September 1999; Chen, H., Luke, A., Bidwell, W., Eds.; Queen's Printer for Ontario: Wawa, ON, Canada, 19–20
- Meng, S. X.; Rudnicki, M.; Lieffers, V. J.; Reid, D. B.; Silins, U., 2006. Preventing crown collisions increases the crown cover and leaf area of maturing lodgepole pine, *J. Ecol.* **94**, 681–686
- Messier, C.; Bauhus, J.; Doyon, F.; Maure, F.; Sousa-Silva, R.; Nolet, P.; Mina, M.; Aquilué, N.; Fortin, M.-J.; Puettmann, K., 2019. The functional complex

- network approach to foster forest resilience to global changes, *For. Ecosyst.* **16**(21)
- Messier, C.; Bauhus, J.; Sousa-Silva, R.; Auge, H.; Baeten, L.; Barsoum, N.; Bruelheide, H.; Caldwell, B.; Cavender-Bares, J.; Dhiedt, E.; Eisenhauer, N.; Ganade, G.; Gravel, D.; Guillemot, J.; Hall, J.S.; Hector, A.; Hérault, B.; Jactel, H.; Koricheva, J.; Kreft, H.; Mereu, S.; Muys, B.; Nock, C. A.; Paquette, A.; Parker, J. D.; Perring, M.P.; Ponette, Q.; Potvin, C.; Reich, P.B.; Scherer-Lorenzen, M.; Schnabel, F.; Verheyen, K.; Weih, M.; Wollni, M.; Clara Zemp, D., 2022 For the sake of resilience and multifunctionality, let's diversify planted forests!, *Conservation Letters* **15**(1), 8p
- Mitchell, R.J.; Campbell, C.D.; Chapman, S.J.; Osler, G.H.R.; Vanbergen, A.J.; Ross, L.C.; Cameron, C.M.; Cole, L., 2007. The cascading effects of birch on heather moorland: A test for the top-down control of an ecosystem engineer. *J. Ecol.* **95**, 540–554
- Mohr, D.; Simon, M.; Topp, W., 2004. Stand composition affects soil quality in oak stands on reclaimed and natural sites. *Geoderma* **129**, 45–53
- Möttönen, V.; Bütün, Y.; Heräjärvi, H.; Antikainen, J.; Marttila, J., 2015. Physical properties and dimensional stability after combined compression and thermal modification of birch and aspen lumber. In Proceedings of the 5th International Scientific Conference on Hardwood Processing, Québec City, QC, Canada, 15–17 September 2015; Achim, A., Blanchet, P., Schmitt, U., Bouffard, J.-F., Eds.; International academy of wood science: Québec City, QC, Canada, 147–154
- Möttönen, V.; Boren, H.; Heräjärvi, H., 2018. *Puun Ominaisuuksien Modifiointi: Menetelmät ja Tutkimuksen Tila*; Natural resources and bioeconomy studies 11/2018; Natural Resources Institute Finland (Luke): Helsinki, Finland 57p
- Mulenburg, V.L.; Herms, D.A., 2012. A Review of Bronze Birch Borer (*Coleoptera: Buprestidae*) Life History, Ecology, and Management. *Environ. Entomol.* **41**, 1372–1385
- Müller-Germann, I.; Vogel, B.; Vogel, H.; Pauling, A.; Fröhlich-Nowoisky, J.; Pöschl, U.; Després, V.R., 2015. Quantitative DNA Analyses for Airborne Birch Pollen. *PLoS ONE* **10**
- Naaf, T.; Wulf, M., 2007. Effects of gap size, light and herbivory on the herb layer vegetation in European beech forest gaps. *For. Ecol. Manag.* **244**, 141-149
- National Forest Inventory of Great Britain, 2011. (online: <http://www.forestry.gov.uk/inventory>)
- Netherer, S.; Pennerstorfer, J.; Matthews, B., 2019. Acute Drought Is an Important Driver of Bark Beetle Infestation in Austrian Norway Spruce Stands, *Front. For. Glob. Change* **2**(39), 21p
- Niemistö, P., 1991. Growing density and thinning models for *Betula pubescens* stands on peatlands in northern Finland. *Folia For.* **782**, 1–36
- Niemistö, P., Viherä-Aarnio, A., Velling, P., Heräjärvi, H., Verkasalo, E. (eds.), 2008. *Koivun kasvatusta ja käyttöä* (Silviculture and Use of Birch). Finnish Forest

- Research Institute and Metsäkustannus Ltd.: Metsäntutkimuslaitos ja Metsäkustannus, Finland, 254p
- Niemistö, P.; Kilpeläinen, H.; Heräjärvi, H., 2019. Effect of pruning season and tool on knot occlusion and stem discolouration in *Betula pendula*—Situation five years after pruning. *Silva Fenn.* **53**, 29p
- Noce, S.; Collalti, A.; Santini, M., 2017. Likelihood of changes in forest species suitability, distribution, and diversity under future climate: The case of Southern Europe, *Ecology and Evolution* **7**(22), 9358-9375
- Noirfalise, A., 1984. Forêts et Stations Forestières en Belgique; Les Presses Agronomiques: Gembloux, Belgium, 235p.
- Nurmi, J., 1997. Heating values of mature trees. *Acta For. Fenn.* **256**, 28p
- O'Hara, L.K., 2016. What is close-to-nature silviculture in a changing world? *Forestry* **89**, 1–6
- OEWB, 2020 Baromètre économique 2ème trimestre 2020 (disponible le 20/01/2022 : http://www.oewb.be/sites/default/files/contribue/202002_barometre_economique.pdf)
- OEWB 2021 Baromètre économique, édition spéciale prix des bois 2021 (disponible le 20/01/2022 : https://www.oewb.be/sites/default/files/media-documents/202002_Barom%C3%A8tre%20%C3%A9conomique_PDF.pdf)
- Pääkkönen, E.; Vahala, J.; Pohjola, M.; Holopainen, T.; Kärenlampi, L., 1998. Physiological, stomatal and ultrastructural ozone responses in birch (*Betula pendula* Roth.) are modified by water stress. *Plant Cell Environ.* **21**, 671–684
- Paillet, Y.; Debaive, N.; Archaux, F.; Cateau, E.; Gilg, O.; Guilbert, E., 2019. Nothing else matters? Tree diameter and living status have more effects than biogeoclimatic context on microhabitat number and occurrence: An analysis in French forest reserves, *PLoS ONE* **14**, 18p
- Panula, E.Y.; Fekedulegn, D.B.; Green, B.J.; Ranta, H., 2009. Analysis of Airborne *Betula* Pollen in Finland; a 31-Year Perspective. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **6**, 1706–1723
- Patterson, G., 1993. *The Value of Birch in Upland Forests for Wildlife Conservation*, Forestry Commission Bulletin No. 109; HMSO: London, UK, 34p
- Pecchi, M.; Marchi, M.; Moriondo, M.; Forzieri, G.; Ammoniaci, M.; Bernetti, I.; Bindi, M.; Chirici, G., 2020. Potential Impact of Climate Change on the Forest Coverage and the Spatial Distribution of 19 Key Forest Tree Species in Italy under RCP4.5 IPCC Trajectory for 2050s, *Forests* **11**(934), 19p
- Perala, D. A.; Alm, A. A., 1990. Reproductive Ecology of Birch: A Review, *For. Ecol. Manag.* **32**, 1-38
- Pesche, D., 2013. Le Millennium Ecosystem Assessment : anatomie d'une évaluation environnementale globale. *Natures Sciences Sociétés* **21**, 363-372.
- Petit, S.; Claessens, H.; Vincke, C.; Ponette, Q.; Marchal, D., 2017. Le Fichier écologique des essences, version 2.0. *Forêt.Nature* **143**, 12-19

