

Etude des causes du dépérissement de la hêtraie de la Croix-Scaille et recommandations de gestion

Auteur : Marichal, François

Promoteur(s) : Claessens, Hugues

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : gestion des forêts et des espaces naturels, à finalité spécialisée

Année académique : 2017-2018

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/5162>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

ÉTUDE DES CAUSES DU DÉPÉRISSEMENT DE LA HÊTRAIE DE LA CROIX-SCAILLE ET RECOMMANDATIONS DE GESTION

FRANÇOIS MARICHAL

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN GESTION DES FORÊTS ET DES ESPACES NATURELS**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2017-2018

PROMOTEUR : HUGUES CLAESSENS

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.

REMERCIEMENTS

Je souhaite avant tout remercier mon promoteur Hugues Claessens pour le temps qu'il a consacré à répondre à mes questions et à me fournir de bons conseils. Ses relectures et son expérience ont été d'une aide précieuse pour la rédaction de ce travail.

Je remercie en particulier Laureline Claessens pour ses différentes relectures et son implication générale dans le projet et ce malgré une année assez chamboulée.

Je suis également reconnaissant envers Olivier Huart qui a su me mettre dans les meilleures dispositions pour la réalisation de ce travail. Son support et son implication se sont révélés être une aide précieuse pour mener à bien cette étude.

J'aimerais exprimer ma gratitude à tous les agents forestiers en charge du massif de la Croix-Scaille. Ceux-ci ont pris le temps de répondre de façon complète et rapide à mes nombreuses questions sur la zone d'étude. Leur expérience du terrain a en effet été d'une grande aide au cours de ma réflexion.

Merci également aux techniciens Antoine et Hassan qui m'ont prodigué une aide précieuse pour la mise en place de mon expérimentation.

Un petit mot également pour le CRAW et en particulier pour Anne Chandelier et Félix Teng avec qui les débats et les interactions autour de cette étude ont été très constructifs.

Enfin, un grand merci à ma famille et en particulier à mes parents qui m'ont supporté et soutenu tout au long de ce travail de fin d'études. Je les remercie également de m'avoir donné l'opportunité de réaliser ces études.

RÉSUMÉ

Depuis maintenant plusieurs années, le hêtre est en proie à un dépérissement global observé sur le massif de la Croix-Scaille. Dans le but d'améliorer la situation, il est nécessaire dans un premier temps d'expliquer ce dépérissement et ensuite d'imaginer des solutions permettant d'améliorer l'état sanitaire de la hêtraie et de la rendre plus résiliente en vue des enjeux futurs auxquels elle devra faire face.

Cette étude a permis de mettre en évidence plusieurs facteurs explicatifs du dépérissement. Un premier est la répétition d'évènements climatiques extrêmes accélérée par les changements climatiques. Ceux-ci se sont répétés à intervalle toujours plus court et ont participé à l'épuisement progressif des réserves énergétiques des arbres. Un autre facteur est l'âge trop avancé de la hêtraie précipitant celle-ci dans un état de sénescence naturelle. Le troisième facteur est une incompatibilité stationnelle locale. Cette incompatibilité est causée à la fois par une carence en éléments échangeables qui plonge les individus dans un état de stress trophique ainsi que par un tassement récurrent du sol.

Concernant les mesures de gestions, elles s'articulent autour d'une volonté de rendre la hêtraie plus résiliente face aux changements climatiques qui se profilent. Cela passe par l'application d'une sylviculture plus dynamique et centrée sur la valorisation d'une régénération abondante et variée. Celle-ci se concentrera sur la production d'arbres de haute valeur, mais sur une courte révolution, limitant ainsi au maximum les risques.

ABSTRACT

For several years, beech has fallen prey to a global decline observed on the Croix-Scaille massif. In order to improve the situation, it is first necessary to explain this decline and then to imagine solutions to improve the health status of the beech forest and make it more resilient for future challenges.

This study made it possible to highlight several explanatory factors of dieback. One is the repetition of extreme weather events accelerated by climate change. These have been repeated at ever shorter intervals and have contributed to the gradual depletion of the energy reserves of the trees. Another factor is the advanced age of the trees, precipitating them into a state of natural senescence. The third factor is a local stationary incompatibility. This incompatibility is caused by both a deficiency of exchangeable elements that plunges individuals into a state of trophic stress as well as recurrent soil compaction.

Concerning management measures, they revolve around a desire to make the beech stand more resilient in order to face climate change. This requires the application of a more dynamic silviculture focused on the valorization of abundant and varied regeneration. This will focus on the production of high value trees but on a short revolution in order to limit the risks as much as possible.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES FIGURES	I
TABLE DES TABLEAUX	III
1. INTRODUCTION	1
2. ZONE D'ÉTUDE	3
2.1 LOCALISATION	3
2.2 CLIMAT	4
2.3 TOPOGRAPHIE	5
2.4 SOLS ET TYPES DE STATIONS	5
3. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE	9
4. ÉTAT DES LIEUX	11
4.1 DONNÉES D'INVENTAIRES	11
4.2 STRUCTURE ET COMPOSITION.....	13
4.2.1 Zone d'étude	13
4.2.2 Commune de Gedinne.....	18
4.2.3 Région wallonne	20
4.3 RÉGÉNÉRATION NATURELLE.....	21
4.4 ÉTAT SANITAIRE	24
5. ENQUÊTE SUR LE DÉPÉRISSEMENT	28
5.1 HYPOTHÈSE D'UN INCIDENT CLIMATIQUE COMME FACTEUR DÉCLENCHANT	28
5.1.1 Matériel et méthode.....	28
5.1.2 Année 2003	29
5.1.3 Hiver 2009-2010	30
5.1.4 Année 2011	30
5.1.5 Année 2015	31
5.2 HYPOTHÈSE D'UNE RÉACTION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES.....	32
5.3 HYPOTHÈSE D'UN ÂGE TROP AVANCÉ FAVORISANT LE DÉPÉRISSEMENT DU HÊTRE	34
5.3.1 Matériel et méthode.....	34
5.3.1.1 Échantillonnage de hêtres à dater	34
5.3.1.2 Données récoltées.....	35
5.3.1.3 Protocole de récolte et de comptage des cernes	37
5.3.2 Analyses statistiques.....	39
5.3.3 Résultats et discussion.....	39
5.3.3.1 Comparaison des moyennes des âges des arbres sains et dépérissants.....	39
5.3.3.2 Comparaison des moyennes des circonférences des arbres sains et dépérissants	42
5.3.3.3 Analyse discriminante stepwise	43
5.4 HYPOTHÈSE D'UNE INCOMPATIBILITÉ STATIONNELLE	44
5.4.1 Alimentation hydrique.....	44
5.4.2 Alimentation minérale.....	45
5.4.3 Aptitude selon le fichier écologique des essences	47
5.4.4 Problématique du tassement de sol	49
6. DISCUSSION	52

6.1	PLACE DU HÊTRE EN TANT QU'ESSENCE	52
6.2	ÉVOLUTION ET FUTUR DE LA HÊTRAIE WALLONNE	52
6.3	LA HÊTRAIE DE LA CROIX-SCAILLE	54
7.	RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES	57
7.1	FREINER LES PRÉLÈVEMENTS DE GROS BOIS	57
7.2	DIVERSIFIER LA RÉGÉNÉRATION	58
7.3	DYNAMISER LA SYLVICULTURE	59
	7.3.1 <i>La méthode QD</i>	59
7.4	MESURES PRÉVENTIVES CONTRE LE TASSEMENT DE SOL.....	61
7.5	LUTTE CONTRE LA CARENCE MINÉRALE DU SOL.....	62
7.6	DÉFINITION D'UN NOUVEL ITINÉRAIRE SYLVICOLE.....	63
	7.6.1 <i>Objectifs généraux de l'itinéraire</i>	63
	7.6.2 <i>Itinéraire et travaux selon les stades de développement des arbres</i>	63
8.	CONCLUSION	65
9.	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	67
10.	ANNEXES	70
	TABLE DES ANNEXES	70
	ANNEXE 1 : FICHE TERRAIN	I
	ANNEXE 2 : DONNEES METEO STATION UCL	II
	ANNEXE 3 : METHODE DE COTATION DU HOUPPIER DEPEFEU.....	III
	ANNEXE 4 : TABLEAU DE DONNEES DE L'ÉCHANTILLONNAGE.....	VII
	ANNEXE 5 : PHOTOS ILLUSTRATIVES DE LA METHODE DE COMPTAGE DES CERNES SUR CAROTTES ET RONDELLES DE SOUCHE.....	VIII
	ANNEXE 6 : RESULTATS DES ANALYSES STATISTIQUES	X
	ANNEXE 7 : ATLAS CARTOGRAPHIQUE	XV

TABLE DES FIGURES

Figure 1. Limites géographiques de la zone d'étude et localisation à l'échelle de la Belgique	3
Figure 2. Diagramme ombrothermique de la station météo de la Croix-Scaille (données fournies par l'UCL).....	4
Figure 3. Carte topographique de la zone d'étude et de ses alentours	5
Figure 4. Cartographie des niveaux hydriques pour la zone d'étude.....	6
Figure 5. Cartographie des niveaux trophiques pour la zone d'étude	7
Figure 6. Cartographie des types de stations présents sur la zone d'étude	8
Figure 7. Organigramme de la méthodologie générale de l'étude	10
Figure 8. Localisation à l'échelle de la commune de Gedinne des placettes des deux sources de données d'inventaire.....	12
Figure 9. Cartographie de la répartition de la surface terrière sur la zone d'étude	14
Figure 10. Évolution du nombre de tiges à l'hectare en fonction de la circonférence pour la zone d'étude (données IFA) et courbe théorique de décroissance du nombre de tiges selon la méthode Fagneray	16
Figure 11. Évolution de la surface terrière à l'hectare en fonction de la circonférence pour la zone d'étude (données IFA) et courbe théorique d'équilibre de la surface terrière à l'hectare selon la méthode Fagneray	16
Figure 12. Représentation du pourcentage de recouvrement par essence	17
Figure 13. Évolution du nombre de tiges à l'hectare en fonction de la circonférence pour la Région wallonne (données IPRFW) et courbe théorique de décroissance du nombre de tiges selon la méthode Fagneray.....	20
Figure 14. Évolution de la surface terrière à l'hectare en fonction de la circonférence pour la Région wallonne (données IPRFW) et courbe théorique d'équilibre de la surface terrière à l'hectare selon la méthode Fagneray	21
Figure 15. Cartographie du recouvrement de la régénération naturelle par placette	23
Figure 16. Cartographie de la répartition de la régénération naturelle par stade de développement	24
Figure 17. Photo illustrative des anomalies de structure du houppier (localisation : Louette Saint-Pierre).....	25
Figure 18. Répartition de l'orientation des carpophores pour les arbres touchés sur la zone d'étude (données F. Marichal).....	26
Figure 19. Aire de distribution naturelle du hêtre en Europe en fonction du gradient d'altitude (Latte et al., 2017).....	33
Figure 20. Distribution des hêtraies dans un diagramme climatique (Latte et al., 2017) et cas de la Croix-Scaille (source : UCL).....	33

Figure 21. Localisation des arbres sélectionnés sur fond IGN.....	36
Figure 22. Risque lié au carottage	38
Figure 23. Schéma de collage de la carotte sur son support.....	38
Figure 24. Carotte avant ponçage	38
Figure 25. Carotte après ponçage	38
Figure 26. Résultats du test d'égalité des moyennes des âges (test t de Student)	41
Figure 27. Boxplot des moyennes des âges des échantillons d'arbres sains et dépérissants	41
Figure 28. Résultats du test d'égalité des moyennes des circonférences (test t de Student)	42
Figure 29. Boxplot des moyennes des circonférences des échantillons d'arbres sains et dépérissants	43
Figure 30. Récapitulatif du processus de sélection	44
Figure 31. Localisation des points de prélèvement des échantillons (TFE Gaëtan Engelmann).....	46
Figure 32. Écogramme du hêtre et pourcentage de surface du massif de la Croix-Scaille projeté dans celui-ci ..	48
Figure 33. Cartographie des classes d'aptitude du hêtre sur la zone d'étude	49
Figure 34. Courbes de productivité du hêtre en Wallonie et sur le massif de la Croix-Scaille (comparaison avec le bouleau).....	54

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1. Données de topographie et de localisation de la zone d'étude	3
Tableau 2. Données climatiques de la commune de Gedinne (période de référence : 1981-2010 ; IRM, 2014)....	4
Tableau 3. Répartition des types de sols sur la zone d'étude	6
Tableau 4. Pourcentage de surface par type de station	8
Tableau 5. Modalités techniques des différentes sources de données d'inventaire.....	12
Tableau 6. Comparatif des données dendrométriques pour les différentes sources de données d'inventaires..	15
Tableau 7. Répartition des pourcentages et types de régénération en fonction de l'essence	22
Tableau 8. Températures et précipitations pour les mois d'août et de septembre 2003	30
Tableau 9. Précipitations mensuelles et moyennes pour les mois de novembre et de décembre 2009	30
Tableau 10. Précipitations mensuelles et moyennes pour les mois de mars, avril et mai 2011	31
Tableau 11. Précipitations mensuelles et moyennes pour les mois de décembre 2011 et janvier 2012.....	31
Tableau 12. Statistiques descriptives des données d'âge	40
Tableau 13. Pourcentage de surface associée à chaque zone de niveau hydrique	45
Tableau 14. Pourcentage de surface associé à chaque zone de niveau trophique	46
Tableau 15. Teneurs (mg/100g) en éléments échangeables dans la couche de 0-20 cm du sol du massif de la Croix-Scaille (TFE Gaëtan Engelmann).....	47
Tableau 16. Teneurs (mg/100g) en éléments échangeables à dépasser dans la couche de 0-20 cm pour une sylviculture de production en hêtre	47
Tableau 17. Pourcentage de surface par type de zone après croisement des niveaux hydriques et trophiques .	49