- Piedallu, C.; Perez, V.; Gegout, J.-C.; Lebourgeois, F.; Bertrand, R., 2009. Impact potentiel du changement climatique sur la distribution de l'Epicéa, du Sapin, du Hêtre et du Chêne sessile en France. *Rev. For. Fr.* **61**, 567–593
- Pinheiro, J; Bates, D; DebRoy, S; Sarkar, D; R Core Team, 2017. nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-131. Available online: <https://CRAN.R-project.org/package=nlme> (disponible le 20/01/2022).
- Pommerening, A.; Murphy, S.T., 2004. A review of the history, definitions and methods of continuous cover forestry with special attention to afforestation and restocking. *Forestry* **77**, 27–44
- Possen, B.J.H.M.; Oksanen, E.; Rousi, M.; Ruhanen, H.; Ahonen, V.; Tervahauta, A.; Heinonen, J.; Heiskanen, J.; Kärenlampi, S.; Vapaavuori, E., 2011. Adaptability of birch (*Betula pendula* Roth) and aspen (*Populus tremula* L.) genotypes to different soil moisture conditions. *For. Ecol. Manag.* **262**, 1387–1399
- Possen, B.J.H.M.; Rousi, M.; Silfver, T.; Anttonen, M.J.; Ruotsalainen, S.; Oksanen, E.; Vapaavuori, E., 2014. Within-stand variation in silver birch (*Betula pendula* Roth) phenology. *Trees* **28**, 1801-1812
- Possen, B. J. H. M.; Rousi, M.; Keski-Saari, S.; Silfver, T.; Kontunen-Soppela, S.; Oksanen, E.; Mikola, J., 2021. New evidence for the importance of soil nitrogen on the survival and adaptation of silver birch to climate warming. *Ecosphere* **12**(5), 26p
- Prévosto, B; Agrech, G., 1998. Dynamique et typologie des accrus. Le cas des bétulaies dans la chaîne des Puys. *Rev. For. Fr.* **50**, 46-58
- Prévosto, B.; Coquillard, P.; Gueugnot, J., 1999. Growth models of silver birch (*Betula pendula* Roth.) on two volcanic mountains in the French Massif Central. *Plant Ecol.* **144**, 231–242
- Prévosto, B.; Curt, T., 2004. Dimensional relationships of naturally established European beech trees beneath Scots pine and Silver birch canopy. *For. Ecol. Manag.* **194**, 335–348
- Prévosto, B., 2005. Les indices de compétition en foresterie : exemples d'utilisation, intérêts et limites, *Rev. For. Fr.* **57**, 413-430
- Price, J.S.; Heathwaite, A.L.; Baird, A.J., 2003. Hydrological processes in abandoned and restored peatlands: An overview of management approaches. *Wetl. Ecol. Manag.* **11**, 65–83
- Priha, O.; Grayston, S.J.; Hiukka, R.; Pennanen, T.; Smolander, A., 2001. Microbial community structure and characteristics of the organic matter in soils under *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula pendula* at two forest sites. *Biol. Fertil. Soils* **33**, 17–24
- Pulsford, S.A.; Lindenmayer, D.B.; Driscoll, D.A., 2014. A succession of theories: Purging redundancy from disturbance theory. *Biol. Rev. Camb. Philos.* **91**(1), 148-167
- R Core Team, 2017. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Available online: <https://www.R-project.org/> (disponible le 20/01/2022)

- Rameau, J.C.; Mansion, D.; Dumé, G.; Timbal, J.; Lecointe, A.; Dupont, P.; Keller, R., 1994. *Flore forestière française – guide écologique illustré– Tome 1 : Plaines et collines*. Inst. pour le Développement Forestier, Paris, 1785p
- Randin, C.F.; Engler, R.; Normand, S.; Zappa, M.; Zimmermann, N.E.; Pearman, P.B.; Vittoz, P.; Thuillier, W.; Guisan, A., 2009. Climate change and plant distribution: Local models predict high-elevation persistence. *Glob. Chang. Biol.* **15**, 1557–1569
- Ranta, H.; Hokkanen, T.; Linkosalo, T.; Laukkanen, L.; Bondestam, K.; Oksanen, A., 2008. Male flowering of birch: Spatial synchronization, year-to-year variation and relation of catkin numbers and airborne pollen counts. *For. Ecol. Manag.* **255**, 643–650
- Rastogi, S.; Pandey, M.M.; Rawat, A.K.S., 2015. Medicinal plants of the genus *Betula*—Traditional uses and a phytochemical–pharmacological review. *J. Ethnopharmacol.* **159**, 62–83
- Reid, W.V.; Mooney, H.A.; Cropper, A.; Capistrano, D.; Carpenter, S.R.; Chopra, K.; Dasgupta, P.; Dietz, T.; Duraiappah, A.K.; Hassan, R.; *et al.*, 2005. *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Washington DC, USA: Island Press.
- Reimoser, F; Gossow, H., 1996. Impact of ungulates on forest vegetation and its dependence on the silvicultural system. *For. Ecol. Manag.* **88**, 107–119
- Renou-Wilson, F.; Pöllänen, M.; Byrne, K.; Wilson, D.; Farrell, E.P., 2010. The potential of birch afforestation as an after-use option for industrial cutaway peatlands. *Suo* **61**, 59–76
- Reyes, O.; Casal, M.; Trabaud, L., 1997. The influence of population, fire and time of dissemination on the germination of *Betula pendula* seeds. *Plant Ecol.* **133**, 201–208
- Richter, A., 2011. *Perspectives de Valorisation de la Ressource de bois D'œuvre Feuillus en France*. Direction générale des politiques agricole, agroalimentaire et des territoires—DGPAAT/FCBA: Paris, France, 83p
- Rizhikovs, J.; Zandersons, J.; Dobeles, G.; Paze, A., 2015. Isolation of triterpene-rich extracts from outer birch bark by hot water and alkaline pre-treatment or the appropriate choice of solvents. *Ind. Crops Prod.* **76**, 209–214
- Roberge, J.-M.; Angelstam, P., 2004. Usefulness of the Umbrella Species Concept as a Conservation Tool. *Conservation biology* **18**(1), 76-85
- Rock, J.; Puettmann, K.J.; Gockel, H.A.; Schulte, A., 2004. Spatial aspects of the influence of silver birch (*Betula pendula* L.) on growth and quality of young oaks (*Quercus* spp.) in central Germany. *Forestry* **77**, 235–247
- Roitto, M.; Siwale, W.; Tanner, J.; Ilvesniemi, H.; Julkunen-Tiitto, R.; Verkasalo, E., 2015. Characterization of Extractives in Tree Biomass and By-products of Plywood and Saw Mills from Finnish Birch in Different Climatic Regions for Value-added Chemical Products. In Proceedings of the 5th International Scientific Conference on Hardwood Processing, Québec City, QC, Canada, 15–17 September 2015; Achim, A., Blanchet, P., Schmitt, U., Bouffard, J.-F.,

- Eds.; International academy of wood science: Québec City, QC, Canada, 174–181
- Rojo, J.; Oteros, J.; Picornell, A.; Maya-Manzano, J. M.; Damialis, A.; Zink, K.; Werchan, M.; Werchan, B.; Smith, M.; Menzel, A.; Timpf, S.; Traidl-Hoffmann, C.; Bergmann, K.-C.; Schmidt-Weber, C. B.; Buters, J., 2021. Effects of future climate change on birch abundance and their pollen load, *Global Change Biology* **27**(22), 5934-5949
- Rondeux, J.; Lecomte, H., 2010. *Inventaire permanent des Ressources Forestières de Wallonie (IPRFW) - Guide méthodologique*. Jambes, DGO3-Département de la Nature et des Forêts, 163p
- Rosa, J.; Gauberville, C., 2004. Que deviennent les parcelles non reconstituées plus de 10 ans après une tempête? *RDV Tech.* **3**, 4–6
- Rosenvald, K.; Ostonen, I.; Truu, M.; Truu, J.; Uri, V.; Vares, A.; Lohmus, K., 2011. Fine-root rhizosphere and morphological adaptations to site conditions in interaction with tree mineral nutrition in young silver birch (*Betula pendula* Roth.) stands. *Eur. J. For. Res.* **130**, 1055–1066
- Rosenvald, K.; Tullus, A.; Ostonen, I.; Uri, V.; Kupper, P.; Aosaar, J.; Varik, M.; Söber, J.; Niglas, A.; Hansen, R.; *et al.*, 2014. The effect of elevated air humidity on young silver birch and hybrid aspen biomass allocation and accumulation—Acclimation mechanisms and capacity. *For. Ecol. Manag.* **330**, 252–260
- Rousi, M.; Possen, B.J.H.M.; Hagqvist, R.; Thomas, B.R., 2012. From the Arctic Circle to the Canadian prairies—A case study of silver birch acclimation capacity. *Silva Fenn.* **46**, 355–364
- Rubio-Cuadrado, A.; Camarero, J. J.; del Rio, M.; Sánchez-González, M.; Ruiz-Peinado, R.; Bravo-Oviedo, A.; Gil, L.; Montes, F., 2018. Long-term impacts of drought on growth and forest dynamics in a temperate beech-oak-birch forest, *Agricultural and Forest Meteorology* **259**, 48-59
- Rumbou, A.; Candresse, T.; Marais, A.; Theil, S.; Langer, J.; Jalkanen, R.; Büttner, C., 2018. A novel badnavirus discovered from *Betula* sp. affected by birch leaf-roll disease. *PLoS ONE* **13**, 14p
- Rytter, L.; Werner, M., 2007. Influence of early thinning in broadleaved stands on development of remaining stems. *Scand. J. For. Res.* **22**, 198–210
- Rytter, L., 2013. Growth dynamics of hardwood stands during the precommercial thinning phase - Recovery of retained stems after competition release. *For. Ecol. Manag.* **302**, 264-272
- Sachsse, H., 1989. Holzqualität von Birken. Strukturelle und physikalisch-mechanische Eigenschaften von Birkenhölzern. *Holz Roh-Und Werkst.* **47**, 27–30
- Saetre, P., 1998. Decomposition, microbial community structure, and earthworm effects along a birch-spruce soil gradient. *Ecology* **79**, 834–846
- Saha, S.; Kuehne, C.; Kohnle, U.; Brang, P.; Ehring, A.; Geisel, J.; Leder, B.; Muth, M.; Petersen, R.; Peter, J.; *et al.*, 2012. Growth and quality of young oaks