1. INTRODUCTION

Le hêtre (*Fagus sylvatica* L.) représente en Région wallonne l'espèce climacique par excellence. Ce qualificatif renvoie à la notion de climax qui correspond à l'état final d'une succession écologique, soit l'état le plus stable dans des conditions abiotiques existantes. En clair, en l'absence de perturbations et sans l'intervention humaine c'est bien l'essence hêtre qui dominerait le paysage wallon formant ainsi un climax écologique. Cependant, la réalité est bien différente puisque depuis la mainmise de l'homme sur la gestion de la matrice forestière, c'est bel et bien l'épicéa et le chêne qui dominent largement nos forêts. À l'échelle wallonne, la hêtraie ne représente que 43 700 hectares soit environ 9% de la forêt productive (Alderweireld et al., 2015). Dans ce contexte, il existe malgré tout en Wallonie de larges hêtraies représentant des surfaces de plusieurs centaines d'hectares voire milliers pour les plus grandes.

Dans le cadre de ce travail, l'étude se portera sur la hêtraie de la Croix-Scaille laquelle représente une surface d'environ 500 hectares. La Croix-Scaille est un massif forestier d'environ 3500 hectares situé sur un plateau ardennais et culminant à une altitude dépassant les 500 mètres. La majorité du massif est en forêt publique et est par conséquent pourvu de quantité de chemins balisés, ceci faisant de cet endroit un haut lieu du tourisme namurois, centré sur la tour du millénaire. Outre la hêtraie, le massif de la Croix-Scaille est composé d'autres types d'habitats tels que des landes, des tourbières, de vastes pessières ou encore des boulaies. À noter que la quasi-totalité du massif est classée Natura 2000 et un Projet Life centré sur la Croix-Scaille a permis de restaurer de nombreux habitats ouverts d'intérêt.

Malgré la bonne représentativité du hêtre dans ce massif, il apparaît que cette essence rencontre quelques difficultés en ce début du XXI^{ème} siècle. En effet, à l'échelle de la zone d'étude et pour des raisons difficilement explicables, un dépérissement général est actuellement observé sur le hêtre. Globalement, ce dépérissement de la hêtraie se caractérise par une déstructuration des peuplements avec la non-représentativité de l'entièreté des classes de grosseur ou encore l'apparition de trouées dues à un couvert très clair de la futaie. Individuellement, les arbres malades présentent des carpophores, des décollements d'écorce ou encore d'anciennes attaques de scolytes. Ces individus possèdent généralement des anomalies au niveau de la formation du houppier avec globalement une déficience en ramification fine. Ces symptômes sont visibles depuis le début des années 2000 (à la suite de la crise sanitaire du hêtre) et sont présents de façon éparse sur l'entièreté de la zone d'étude.

Suite à l'observation d'un mauvais état de la hêtraie sur le massif de la Croix-Scaille, le DNF¹ de Beauraing, gestionnaire des lieux, a mandaté l'organisation d'une étude afin d'expliquer ce phénomène et de tenter d'y adapter sa gestion. Les observations récentes font état d'une dégradation de l'état sanitaire, d'une déstructuration et de problèmes de composition ainsi que de qualité de la régénération. Le cantonnement de Beauraing gérant une large étendue de hêtraie, il est primordial de comprendre la problématique afin de trouver des solutions adaptées, garantissant un futur à cette forêt. Les échéances d'aménagement arrivant fin 2019, le DNF se pose la question de savoir comment orienter sa stratégie de gestion de la hêtraie.

Plus concrètement, les objectifs de ce travail sont tout d'abord de faire un état des lieux de la situation. Ensuite, une large partie est consacrée au développement d'hypothèses expliquant cette dégradation de l'état de la hêtraie. Une première possibilité est l'âge trop avancé de la hêtraie qui provoquerait un état de sénescence et donc le dépérissement progressif des arbres. Ensuite, une autre hypothèse est un évènement climatique extrême qui aurait, à la façon de la crise sanitaire du début des années 2000, plongé cette hêtraie dans un état de dépérissement. En outre, il faut également prendre en compte les éventuelles premières conséquences des changements climatiques. En effet, ces changements globaux pourraient avoir pour effets une augmentation globale de la température moyenne ainsi qu'une augmentation de la fréquence des évènements climatiques extrêmes. Une dernière hypothèse est la possible incompatibilité stationnelle entre l'essence hêtre et le massif de la Croix-Scaille. Cette incompatibilité progressive serait le résultat d'une part d'un sol, par endroit, trop carencé, trop humide ou encore présentant un régime hydrique alternatif. D'autre part l'explication viendrait d'un trop important tassement du sol qui serait le résultat notamment des exploitations répétées visant à récolter les arbres malades durant les 20 dernières années.

Enfin, la finalité de cette étude est de proposer au gestionnaire de la hêtraie de la Croix-Scaille des méthodes de gestion efficaces pour d'une part limiter ce dépérissement et d'autre part se tourner vers des méthodes de gestion alternatives, innovantes et prenant en compte les enjeux futurs auxquels la forêt devra faire face.

¹ Département de la Nature et des Forêts – Service Public de Wallonie

2.2 CLIMAT

Tableau 2. Données climatiques de la commune de Gedinne (période de référence : 1981-2010 ; IRM, 2014)

Température			Précipitations	Jours de gel annuel	
Moyenne	Maximale	Minimale	Cumul annuel	Total	Gel sévère ³
8,7°C	12,9°C	4,5°C	1206,5 mm/an	85,8 jours/an	5,0 jours/an

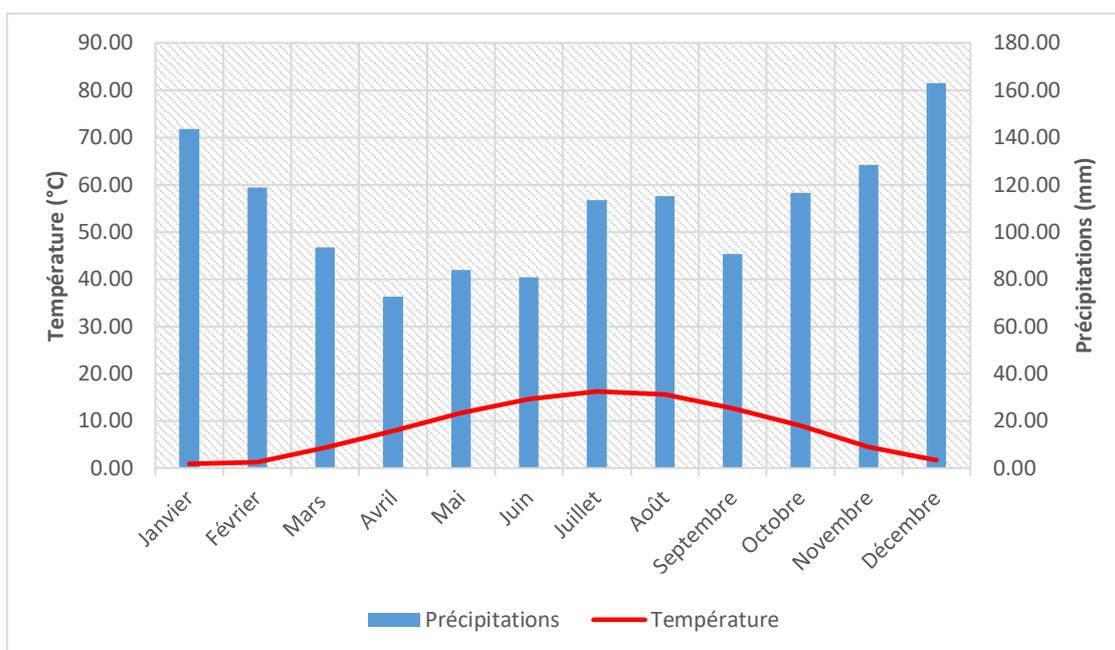


Figure 2. Diagramme ombrothermique de la station météo de la Croix-Scaille (données fournies par l'UCL)⁴

Le climat de la zone d'étude est de type ardennais. Il se caractérise par des précipitations élevées (> 1200 mm/an) combinées à une faible température moyenne (< 9°C). Le facteur différenciant ce climat de celui des régions environnantes est l'altitude élevée du massif de la Croix-Scaille. Outre le relief, la couverture forestière, grâce à l'absorption d'une large partie du rayonnement solaire, contribue également à ce climat frais et humide.

³ Nombre moyen de jours où la température minimale est inférieure à -10°C

⁴ Voir annexe 2 pour le tableau de données

2.3 TOPOGRAPHIE

La topographie de la zone d'étude est assez contrastée avec une altitude variant de 350 mètres à plus de 500 mètres au point le plus haut (figure 3). De façon générale, la hêtraie se situe à une altitude supérieure à 400 mètres.

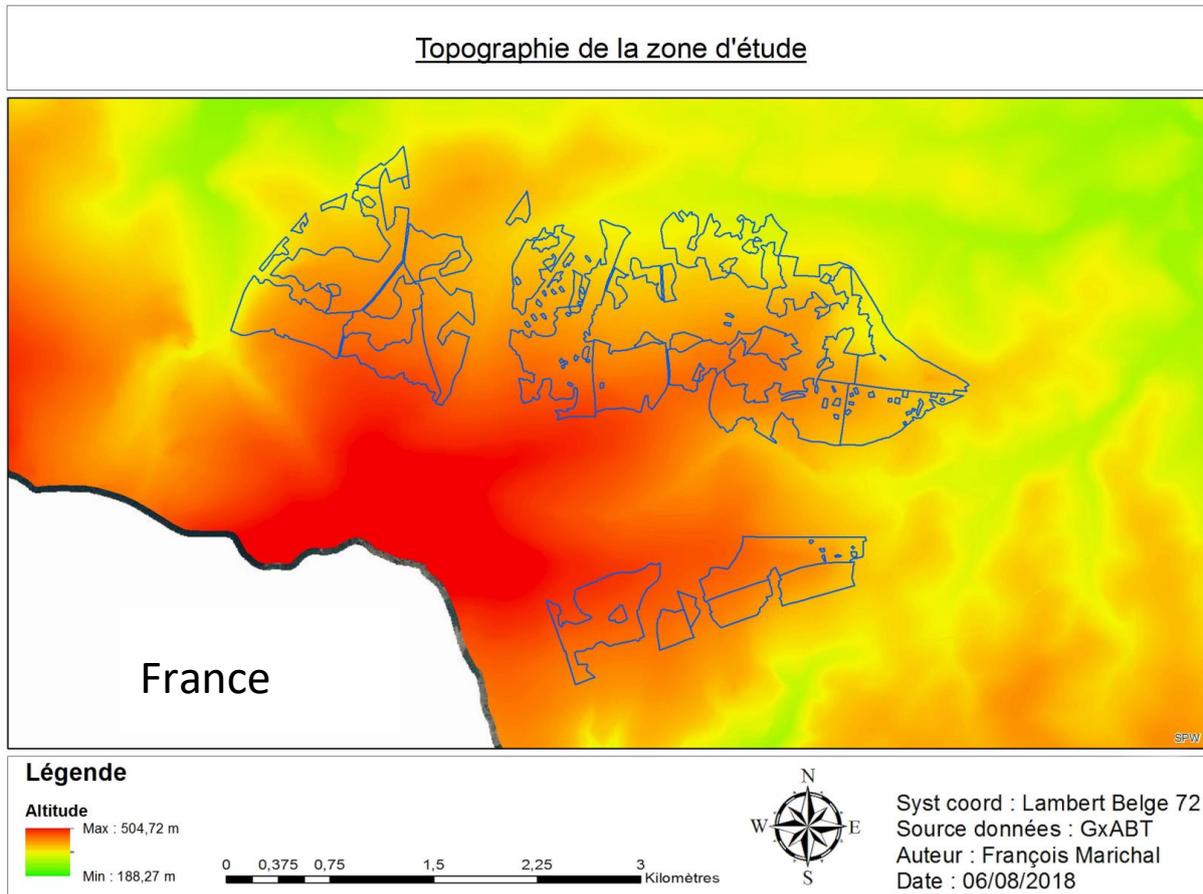


Figure 3. Carte topographique de la zone d'étude et de ses alentours

2.4 SOLS ET TYPES DE STATIONS

Sur la quasi-entièreté de la zone d'étude, on retrouve des sols bruns limono-caillouteux (G). En quelques rares endroits, la charge est plus faible, faisant passer le type de sol à peu caillouteux (tableau 3).

Le drainage est généralement modéré (c) à favorable (b). Plus rarement, le drainage est pauvre (i), mais globalement il reste correct pour le hêtre.