- (*Quercus robur* and *Quercus petraea*) grown in cluster plantings in central Europe: A weighted meta-analysis. *For. Ecol. Manag.* **283**, 106–118
- Santamour, F.S., Jr.; Greene, A., 1986. European hornet damage to ash and birch trees. *J. Arboric.* **12**, 273–279.
- Sautot, L.; Faivre, B.; Journaux, L.; Molinc, P.; 2015. The hierarchical agglomerative clustering with Gower index: A methodology for automatic design of OLAP cube in ecological data processing context, *Ecological Informatics* **26**(2), 217-230
- Schelhaas, M.J.; Clerkx, A.P.P.M.; Daamen, W.P.; Oldenburger, J.; Velema, G.; Schnitger, P.; Schoonderwoerd, H.; Kramer, H.; 2014. *Zesde Nederlandse bosinventarisatie: Methodes en basisresultaten*. Alterra, Wageningen, Netherlands, 102p
- Schmitz, F.; et al., 2014. *The Forests in Germany - Selected Results of the Third National Forest Inventory*. Federal Ministry of Food and Agriculture (BMEL). Berlin, 52 p (disponible le 20/01/2022 : http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/EN/Publications/ForestsInGermany-BWI.pdf?__blob=publicationFile)
- Schrör, H., 1987. *Erzeugung, Absatz und Verwendung von Birkenholz in Nordrhein-Westfalen*. Master's Thesis, Universität Göttingen, Institut für Forstbenutzung, Göttingen, Germany.
- Schua, K.; Wende, S.; Wagner, S.; Feger, K.-H., 2015. Soil Chemical and Microbial Properties in a Mixed Stand of Spruce and Birch in the Ore Mountains (Germany)—A Case Study. *Forests* **6**, 1949–1965
- Schumacher, J., 2011. The general situation regarding ash dieback in Germany and investigations concerning the invasion and distribution strategies of *Chalara fraxinea* in woody tissue. *EPPO Bulletin* **41**(1), 7-10
- Sénécal, S.; Brice, K.; Sauban, F.; Duvauchelle, M.; Morin, A.; Rombaut, G.; Bouan, G.; Couette, A.; Blondet, M.; Lenglet, J.; Wernsdörfer, H., 2020. La crise des scolytes (*Ips typographus*) ravageurs de l'Épicéa commun (*Picea abies*) vue de l'intérieur - Retours sur une enquête qualitative auprès d'acteurs du nord-est de la France et sa zone transfrontalière (Allemagne, Belgique) réalisée fin 2019 – début 2020. *Revue forestière française* **72**(5), 425–441
- Sevrin, E.; Lemaire, J. 2001 Connaissance et utilités du bouleau. *Forêt-entreprise* **136**, 15-34
- Skjøth, C.A.; Sommerw, J.; Stachz, A.; Smithz, M.; Brandt, J., 2007. The long-range transport of birch (*Betula*) pollen from Poland and Germany causes significant pre-season concentrations in Denmark. *Clin. Exp. Allergy* **37**, 1204–1212
- Skovsgaard, J.P.; Johansson, U.; Holmström, E.; Tune, R.M.; Ols, C.; Attocchi, G., 2021. Effects of Thinning Practice, High Pruning and Slash Management on Crop Tree and Stand Growth in Young Even-Aged Stands of Planted Silver Birch (*Betula pendula* Roth). *Forests* **12**(225), 21p
- Stark, H.; Nothdurft, A.; Bauhus, J., 2013. Allometries for Widely Spaced *Populus* ssp. and *Betula* ssp. in Nurse Crop Systems. *Forests* **4**, 1003–1031

- Stark, H.; Nothdurft, A.; Block, J.; Bauhus, J., 2015. Forest restoration with *Betula* spp. and *Populus* spp. nurse crops increases productivity and soil fertility. *For. Ecol. Manag.* **339**, 57–70
- Statistics Estonia (disponible le 20/01/2022: <http://pub.stat.ee/px-web.2001/dialog/statfile1.asp>)
- Sulc, Z.; Matejka, M.; Prochazka, J.; Rezankova, H., 2017. Evaluation of the Gower Coefficient Modifications in Hierarchical Clustering. *Metodoloski zvezki* **14**(1), 37-48
- Suszka, B.; Muller, C.; Bonnet-Masimbert, M., 1994. *Graines des feuillus forestiers de la graine au semis*. I.N.R.A., France, 292p
- Swanson, M.E.; Franklin, J.F.; Beschta, R.L.; Crisafulli, C.M.; DellaSala, D.A.; Hutto, R.L.; Lindenmayer, D.B.; Swanson, F.J., 2011. The forgotten stage of forest succession: Early-successional ecosystems on forest sites. *Front. Ecol. Environ.* **9**, 117–125
- Tallier, P.-A., 2004. Entre déboisements, boisement et reboisement, deux siècles d'histoire des forêts belges (1750-1950). *Forêt Wallonne* **68**, 8-19
- Teischinger, A., 2017. From Forest to Wood Production—A selection of challenges and opportunities for innovative hardwood utilization. In Proceedings of the 6th International Scientific Conference on Hardwood Processing, Lahti, Finland, 25–28 September 2017; Möttönen, V., Heinonen, E., Eds.; Natural Resources Institute Finland: Helsinki, Finland, 13p
- Thibaudon, M.; Monnier, S., 2015. Les pollens de bouleau: Indicateur santé du changement climatique, *Rev. Française Allergol.* **55**, 228
- Tigerstedt, T.W.P., M.A.; Viherä-Aarnio, A., 1995. Photosynthesis and canopy characteristics in genetically defined families of silver birch (*Betula pendula*), *Tree Physiology* **15**(10), 665–671
- Trubins, R., 2009. *Introduction of GIS into IKEA's Wood Sourcing System. Aspects of Forest Resource Data Availability and System Functionality*. Master's Thesis, Swedish University of Agricultural Sciences: Alnarp, Sweden, 56p
- Tsuda, Y.; Semerikov, V.; Sebastiani, F.; Vendramin, G. G.; Lascoux, M., 2017. Multispecies genetic structure and hybridization in the *Betula* genus across Eurasia, *Molecular Ecology* **26**, 589–605
- Tullus, A.; Lukason, O.; Vares, A.; Padari, A.; Lutter, R.; Tullus, T.; Karoles, K.; Tullus, H.; 2012. Economics of Hybrid Aspen (*Populus tremula* L. x *P. tremuloides* Michx.) and Silver Birch (*Betula pendula* Roth.) Plantations on Abandoned Agricultural Lands in Estonia. *Baltic Forestry* **18**(2), 288 – 298
- Tullus, T.; Tullus, A.; Roosaluuste, E.; Kaasik, A.; Lutter, R.; Tullus, H., 2013. Understorey vegetation in young naturally regenerated and planted birch (*Betula* spp.) stands on abandoned agricultural land. *New For.* **44**, 591–611
- Uri, V.; Varik, M.; Aosaar, J.; Kanal, A.; Kukumägi, M.; Lõhmus, K., 2012. Biomass production and carbon sequestration in a fertile silver birch (*Betula pendula* Roth) forest chronosequence. *For. Ecol. Manag.* **267**, 117–126
- Välkky, E.; Jutila, L.; Karjalainen, T.; Karvinen, S.; Gerasimov, Y.; Leinonen, T., 2011. Russian Forest Policy and its Impact in Russia and Finland. In Impact of

- Changes in Forest and Economic Policy and the Business Preconditions in Russia and Finland; Väkky, E., Viitanen, J., Ollonqvist, P., Eds.; Working Papers of the Finnish Forest Research Institute: Vantaa, Finland, Volume 218, 8–50
- Van der Perre, R.; Bythell, S.; Bogaert, P.; Claessens, H.; Ridremont, F.; Tricot, C.; Vincke, C.; Ponette, Q., 2015. La carte bioclimatique de Wallonie : un nouveau découpage écologique du territoire pour le choix des essences forestières. *Forêt.Nature* **135**, 47-58
- Vanhanen, H.; Peltola, R.; Ahtikoski, A.; Pappinen, A., 2014. Cultivation of Pakuri (*Inonotus obliquus*)—Potential for new income source for forest owners. In Proceedings of the The Book of Abstracts of the 10th International Mycological Congress (IMC10), Thailand, Bangkok, 10 October 2013; IMC 10 Organizing Committee, Ed.; National Center for Genetic Engineering and Biotechnology: Bangkok, Thailand, 418p
- Vanhellemont, M.; Van Acker, J.; Verheyen, K., 2016. Exploring life growth patterns in birch (*Betula pendula*). *Scand. J. For. Res.* **31**(6), 8p
- Verkasalo, E., 1993. Koivupuutavaran vikaantumisen pitkittyneessä metsävarastoinnissa ja sen vaikutus viulun saantoon, laatuun ja arvoon. Summary: Deterioration of Birch Timber during Prolonged Storage in the Forest and Its Effect on the Yield, Quality and Value of Rotary-Cut Veneer. *Folia For.* **806**, 31p
- Verkasalo, E., 1997. *Hieskoivun laatu vaneripuuna*. Quality of White Birch (*Betula pubescens* Ehrh.) for Veneer and Plywood. Dissertation for D.For. in wood science and forest products. Department of Logging and Utilization of Forest Resources, University of Helsinki, Finland. Finn. For. Res. Inst. Res. Pap. 632, 483.
- Verkasalo, E.; Toppinen A.; Arponen J.; Heräjärvi H., 2007. Perspectives of wood resources, industry competitiveness and wood product markets for birch industries in the Baltic Sea area. In Proceedings of the International Scientific Conference on Hardwood Processing, Quebec City, QC, Canada, 24–26 September 2007; Blanchet, P., Ed.; FPInnovations-Forintek Division: Quebec City, QC, Canada, 29–35.
- Verkasalo, E.; Heräjärvi, H., 2009. Potential of European birch species for product development of veneer and plywood—Recovery, grades and mechanical properties and future market requirements. In Proceedings of the 2nd International Scientific Conference on Hardwood Processing, Paris, France, 28–29 September 2009; Rouger, F., Goueffon, M., Eds.; FCBA: Paris, France, 11p
- Verkasalo, E.; Heräjärvi, H.; Möttönen, V.; Haapala, A.; Brännström, H.; Vanhanen, H.; Miina, J., 2017. Current and future products as the basis for value chains of birch in Finland. In Proceedings of the 6th International Scientific Conference on Hardwood Processing, Lahti, Finland, 25–28 September 2017; Möttönen, V., Heinonen, E., Eds.; Natural Resources Institute Finland: Helsinki, Finland, 81–96