La charge quant à elle est majoritairement de type schisto-gréseuse ou gréseuse (r) et plus rarement schisto-phylladeuse (fi), conduisant à des sols oligotrophes.

En outre, la phase définit un substrat débutant à plus de 80 cm ou 125 cm de profondeur (0_1).

Ensuite, l'extrême majorité de la zone d'étude présente une exposition neutre et l'apport d'eau provient donc exclusivement des précipitations.

Tableau 3. Répartition des types de sols sur la zone d'étude

Sigle pédologique	Surface (ha)	Pourcentage
Gbb	329,34	66,11%
Gcb	93,38	18,74%
Gix	39,86	8,00%
Gdb	16,32	3,28%
Gcf	4,81	0,96%
Gbf	8,51	1,71%
Ghx	5,94	1,19%

De façon générale, le niveau hydrique varie entre 0 et 1 reflétant une bonne alimentation en eau. En revanche, le niveau trophique est relativement acide et presque constamment à une valeur de -2. Cependant, comme le montrent les figures 4 et 5, ces niveaux hydriques et trophiques peuvent localement prendre des valeurs plus extrêmes.

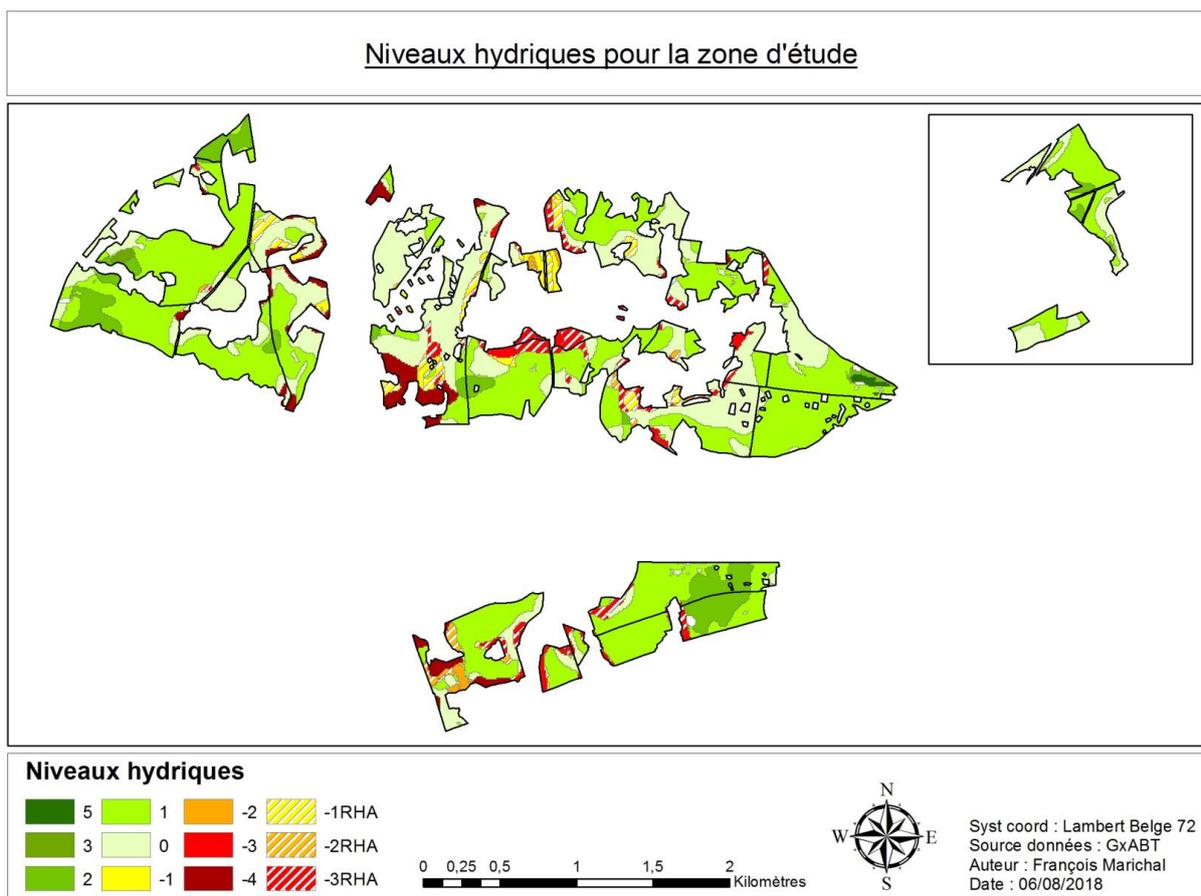


Figure 4. Cartographie des niveaux hydriques pour la zone d'étude

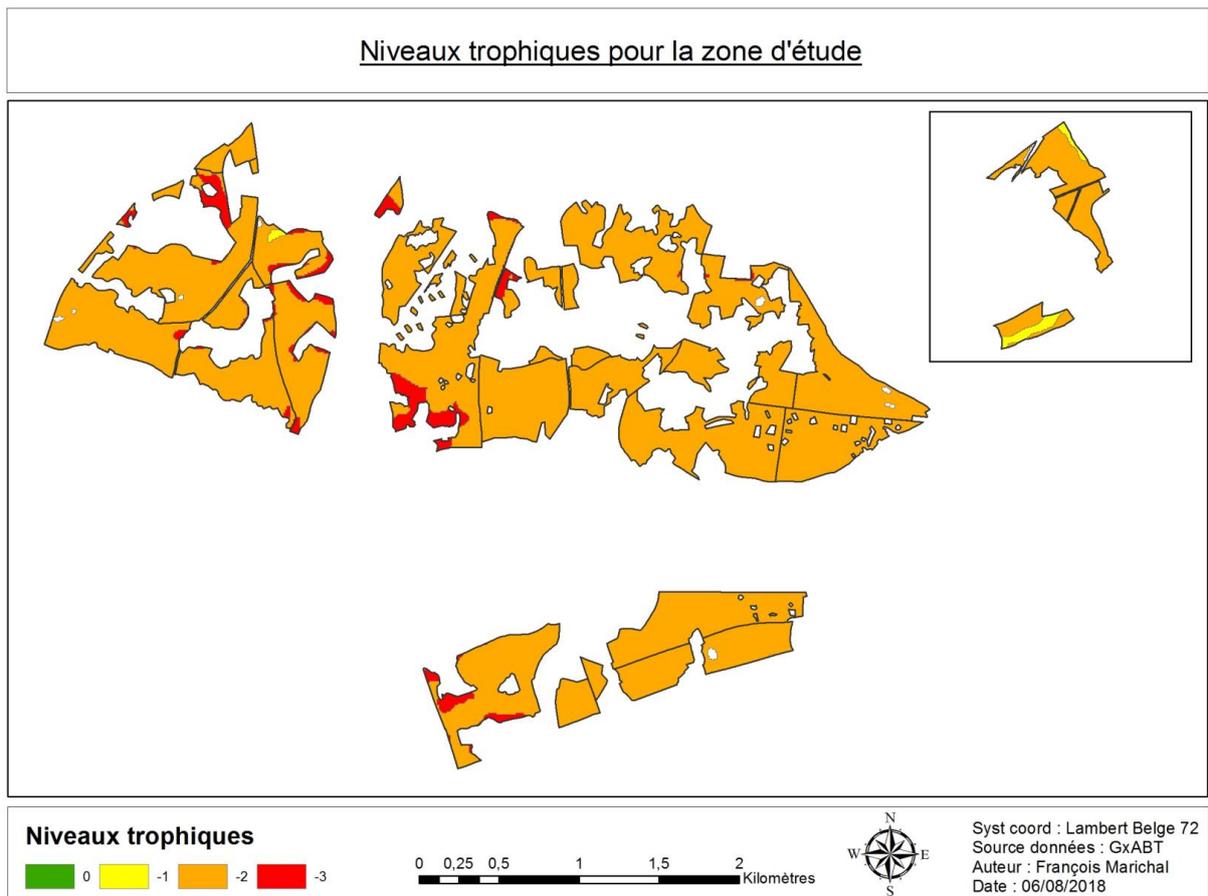


Figure 5. Cartographie des niveaux trophiques pour la zone d'étude

Ces conditions édaphiques définissent trois principaux types de stations (figure 6). Le plus représenté est la hêtraie à luzule qui couvre près de 90% de la surface totale. Cette hêtraie à luzule se décompose de la manière suivante : 81% de hêtraie acidophile, 5% de hêtraie humide, 2% de hêtraie hygrosциaphile et enfin moins de 1% de hêtraie sèche. Viennent ensuite les