- Viherä-Aarnio, A., 2009. Effects of seed origin latitude on the timing of height growth cessation and field performance of silver birch. *Diss. For.* **87**, 47p
- Viikari, L.; Alén, R., 2011. Biochemical and chemical conversion of forest biomass. In *Biorefining of Forest Resources*; Alén, R., Ed.; Paper Engineers' Association: Helsinki, Finland, 225–261
- Von Bargaen, S; Arndt, N; Grubits, E; Büttner, C; Jalkanen, R. Cherry, 2009. Leaf Roll Virus in birch—An old problem or an emerging virus in Finland? In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Plant Protection and Plant Health in Europe*, Berlin, Germany, 14–16 May; Feldmann, F., Alford, D.V., Furk C., Eds.; Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft: Braunschweig, Germany, 242–250
- Wagenführ, R.; Scheiber, C., 1985. *Holzatlas. Mit 890 zum Teil mehrfarbigen Bildern*; VEB Fachbuchverlag: Leipzig, Germany, 720p
- Wehrich, H., 1982. The TOWS matrix—A tool for situation analysis. *Long Range Plan.* **15**, 54–66
- Wickham, H., 2016. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis* (2nd ed.); Springer-Verlag, New York, 260p
- Wickham, H.; François, R.; Henry, L.; Müller, K., 2019. *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*. R package version 0.8.0.1. Available online: <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr> (disponible le 20/01/2022).
- Wiedenbeck, J.; Wiemann, M.; Alderman, D.; Baumgras, J.; Luppold, W., 2004. *Defining Hardwood Veneer Log Quality Attributes*, USDA Forest Service: Newtown, CT, USA
- Wilhelm, G.J.; Rieger, H., 2013. *Naturnahe Waldwirtschaft—Mit der QD-Strategie: Eine Strategie für Den Qualitätsgeleiteten und Schonenden Gebrauch des Waldes Unter Achtung der Gesamten Lebewelt*, Eugen Ulme KG: Stuttgart, Germany, 207p
- Wilhelm, G. J.; Rieger, H., 2017. *Stratégie QD, Une gestion de la forêt basée sur la qualité et les cycles naturels*, Coédition IDF/Forêt Wallonne, France-Belgique, 192p
- Wilson, E.; San Martin, G.; Ligot, G., 2020. Douglas Fir Needle Midge (*Contarinia pseudotsugae*) A potential threat to Douglas fir in the United Kingdom and Ireland? *Quarterly Journal of Forestry* **114**(4), 250-256
- Wood, J. E.; Von Althen, F. W.; Mitchell, E. G., 1996. Crown release improves growth of 20-year-old *Betula alleghaniensis* in tolerant northern hardwood stands, *New Forests* **12**, 87-99
- Woodcock, B.A.; Leather, S.R.; Watt, A.D., 2003. Changing management in Scottish birch woodlands: A potential threat to local invertebrate biodiversity. *Bull. Entomol. Res.* **3**(93), 159–167
- Woxblom, L.; Nylinder, M., 2010. Industrial utilization of hardwood in Sweden. *Ecol. Bull.* **53**, 43–50
- Ylioja, T.; Roininen, H.; Heinonen, J.; Rousi, M., 2000. Susceptibility of *Betula pendula* clones to *Phytobia betulae*, a dipteran miner of birch stems. *Can. J. For. Res.* **30**, 1824–1829

- Zâlītis, T.; Zâlītis, P., 2007. Growth of Young Stands of Silver Birch (*Betula pendula* Roth.) Depending on Pre-Commercial Thinning Intensity. *Baltic Forestry* **13**(1), 61-67
- Zare, H.; Akbarinia, M.; Hosseini, S. M.; Ejtehadi, H.; Amini Eshkevari, T., 2010. A new record of *Betula Litwinowii* (*Betulaceae*) and a review of the geographical distribution of the genus *Betula* L. in Iran. *Iran Journ. Bot* **16**(2), 237–241
- Zasada, M.; Bijak, S.; Bronisz, K.; Bronisz, A.; Gawęda, T., 2014. Biomass dynamics in young silver birch stands on post-agricultural lands in central Poland. *Drewno* **57**(192), 29–39

Annexes

Annexe 1. Paramètres des peuplements à bouleau de la typologie

Paramètres des peuplements à bouleau de la typologie (1 sur 3)

Type	Nombre UE (% par rapport à l'ensemble des UE à bouleau)	Proportion de surface terrière de bouleau (valeurs extrêmes) (%)	Composition 1 (% des UE)	Composition 2 (% des UE)	Composition 3 (% des UE)	Structure (% des UE)
1	54 (4,2%)	50 (33-75)	CHE (19%)	PML (19%)	RES (17%)	Futaie (96%)
2	86 (6,8%)	13 (1-74)	RES (43%)	PML (15%)	NOB (7%)	Futaie (99%)
3	87 (6,8%)	13 (2-32)	RES (39%)	HET (16%)	PML (14%)	Futaie (100%)
4	128 (10,1%)	15 (1-76)	NOB (21%)	CHE-CHA (9%)	CHA (8%)	Taillis sous Futaie (88%)
5	124 (9,7%)	15 (3-33)	CHE-CHA (18%)	CHE-HET (15%)	CHE-NOB (12%)	Taillis sous Futaie (100%)
6	60 (4,7%)	90 (67-100)	BO (95%)	CHR (2%)	HET (2%)	Futaie (100%)
7	92 (7,2%)	48 (33-73)	CHE (98%)	CHE-SST (2%)	AUL (0%)	Taillis sous Futaie (92%)
8	38 (3%)	46 (33-65)	CHE (92%)	CHE-PML (5%)	BO (3%)	Futaie (100%)
9	44 (3,5%)	51 (34-66)	BO (55%)	CHA (9%)	RES (9%)	Taillis sous Futaie (98%)
10	67 (5,3%)	64 (6-100)	BO (52%)	SST (12%)	CHA (7%)	Taillis (100%)
11	46 (3,6%)	46 (33-65)	NOB (17%)	RES (17%)	HET (15%)	Taillis sous Futaie (67%)
12	61 (4,8%)	87 (67-100)	BO (95%)	AUL (2%)	CHA (2%)	Taillis sous Futaie (98%)
13	115 (9%)	16 (1-33)	CHE (100%)	AUL (0%)	CHA (0%)	Taillis sous Futaie (99%)
14	49 (3,9%)	14 (4-30)	CHE (49%)	CHE-HET (14%)	HET (8%)	Futaie irrégulière (100%)
15	52 (4,1%)	15 (4-33)	CHE (88%)	CHE-NOB (10%)	CHE-CHA (2%)	Futaie (100%)
16	29 (2,3%)	32 (3-62)	CHE (90%)	CHE-HET (7%)	CHE-CHA (3%)	Taillis (100%)
17	75 (5,9%)	14 (3-32)	CHE (69%)	CHE-HET (19%)	CHE-RES (9%)	Futaie (100%)
18	65 (5,1%)	17 (4-31)	CHE (100%)	AUL (0%)	CHA (0%)	Taillis sous Futaie(100%)

Légende composition :

AUL Aulne blanc, Aulne glutineux

BO Bouleau

CHA Charme

CHE Chênes indigènes

CHR Chêne rouge

FEU Ormes, Aubépines, Prunellier, Feuillus divers, Châtaignier, Marronnier, Noisetier, Noyers, Robinier, Autres saules, Pommier, Poirier, Alisiers, Sureaux, Bourdaine, Cerisiers