sols à argiles blanches (5% d'argiles blanches à RHA et 3% d'argiles blanches humides). La troisième station est la chênaie acidophile avec un peu moins de 3% de la surface. On peut aussi distinguer deux types de stations qui sont tout à fait marginaux avec 0,11% de tourbières acides et à peine un are de fond de vallée humide (voir tableau 4). Ils seront considérés comme négligeables, et peut-être même liés à des imprécisions cartographiques.

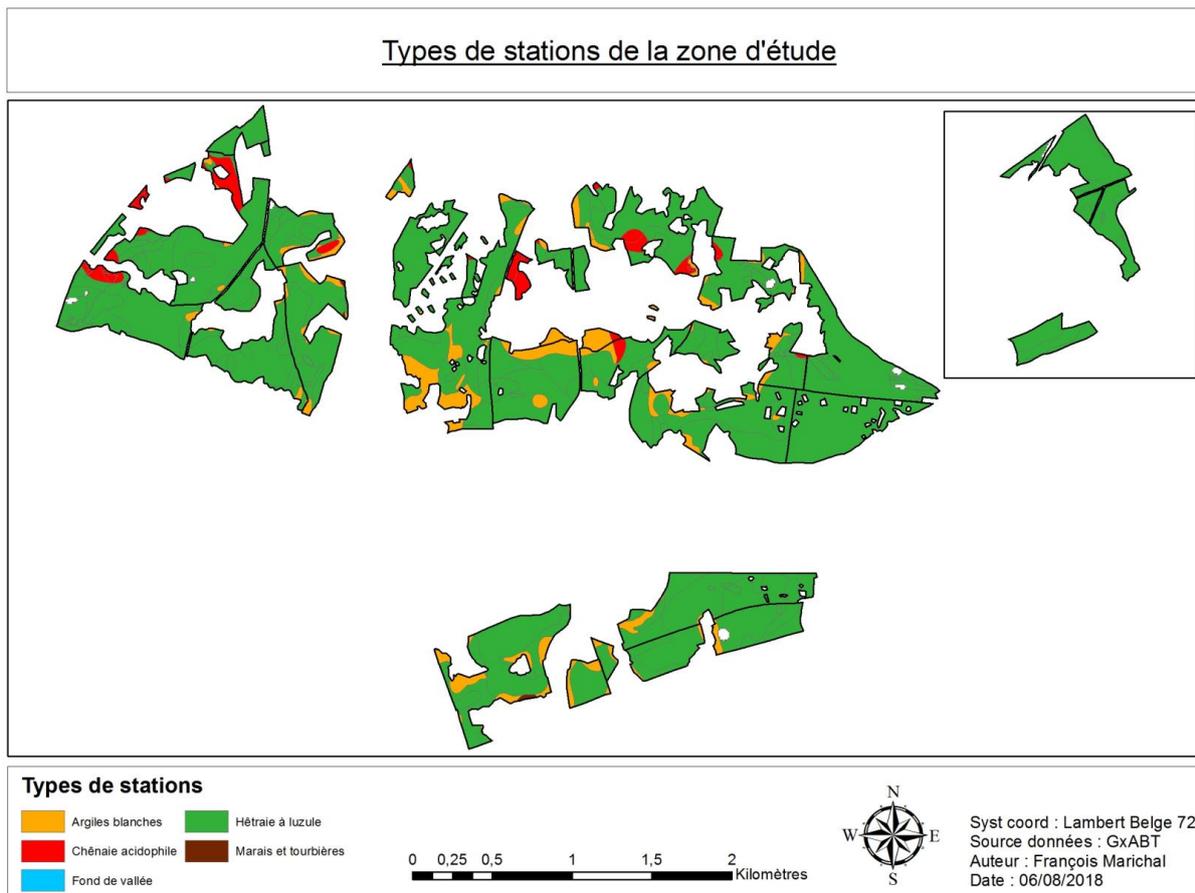


Figure 6. Cartographie des types de stations présents sur la zone d'étude

Tableau 4. Pourcentage de surface par type de station

Type de station	Surface (ha)	Pourcentage
Hêtraie à luzule	450,60	88,90%
Argiles blanches	41,29	8,15%
Chênaie acidophile	14,43	2,85%
Marais et tourbières	0,55	0,11%
Fond de vallée	0,01	0,00%

3. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

La méthodologie générale de ce travail s'articule autour de deux objectifs principaux. Le premier est de développer des hypothèses visant à expliquer l'état dégradé de la hêtraie tandis que le second a pour but de fournir au gestionnaire des méthodes de gestion pour la hêtraie de la Croix-Scaille (figure 7).

Avant de pouvoir fournir ces hypothèses, il est nécessaire d'établir un état des lieux de la situation. Cet état des lieux s'obtient en caractérisant toute une série de paramètres descriptifs propres cette hêtraie (la structure et la composition, la régénération naturelle, l'état sanitaire, l'historique climatique, l'âge des hêtres ou encore l'adéquation stationnelle).