HET Hêtre

NOB Erable sycomore, Frêne, Merisier, Erable plane, Erable champêtre, Tilleuls

PEU Peuplier hybride

PML Mélèze, Pin sylvestre, Pin noir d'Autriche, Pin noir de Corse, Pin weymouth

RES Epicéa commun, Epicéa de Sitka, Sapin de Douglas, Sapin pectiné, Sapin de Vancouver, Autres sapins, Cyprès, Tsuga, Thuya, Autres résineux, If

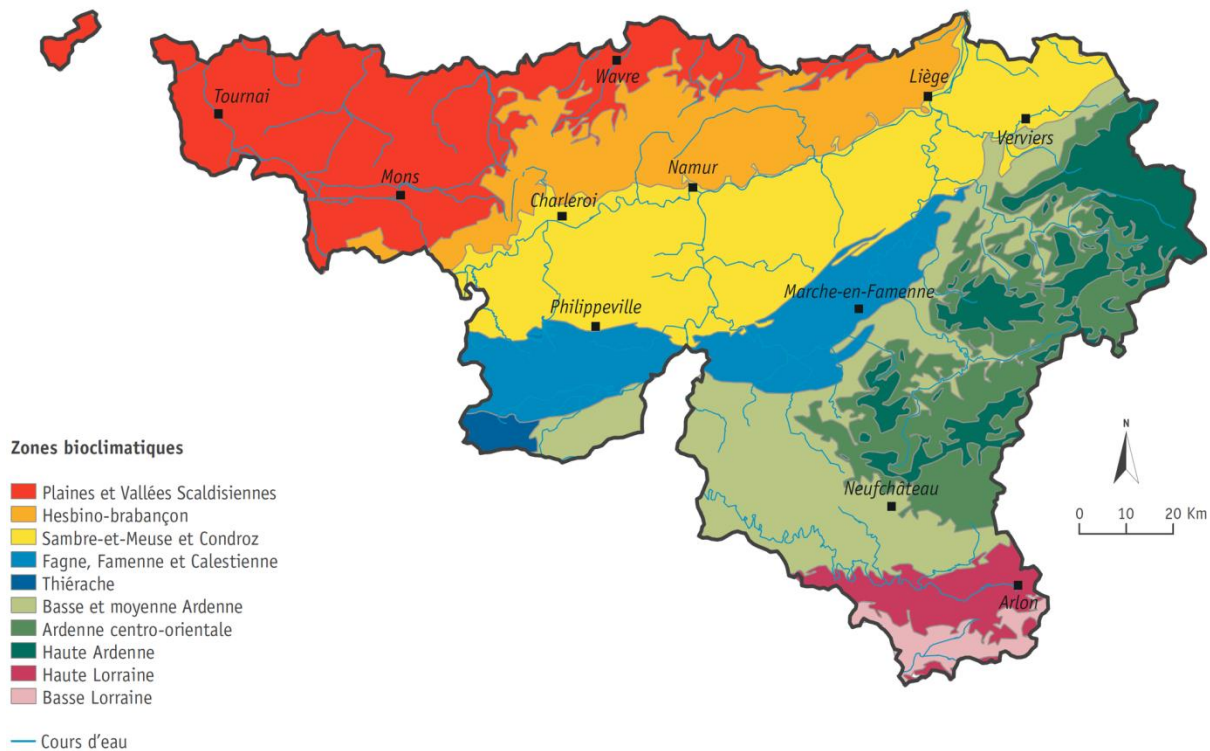
SST Sorbier, Peuplier tremble, Saule marsault

Paramètres des peuplements à bouleau de la typologie (2 sur 3)

Type	Région bioclimatique 1 (% des UE)	Région bioclimatique 2 (% des UE)	Région bioclimatique 3 (% des UE)
1	Basse et moyenne Ardenne (30%)	Condroz, Sambre et Meuse (19%)	Haute Ardenne (11%)
2	Condroz, Sambre et Meuse (19%)	Haute Ardenne (19%)	Plaines et Vallées Scaldisiennes (16%)
3	Basse et moyenne Ardenne (52%)	Ardenne centro-orientale (16%)	Condroz, Sambre et Meuse (15%)
4	Condroz, Sambre et Meuse (32%)	Plaines et Vallées Scaldisiennes (21%)	Thiérache (10%)
5	Basse et moyenne Ardenne (38%)	Condroz, Sambre et Meuse (34%)	Fagne, Famenne, Calestienne (11%)
6	Basse et moyenne Ardenne (32%)	Condroz, Sambre et Meuse (18%)	Haute Ardenne (15%)
7	Basse et moyenne Ardenne (66%)	Condroz, Sambre et Meuse (21%)	Hesbigno-Brabançon (3%)
8	Basse et moyenne Ardenne (68%)	Condroz, Sambre et Meuse (16%)	Fagne, Famenne, Calestienne (8%)
9	Basse et moyenne Ardenne (61%)	Condroz, Sambre et Meuse (18%)	Ardenne centro-orientale (9%)
10	Basse et moyenne Ardenne (39%)	Ardenne centro-orientale (19%)	Haute Ardenne (16%)
11	Condroz, Sambre et Meuse (30%)	Basse et moyenne Ardenne (17%)	Fagne, Famenne, Calestienne (9%)
12	Basse et moyenne Ardenne (38%)	Condroz, Sambre et Meuse (30%)	Plaines et Vallées Scaldisiennes (11%)
13	Condroz, Sambre et Meuse (44%)	Fagne, Famenne, Calestienne (32%)	Basse et moyenne Ardenne (12%)
14	Basse et moyenne Ardenne (61%)	Ardenne centro-orientale (20%)	Condroz, Sambre et Meuse (10%)
15	Condroz, Sambre et Meuse (44%)	Haute Ardenne (13%)	Fagne, Famenne, Calestienne (12%)
16	Basse et moyenne Ardenne (69%)	Ardenne centro-orientale (21%)	Condroz, Sambre et Meuse (7%)
17	Basse et moyenne Ardenne (80%)	Ardenne centro-orientale (20%)	Basse Lorraine (0%)
18	Basse et moyenne Ardenne (89%)	Ardenne centro-orientale (9%)	Plaines et Vallées Scaldisiennes (2%)

Légende régions bioclimatiques de la Wallonie

(Source : SPW – DGO3 – DEMNA et DNF (ACRVF))



Paramètres des peuplements à bouleau de la typologie (3 sur 3)

Type	Circonférence moyenne peuplement (circonf. moy. bouleau) (cm)	Coef. variation circonf. peuplement (coef. var. circonf. bouleau)	Surface terrière à l'hectare du peuplement (GHA) (m ² /ha)	Altitude moyenne (valeurs extrêmes) (m)	Ph (valeurs extrêmes)	Température moyenne annuelle (valeurs extrêmes) (°C)	Précipitations annuelles (valeurs extrêmes) (mm)
1	63 (64)	38% (20%)	22	315 (78-547)	4,3 (4,1-5,3)	8,6 (7-9,7)	1039 (782-1499)
2	64 (59)	47% (7%)	28	304 (43-618)	4,4 (4-6,5)	8,6 (6,9-9,9)	1037 (773-1525)
3	65 (56)	43% (7%)	28	350 (72-629)	4,2 (4,1-5,3)	8,4 (6,9-10,1)	1066 (771-1511)
4	53 (71)	57% (8%)	30	225 (20-622)	4,5 (4-6,5)	9,1 (6,9-10,3)	954 (729-1380)
5	57 (77)	57% (7%)	25	273 (92-530)	4,4 (4-6,5)	8,8 (7,2-10)	985 (785-1371)
6	45 (46)	28% (23%)	18	323 (31-580)	4,2 (4-4,9)	8,6 (7,1-10,4)	1063 (782-1513)
7	58 (60)	48% (23%)	23	307 (68-515)	4,2 (4,1-4,9)	8,6 (7,5-10,1)	1042 (790-1349)
8	63 (63)	47% (23%)	23	319 (161-460)	4,2 (4,1-4,9)	8,6 (7,5-10)	1044 (785-1234)
9	48 (59)	44% (23%)	30	316 (56-477)	4,3 (4,1-4,9)	8,6 (7,6-9,8)	1035 (799-1187)
10	35 (38)	14% (0%)	21	358 (51-649)	4,3 (4,1-6,5)	8,3 (6,8-10,1)	1106 (766-1530)
11	51 (66)	45% (22%)	25	287 (40-620)	4,5 (4-6,5)	8,8 (7,2-10)	1016 (821-1428)
12	45 (49)	30% (21%)	19	289 (60-569)	4,2 (4-4,6)	8,7 (7,2-10,4)	1018 (783-1456)
13	60 (66)	68% (11%)	23	237 (49-463)	4,5 (4-6,5)	9 (7,8-10,3)	954 (727-1166)
14	77 (86)	58% (8%)	26	341 (42-501)	4,2 (4,1-5,2)	8,4 (7,5-10)	1074 (798-1347)
15	78 (78)	60% (9%)	23	302 (92-631)	4,4 (4,1-5,9)	8,7 (7-10,4)	1050 (752-1514)
16	39 (45)	16% (0%)	31	361 (165-490)	4,2 (4,1-5,9)	8,3 (7,4-9,7)	1050 (852-1293)
17	84 (86)	41% (6%)	24	374 (229-485)	4,2 (4,1-4,6)	8,2 (7,4-9,1)	1123 (943-1476)
18	64 (66)	58% (10%)	23	346 (89-482)	4,2 (4,1-4,9)	8,3 (7,7-9,4)	1088 (789-1367)