Afin d'obtenir une description complète de ces éléments, il est nécessaire d'une part d'analyser les données à disposition et d'autre part de réaliser des mesures visant à étoffer les données manquantes. Dans le cadre de cette étude, les données utilisées proviennent de l'inventaire permanent des ressources forestières de Wallonie (données d'inventaire IPRFW), du DNF (inventaire IFA), de l'UCL (données météo) ou encore du Service Public de Wallonie (fichier écologique des essences). Enfin, la complétion des données est assurée d'une part via une expérimentation visant à quantifier l'âge des arbres sur base d'un comptage des cernes, et d'autre part via une analyse de la station (travail de caractérisation des ressources minérales du sol par Gaëtan Engelmann).

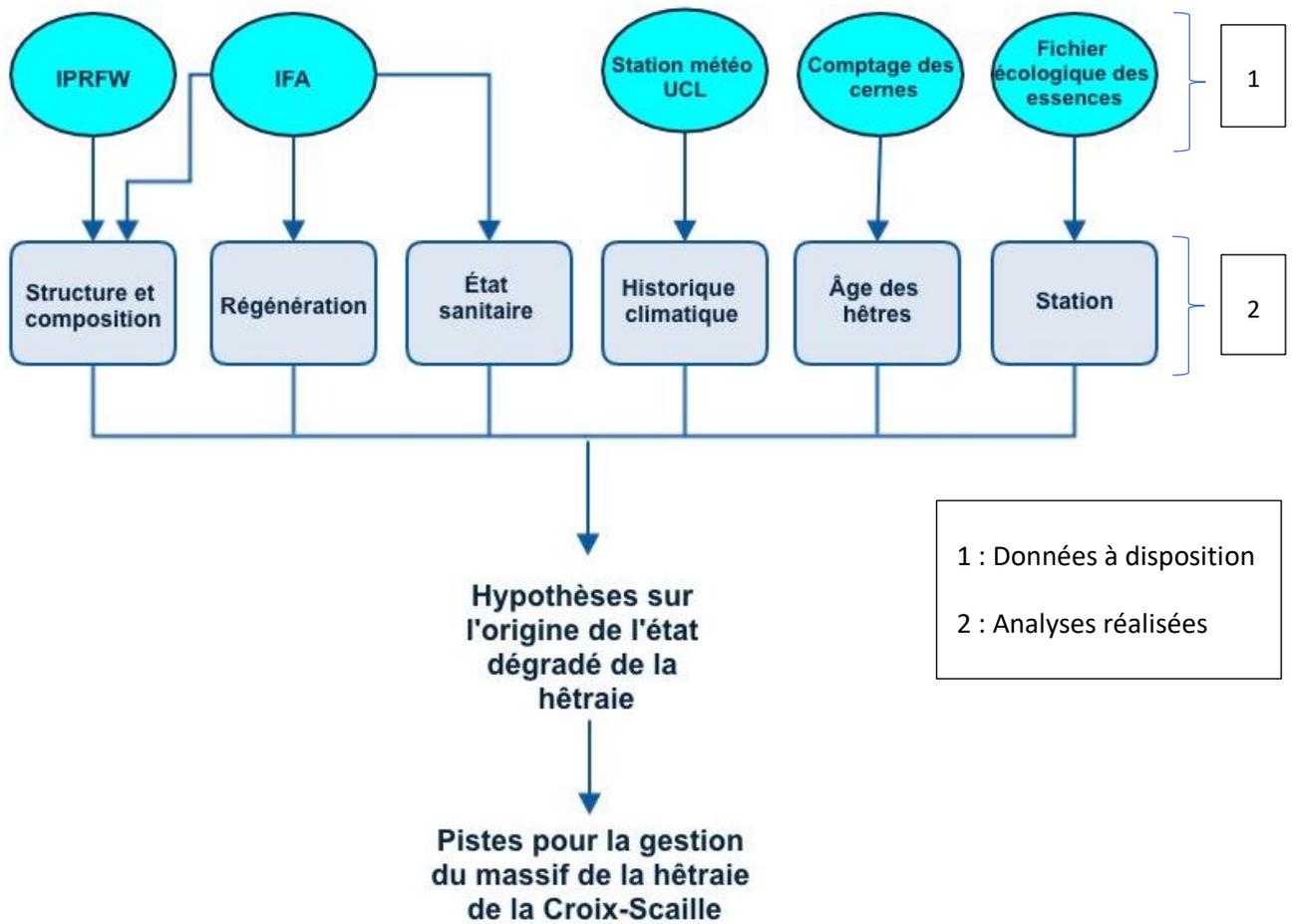


Figure 7. Organigramme de la méthodologie générale⁵ de l'étude

⁵ Méthodologies spécifiques à chaque analyse développées dans chacun des chapitres concernés

4. ÉTAT DES LIEUX

4.1 DONNÉES D'INVENTAIRES

Deux sources de données permettent de faire un état des lieux dendrométrique de la hêtraie de la Croix-Scaille et de la placer dans son contexte local et régional.

La première source de données est un inventaire d'aménagement mis en place par le DNF en 2017 (inventaire IFA⁶). Cet inventaire se compose de 88 unités d'échantillonnage réparties sur la zone d'étude à raison d'un point par six hectares (grille de 300 m x 200 m). Les données fournies sont diverses et variées comme par exemple le NHA, le GHA, le VHA, la HDOM⁷, le recouvrement de régénération ou encore l'état sanitaire global. Cet inventaire permet d'avoir une idée plus précise de la structure et de la composition des peuplements au sein de la zone d'étude. Cependant, il faudra attendre plusieurs années et plusieurs phases de remesurage pour obtenir des informations précises sur l'accroissement et la productivité des peuplements.

La seconde source est l'inventaire permanent des ressources forestières de Wallonie (IPRFW). Cet organisme a mis en place sur l'ensemble du territoire wallon des placettes d'inventaire avec une grille de 500 m x 1000 m (soit une placette pour 50 hectares). Certaines de ces placettes ont été remesurées, ce qui permet de fournir des données d'accroissement. Seules quelques placettes de cet inventaire permanent tombent dans la commune de la zone d'étude (23 placettes dont 6 ont été remesurées), mais cela permet tout de même de donner une idée plus ou moins précise de la productivité et de l'accroissement dans la région. Cette seconde source de données est donc complémentaire à la première qui ne pouvait pas fournir d'information sur la productivité. L'IPRFW fournit également des données pour l'ensemble de la Région wallonne. Cette information à large échelle est un bon moyen de comparer les données dendrométriques mesurées pour la zone d'étude avec les moyennes à l'échelle wallonne. Ainsi, cela permet de se faire une idée précise des caractéristiques de la hêtraie en comparaison avec le contexte wallon. À noter cependant que le seuil d'inventaire est différent

⁶ IFA = inventaire forestier d'aménagement

⁷ NHA = nombre de tiges à l'hectare

GHA = surface terrière à l'hectare

VHA = volume à l'hectare

CMOY = circonférence moyenne

AMC = accroissement moyen en circonférence

AMV = accroissement moyen en volume

C150 = circonférence à 150 cm de hauteur

pour les deux sources de données d'inventaire. En effet, le seuil de l'IPRFW est de 22 cm tandis que celui du DNF est de 40 cm.