Annexe 2. Matrice des distances - typologie des peuplements

Matrice des distances – richesse en bouleau

% de surface terrière (G) en bouleau	G bouleau < 33%	G bouleau > 66%	G bouleau 33-66%
G bouleau < 33%	0	1	0,47
G bouleau > 66%	1	0	0,55
G bouleau 33-66%	0,47	0,55	0

Matrice des distances – composition (1 sur 3)

	AUL	CHA	CHA-FEU	CHA-PML	CHE	CHE-AUL	CHE-CHA	CHE-CHR	CHE-FEU	CHE-HET	CHE-NOB	CHE-PEU	CHE-PML	CHE-RES	CHE-SST
AUL	0	0,71	0,73	0,71	0,77	0,28	0,74	0,75	0,70	0,74	0,72	0,71	0,70	0,74	0,74
CHA	0,71	0	0,27	0,41	0,68	0,66	0,29	0,68	0,63	0,63	0,64	0,64	0,61	0,66	0,67
CHA-FEU	0,73	0,27	0	0,48	0,59	0,62	0,28	0,63	0,46	0,61	0,60	0,63	0,58	0,63	0,54
CHA-PML	0,71	0,41	0,48	0	0,69	0,66	0,48	0,68	0,63	0,62	0,66	0,64	0,38	0,66	0,68
CHE	0,77	0,68	0,59	0,69	0	0,51	0,44	0,40	0,36	0,39	0,42	0,50	0,42	0,40	0,42
CHE-AUL	0,28	0,66	0,62	0,66	0,51	0	0,58	0,57	0,50	0,56	0,56	0,58	0,53	0,56	0,54
CHE-CHA	0,74	0,29	0,28	0,48	0,44	0,58	0	0,54	0,49	0,50	0,52	0,56	0,50	0,53	0,54
CHE-CHR	0,75	0,68	0,63	0,68	0,40	0,57	0,54	0	0,48	0,51	0,52	0,44	0,50	0,50	0,52
CHE-FEU	0,70	0,63	0,46	0,63	0,36	0,50	0,49	0,48	0	0,42	0,45	0,52	0,44	0,48	0,27
CHE-HET	0,74	0,63	0,61	0,62	0,39	0,56	0,50	0,51	0,42	0	0,51	0,55	0,45	0,50	0,53
CHE-NOB	0,72	0,64	0,60	0,66	0,42	0,56	0,52	0,52	0,45	0,51	0	0,53	0,50	0,51	0,51
CHE-PEU	0,71	0,64	0,63	0,64	0,50	0,58	0,56	0,44	0,52	0,55	0,53	0	0,52	0,54	0,56
CHE-PML	0,70	0,61	0,58	0,38	0,42	0,53	0,50	0,50	0,44	0,45	0,50	0,52	0	0,48	0,49
CHE-RES	0,74	0,66	0,63	0,66	0,40	0,56	0,53	0,50	0,48	0,50	0,51	0,54	0,48	0	0,52
CHE-SST	0,74	0,67	0,54	0,68	0,42	0,54	0,54	0,52	0,27	0,53	0,51	0,56	0,49	0,52	0
CHR	0,76	0,71	0,73	0,70	0,79	0,73	0,75	0,45	0,72	0,75	0,74	0,60	0,71	0,74	0,74
CHR-FEU	0,70	0,65	0,57	0,64	0,69	0,64	0,66	0,46	0,49	0,66	0,63	0,55	0,61	0,66	0,52
FEU	0,72	0,68	0,52	0,66	0,74	0,66	0,71	0,72	0,41	0,70	0,67	0,68	0,64	0,71	0,52
FEU-PEU	0,75	0,71	0,64	0,71	0,78	0,72	0,75	0,77	0,59	0,75	0,69	0,45	0,70	0,75	0,64
HET	0,78	0,70	0,74	0,66	0,75	0,73	0,73	0,75	0,65	0,38	0,73	0,72	0,65	0,73	0,74
HET-CHA	0,79	0,48	0,59	0,55	0,80	0,77	0,59	0,79	0,71	0,49	0,75	0,75	0,69	0,78	0,79
HET-NOB	0,71	0,63	0,68	0,62	0,71	0,68	0,67	0,70	0,61	0,50	0,45	0,63	0,62	0,67	0,68
HET-PML	0,70	0,62	0,64	0,41	0,62	0,62	0,62	0,64	0,53	0,38	0,61	0,61	0,35	0,54	0,61
HET-RES	0,81	0,75	0,79	0,72	0,84	0,79	0,80	0,82	0,75	0,63	0,80	0,78	0,73	0,55	0,81
HET-SST	0,71	0,64	0,70	0,60	0,74	0,68	0,69	0,72	0,63	0,49	0,70	0,68	0,61	0,62	0,61
NOB	0,75	0,68	0,72	0,70	0,76	0,72	0,71	0,75	0,69	0,73	0,37	0,69	0,70	0,73	0,73
NOB-AUL	0,26	0,66	0,70	0,67	0,76	0,38	0,70	0,74	0,68	0,72	0,57	0,69	0,68	0,72	0,73

NOB-CHA	0,76	0,45	0,55	0,59	0,77	0,74	0,54	0,76	0,71	0,74	0,46	0,70	0,70	0,75	0,75
NOB-CHR	0,81	0,76	0,81	0,76	0,86	0,80	0,81	0,57	0,79	0,81	0,64	0,66	0,78	0,81	0,81
NOB-FEU	0,66	0,63	0,55	0,63	0,67	0,61	0,64	0,67	0,44	0,65	0,40	0,61	0,60	0,65	0,53
NOB-PEU	0,82	0,77	0,82	0,78	0,87	0,82	0,82	0,85	0,80	0,83	0,67	0,48	0,79	0,83	0,84
NOB-RES	0,78	0,71	0,77	0,72	0,82	0,77	0,76	0,80	0,76	0,78	0,59	0,74	0,74	0,54	0,80
NOB-SST	0,69	0,60	0,63	0,62	0,74	0,65	0,66	0,72	0,59	0,70	0,49	0,65	0,64	0,69	0,52
PAS	0,54	0,46	0,49	0,44	0,56	0,49	0,50	0,53	0,45	0,50	0,49	0,47	0,44	0,50	0,50
PEU	0,83	0,80	0,82	0,80	0,87	0,81	0,83	0,85	0,81	0,84	0,82	0,43	0,80	0,84	0,84
PML	0,84	0,79	0,80	0,39	0,84	0,80	0,81	0,82	0,79	0,81	0,80	0,79	0,42	0,79	0,81
PML-CHR	0,82	0,78	0,81	0,56	0,86	0,80	0,81	0,59	0,80	0,81	0,81	0,69	0,59	0,80	0,81
PML-FEU	0,71	0,66	0,56	0,47	0,75	0,67	0,71	0,73	0,51	0,71	0,69	0,68	0,49	0,71	0,59
RES	0,87	0,82	0,85	0,81	0,88	0,84	0,85	0,87	0,83	0,85	0,85	0,83	0,81	0,50	0,86
RES-AUL	0,36	0,73	0,77	0,71	0,82	0,46	0,78	0,80	0,75	0,72	0,77	0,75	0,72	0,62	0,80
RES-PML	0,79	0,73	0,75	0,51	0,75	0,73	0,73	0,74	0,71	0,73	0,72	0,72	0,49	0,47	0,74
SST	0,73	0,65	0,68	0,65	0,72	0,66	0,68	0,71	0,63	0,69	0,68	0,67	0,64	0,68	0,46
SST-AUL	0,46	0,72	0,75	0,71	0,80	0,49	0,76	0,78	0,71	0,77	0,76	0,74	0,71	0,74	0,59
SST-CHA	0,68	0,32	0,44	0,44	0,72	0,65	0,46	0,70	0,62	0,60	0,67	0,65	0,60	0,68	0,58
SST-FEU	0,90	0,87	0,75	0,87	0,92	0,84	0,89	0,92	0,65	0,91	0,87	0,89	0,84	0,90	0,52

Matrice des distances – composition (2 sur 3)

	CHR	CHR-FEU	FEU	FEU-PEU	HET	HET-CHA	HET-NOB	HET-PML	HET-RES	HET-SST	NOB	NOB-AUL	NOB-CHA	NOB-CHR	NOB-FEU
AUL	0,76	0,70	0,72	0,75	0,78	0,79	0,71	0,70	0,81	0,71	0,75	0,26	0,76	0,81	0,66
CHA	0,71	0,65	0,68	0,71	0,70	0,48	0,63	0,62	0,75	0,64	0,68	0,66	0,45	0,76	0,63
CHA-FEU	0,73	0,57	0,52	0,64	0,74	0,59	0,68	0,64	0,79	0,70	0,72	0,70	0,55	0,81	0,55
CHA-PML	0,70	0,64	0,66	0,71	0,66	0,55	0,62	0,41	0,72	0,60	0,70	0,67	0,59	0,76	0,63
CHE	0,79	0,69	0,74	0,78	0,75	0,80	0,71	0,62	0,84	0,74	0,76	0,76	0,77	0,86	0,67
CHE-AUL	0,73	0,64	0,66	0,72	0,73	0,77	0,68	0,62	0,79	0,68	0,72	0,38	0,74	0,80	0,61
CHE-CHA	0,75	0,66	0,71	0,75	0,73	0,59	0,67	0,62	0,80	0,69	0,71	0,70	0,54	0,81	0,64
CHE-CHR	0,45	0,46	0,72	0,77	0,75	0,79	0,70	0,64	0,82	0,72	0,75	0,74	0,76	0,57	0,67
CHE-FEU	0,72	0,49	0,41	0,59	0,65	0,71	0,61	0,53	0,75	0,63	0,69	0,68	0,71	0,79	0,44
CHE-HET	0,75	0,66	0,70	0,75	0,38	0,49	0,50	0,38	0,63	0,49	0,73	0,72	0,74	0,81	0,65
CHE-NOB	0,74	0,63	0,67	0,69	0,73	0,75	0,45	0,61	0,80	0,70	0,37	0,57	0,46	0,64	0,40
CHE-PEU	0,60	0,55	0,68	0,45	0,72	0,75	0,63	0,61	0,78	0,68	0,69	0,69	0,70	0,66	0,61
CHE-PML	0,71	0,61	0,64	0,70	0,65	0,69	0,62	0,35	0,73	0,61	0,70	0,68	0,70	0,78	0,60
CHE-RES	0,74	0,66	0,71	0,75	0,73	0,78	0,67	0,54	0,55	0,62	0,73	0,72	0,75	0,81	0,65
CHE-SST	0,74	0,52	0,52	0,64	0,74	0,79	0,68	0,61	0,81	0,61	0,73	0,73	0,75	0,81	0,53
CHR	0	0,33	0,72	0,76	0,77	0,78	0,70	0,70	0,81	0,69	0,77	0,74	0,76	0,33	0,69
CHR-FEU	0,33	0	0,42	0,58	0,71	0,74	0,62	0,62	0,75	0,62	0,69	0,67	0,69	0,45	0,47
FEU	0,72	0,42	0	0,49	0,73	0,76	0,65	0,63	0,76	0,66	0,70	0,68	0,72	0,77	0,36
FEU-PEU	0,76	0,58	0,49	0	0,78	0,80	0,66	0,69	0,81	0,70	0,69	0,71	0,72	0,79	0,50
HET	0,77	0,71	0,73	0,78	0	0,32	0,43	0,37	0,54	0,35	0,77	0,76	0,79	0,83	0,71
HET-CHA	0,78	0,74	0,76	0,80	0,32	0	0,48	0,47	0,60	0,45	0,76	0,75	0,65	0,83	0,73
HET-NOB	0,70	0,62	0,65	0,66	0,43	0,48	0	0,46	0,59	0,44	0,36	0,55	0,46	0,59	0,43
HET-PML	0,70	0,62	0,63	0,69	0,37	0,47	0,46	0	0,48	0,37	0,70	0,68	0,71	0,77	0,61
HET-RES	0,81	0,75	0,76	0,81	0,54	0,60	0,59	0,48	0	0,41	0,81	0,79	0,82	0,86	0,75
HET-SST	0,69	0,62	0,66	0,70	0,35	0,45	0,44	0,37	0,41	0	0,71	0,69	0,72	0,77	0,64

NOB	0,77	0,69	0,70	0,69	0,77	0,76	0,36	0,70	0,81	0,71	0	0,51	0,31	0,57	0,36
NOB-AUL	0,74	0,67	0,68	0,71	0,76	0,75	0,55	0,68	0,79	0,69	0,51	0	0,56	0,68	0,51
NOB-CHA	0,76	0,69	0,72	0,72	0,79	0,65	0,46	0,71	0,82	0,72	0,31	0,56	0	0,61	0,45
NOB-CHR	0,33	0,45	0,77	0,79	0,83	0,83	0,59	0,77	0,86	0,77	0,57	0,68	0,61	0	0,60
NOB-FEU	0,69	0,47	0,36	0,50	0,71	0,73	0,43	0,61	0,75	0,64	0,36	0,51	0,45	0,60	0
NOB-PEU	0,83	0,77	0,79	0,39	0,85	0,85	0,62	0,78	0,87	0,78	0,59	0,70	0,65	0,76	0,63
NOB-RES	0,79	0,73	0,75	0,76	0,81	0,80	0,54	0,66	0,50	0,63	0,50	0,64	0,56	0,69	0,56
NOB-SST	0,68	0,54	0,56	0,60	0,71	0,70	0,44	0,62	0,74	0,51	0,39	0,54	0,45	0,61	0,35
PAS	0,54	0,44	0,48	0,53	0,55	0,56	0,46	0,43	0,59	0,44	0,54	0,50	0,54	0,61	0,43
PEU	0,85	0,80	0,82	0,36	0,87	0,88	0,78	0,80	0,90	0,80	0,83	0,81	0,84	0,89	0,77
PML	0,84	0,78	0,79	0,84	0,84	0,85	0,79	0,51	0,87	0,78	0,84	0,82	0,84	0,89	0,77
PML-CHR	0,38	0,50	0,78	0,83	0,83	0,85	0,76	0,62	0,86	0,77	0,83	0,80	0,82	0,50	0,76
PML-FEU	0,71	0,49	0,31	0,55	0,73	0,75	0,66	0,50	0,76	0,66	0,72	0,68	0,73	0,78	0,45
RES	0,87	0,82	0,83	0,87	0,88	0,89	0,81	0,71	0,39	0,68	0,87	0,85	0,88	0,92	0,82
RES-AUL	0,78	0,73	0,75	0,79	0,71	0,73	0,68	0,61	0,53	0,59	0,79	0,44	0,80	0,84	0,72
RES-PML	0,78	0,73	0,74	0,79	0,79	0,81	0,72	0,48	0,52	0,64	0,79	0,76	0,79	0,84	0,72
SST	0,71	0,60	0,66	0,70	0,73	0,74	0,65	0,63	0,75	0,45	0,71	0,70	0,71	0,78	0,62
SST-AUL	0,75	0,66	0,71	0,75	0,78	0,80	0,71	0,69	0,78	0,54	0,77	0,50	0,78	0,82	0,68
SST-CHA	0,66	0,59	0,64	0,67	0,59	0,44	0,56	0,54	0,66	0,41	0,68	0,65	0,54	0,74	0,61
SST-FEU	0,89	0,63	0,49	0,69	0,91	0,94	0,84	0,83	0,94	0,71	0,89	0,88	0,90	0,96	0,62

Matrice des distances – composition (3 sur 3)

	NOB- PEU	NOB- RES	NOB- SST	PAS	PEU	PML	PML- CHR	PML- FEU	RES	RES- AUL	RES- PML	SST	SST- AUL	SST- CHA	SST- FEU
AUL	0,82	0,78	0,69	0,54	0,83	0,84	0,82	0,71	0,87	0,36	0,79	0,73	0,46	0,68	0,90
CHA	0,77	0,71	0,60	0,46	0,80	0,79	0,78	0,66	0,82	0,73	0,73	0,65	0,72	0,32	0,87
CHA-FEU	0,82	0,77	0,63	0,49	0,82	0,80	0,81	0,56	0,85	0,77	0,75	0,68	0,75	0,44	0,75
CHA-PML	0,78	0,72	0,62	0,44	0,80	0,39	0,56	0,47	0,81	0,71	0,51	0,65	0,71	0,44	0,87
CHE	0,87	0,82	0,74	0,56	0,87	0,84	0,86	0,75	0,88	0,82	0,75	0,72	0,80	0,72	0,92
CHE-AUL	0,82	0,77	0,65	0,49	0,81	0,80	0,80	0,67	0,84	0,46	0,73	0,66	0,49	0,65	0,84
CHE-CHA	0,82	0,76	0,66	0,50	0,83	0,81	0,81	0,71	0,85	0,78	0,73	0,68	0,76	0,46	0,89
CHE-CHR	0,85	0,80	0,72	0,53	0,85	0,82	0,59	0,73	0,87	0,80	0,74	0,71	0,78	0,70	0,92
CHE-FEU	0,80	0,76	0,59	0,45	0,81	0,79	0,80	0,51	0,83	0,75	0,71	0,63	0,71	0,62	0,65
CHE-HET	0,83	0,78	0,70	0,50	0,84	0,81	0,81	0,71	0,85	0,72	0,73	0,69	0,77	0,60	0,91
CHE-NOB	0,67	0,59	0,49	0,49	0,82	0,80	0,81	0,69	0,85	0,77	0,72	0,68	0,76	0,67	0,87
CHE-PEU	0,48	0,74	0,65	0,47	0,43	0,79	0,69	0,68	0,83	0,75	0,72	0,67	0,74	0,65	0,89
CHE-PML	0,79	0,74	0,64	0,44	0,80	0,42	0,59	0,49	0,81	0,72	0,49	0,64	0,71	0,60	0,84
CHE-RES	0,83	0,54	0,69	0,50	0,84	0,79	0,80	0,71	0,50	0,62	0,47	0,68	0,74	0,68	0,90
CHE-SST	0,84	0,80	0,52	0,50	0,84	0,81	0,81	0,59	0,86	0,80	0,74	0,46	0,59	0,58	0,52
CHR	0,83	0,79	0,68	0,54	0,85	0,84	0,38	0,71	0,87	0,78	0,78	0,71	0,75	0,66	0,89
CHR-FEU	0,77	0,73	0,54	0,44	0,80	0,78	0,50	0,49	0,82	0,73	0,73	0,60	0,66	0,59	0,63
FEU	0,79	0,75	0,56	0,48	0,82	0,79	0,78	0,31	0,83	0,75	0,74	0,66	0,71	0,64	0,49
FEU-PEU	0,39	0,76	0,60	0,53	0,36	0,84	0,83	0,55	0,87	0,79	0,79	0,70	0,75	0,67	0,69
HET	0,85	0,81	0,71	0,55	0,87	0,84	0,83	0,73	0,88	0,71	0,79	0,73	0,78	0,59	0,91
HET-CHA	0,85	0,80	0,70	0,56	0,88	0,85	0,85	0,75	0,89	0,73	0,81	0,74	0,80	0,44	0,94
HET-NOB	0,62	0,54	0,44	0,46	0,78	0,79	0,76	0,66	0,81	0,68	0,72	0,65	0,71	0,56	0,84
HET-PML	0,78	0,66	0,62	0,43	0,80	0,51	0,62	0,50	0,71	0,61	0,48	0,63	0,69	0,54	0,83
HET-RES	0,87	0,50	0,74	0,59	0,90	0,87	0,86	0,76	0,39	0,53	0,52	0,75	0,78	0,66	0,94
HET-SST	0,78	0,63	0,51	0,44	0,80	0,78	0,77	0,66	0,68	0,59	0,64	0,45	0,54	0,41	0,71
NOB	0,59	0,50	0,39	0,54	0,83	0,84	0,83	0,72	0,87	0,79	0,79	0,71	0,77	0,68	0,89

NOB-AUL	0,70	0,64	0,54	0,50	0,81	0,82	0,80	0,68	0,85	0,44	0,76	0,70	0,50	0,65	0,88
NOB-CHA	0,65	0,56	0,45	0,54	0,84	0,84	0,82	0,73	0,88	0,80	0,79	0,71	0,78	0,54	0,90
NOB-CHR	0,76	0,69	0,61	0,61	0,89	0,89	0,50	0,78	0,92	0,84	0,84	0,78	0,82	0,74	0,96
NOB-FEU	0,63	0,56	0,35	0,43	0,77	0,77	0,76	0,45	0,82	0,72	0,72	0,62	0,68	0,61	0,62
NOB-PEU	0	0,72	0,63	0,63	0,30	0,90	0,88	0,78	0,93	0,85	0,85	0,79	0,84	0,76	0,96
NOB-RES	0,72	0	0,56	0,56	0,86	0,85	0,84	0,74	0,42	0,60	0,52	0,74	0,77	0,70	0,93
NOB-SST	0,63	0,56	0	0,42	0,77	0,77	0,76	0,59	0,81	0,72	0,73	0,36	0,50	0,45	0,56
PAS	0,63	0,56	0,42	0	0,66	0,63	0,61	0,45	0,67	0,56	0,55	0,47	0,53	0,39	0,71
PEU	0,30	0,86	0,77	0,66	0	0,92	0,90	0,80	0,95	0,86	0,87	0,81	0,84	0,77	0,97
PML	0,90	0,85	0,77	0,63	0,92	0	0,55	0,50	0,91	0,85	0,50	0,80	0,84	0,76	0,97
PML-CHR	0,88	0,84	0,76	0,61	0,90	0,55	0	0,61	0,91	0,84	0,65	0,78	0,82	0,74	0,96
PML-FEU	0,78	0,74	0,59	0,45	0,80	0,50	0,61	0	0,82	0,74	0,58	0,67	0,71	0,63	0,62
RES	0,93	0,42	0,81	0,67	0,95	0,91	0,91	0,82	0	0,59	0,44	0,82	0,83	0,79	1,00
RES-AUL	0,85	0,60	0,72	0,56	0,86	0,85	0,84	0,74	0,59	0	0,61	0,74	0,52	0,68	0,94
RES-PML	0,85	0,52	0,73	0,55	0,87	0,50	0,65	0,58	0,44	0,61	0	0,74	0,77	0,71	0,94
SST	0,79	0,74	0,36	0,47	0,81	0,80	0,78	0,67	0,82	0,74	0,74	0	0,36	0,39	0,52
SST-AUL	0,84	0,77	0,50	0,53	0,84	0,84	0,82	0,71	0,83	0,52	0,77	0,36	0	0,51	0,64
SST-CHA	0,76	0,70	0,45	0,39	0,77	0,76	0,74	0,63	0,79	0,68	0,71	0,39	0,51	0	0,68
SST-FEU	0,96	0,93	0,56	0,71	0,97	0,97	0,96	0,62	1,00	0,94	0,94	0,52	0,64	0,68	0

Matrice des distances – structure

	Futaie	Futaie irrégulière	Jeune futaie	Taillis	Taillis sous Futaie
Futaie	0	0,75	0,25	1	0,75
Futaie irrégulière	0,75	0	0,75	1	0,5
Jeune futaie	0,25	0,75	0	1	0,75
Taillis	1	1	1	0	1
Taillis sous Futaie	0,75	0,5	0,75	1	0

Matrice des distances – habitats potentiels de la classification WaleUNIS

	Aul Orm-frên	Chê molinie et boul	Chê-hê sessiliflore	Hê acido	Hê meso	Hê calci	Chê-cha xéro calci	Chê- cha schist	Chê- cha stell	Chê- frên	Erablière
Aulnaie/Ormaie/Frênaie	0	0,6	0,8	0,5	0,3	0,9	1	0,7	0,4	0,2	0,2
Chênaie à molinie, à bouleaux ou boulaie	0,6	0	0,3	0,4	0,8	0,9	1	0,6	0,3	0,7	0,6
Chênaie-hêtraie ou sessiliflore	0,8	0,3	0	0,1	0,5	0,8	0,7	0,4	0,2	0,8	0,8
Hêtraie acidophile	0,5	0,4	0,1	0	0,2	0,4	0,6	0,5	0,2	0,6	0,5
Hêtraie mésotrophe	0,3	0,8	0,5	0,2	0	0,2	0,4	0,5	0,3	0,2	0,2
Hêtraie calcicole	0,9	0,9	0,8	0,4	0,2	0	0,1	0,3	0,5	0,5	0,5
Chênaie-charmaie xérophile ou calcaire	1	1	0,7	0,6	0,4	0,1	0	0,1	0,3	0,5	0,7
Chênaie-charmaie schisteuse	0,7	0,6	0,4	0,5	0,5	0,3	0,1	0	0,2	0,3	0,5
Chênaie-charmaie à stellaire	0,4	0,3	0,2	0,2	0,3	0,5	0,3	0,2	0	0,1	0,2
Chênaie-frênaie	0,2	0,7	0,8	0,6	0,2	0,5	0,5	0,3	0,1	0	0,1
Erablière	0,2	0,6	0,8	0,5	0,2	0,5	0,7	0,5	0,2	0,1	0

Matrice des distances – régions bioclimatiques de la Wallonie

	Ardenne centro-orientale	Basse et moyenne Ardenne	Basse Lorraine	Fagne, Famenne, Calestienne	Haute Lorraine	Hesbigno-Brabançon	Plaines et Vallées Scaldisiennes	Condroz, Sambre et Meuse	Thiérache	Haute Ardenne
Ardenne centro-orientale	0	0,11	0,45	0,47	0,36	0,58	0,70	0,37	0,15	0,32
Basse et moyenne Ardenne	0,11	0	0,35	0,36	0,25	0,49	0,60	0,27	0,09	0,43
Basse Lorraine	0,45	0,35	0	0,10	0,10	0,20	0,26	0,11	0,34	0,77
Fagne, Famenne, Calestienne	0,47	0,36	0,10	0	0,14	0,27	0,31	0,13	0,38	0,79
Haute Lorraine	0,36	0,25	0,10	0,14	0	0,27	0,36	0,08	0,25	0,67
Hesbigno-Brabançon	0,58	0,49	0,20	0,27	0,27	0	0,13	0,25	0,45	0,88
Plaines et Vallées Scaldisiennes	0,70	0,60	0,26	0,31	0,36	0,13	0	0,34	0,57	1,00
Condroz, Sambre et Meuse	0,37	0,27	0,11	0,13	0,08	0,25	0,34	0	0,26	0,68
Thiérache	0,15	0,09	0,34	0,38	0,25	0,45	0,57	0,26	0	0,43
Haute Ardenne	0,32	0,43	0,77	0,79	0,67	0,88	1,00	0,68	0,43	0