Tableau 5. Modalités techniques des différentes sources de données d'inventaire

	IPRFW Wallonie	IPRFW Gedinne	IFA Zone d'étude
Maille (m)	1000 x 500	1000 x 500	300 x 200
Nombre UE	1000	23	88
Rayon UE ⁸ (m)	18	18	15
Taille UE (ares)	10	10	7
Hauteur de mesure (cm)	150	150	150
Seuil inventaire (cm)	22	22	40
Date de mesure	1994-2017	1997-2017	2017
Nombre d'UE remesurés	/	6	0

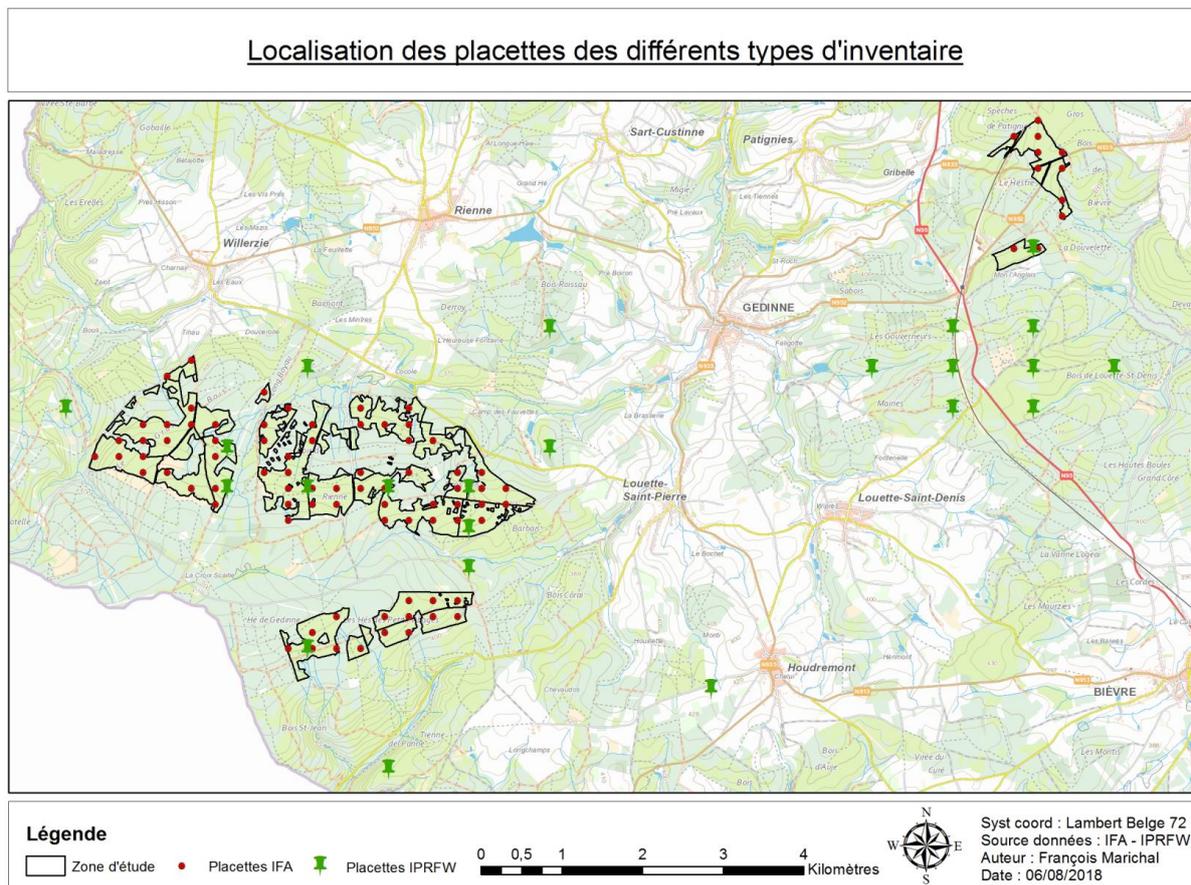


Figure 8. Localisation à l'échelle de la commune de Gedinne des placettes des deux sources de données d'inventaire

⁸ Unité d'échantillonnage

4.2 STRUCTURE ET COMPOSITION

4.2.1 Zone d'étude

La zone d'étude comporte une hêtraie d'environ 500 hectares dans laquelle on retrouve, disposés de façon éparse sur les zones de sols hydromorphes, quelques îlots résineux. Globalement, la structure de cette hêtraie est de type irrégulier, avec une relative importance de gros bois.

Premièrement, le NHA de la zone d'étude (210 tiges/ha) est bien inférieur à la moyenne wallonne et au NHA de Gedinne (moins de la moitié des valeurs wallonne et gedinnoise ; tableau 6). Intuitivement, il serait logique de penser que, puisqu'on est en présence d'une forêt rajeunie dans la zone d'étude, il y a en principe un nombre plus important de tiges. Néanmoins, le peuplement a été rajeuni début des années 2000 donc c'est sans doute encore trop tôt pour que la régénération ait eu le temps de dépasser le seuil d'inventaire. Ces différences dans les chiffres sont donc expliquées en grande partie par le fait que les seuils d'inventaires ne sont pas les mêmes entre l'IPRFW et le DNF (22 cm contre 40 cm ; tableau 5) donc logiquement plus de petits bois sont inclus pour les inventaires de Gedinne et de la Wallonie, car le passage à la futaie est plus précoce.

En outre, le GHA de la zone d'étude (19,8 m²/ha dont 16,7 m²/ha uniquement pour le hêtre) est à la fois inférieur à la moyenne de Gedinne et au GHA moyen wallon (22 m²/ha). Le fait que le GHA de l'inventaire DNF soit 10% inférieur à celui des deux autres sources de comparaison s'explique à nouveau par le nombre important de petites tiges non prises en compte dans l'inventaire (car ne dépassant pas le seuil d'inventaire). À noter que ce GHA est relativement hétérogène au sein de la zone d'étude. En effet, près d'un tiers du massif possède un GHA inférieur à 12 m²/ha (figure 9).

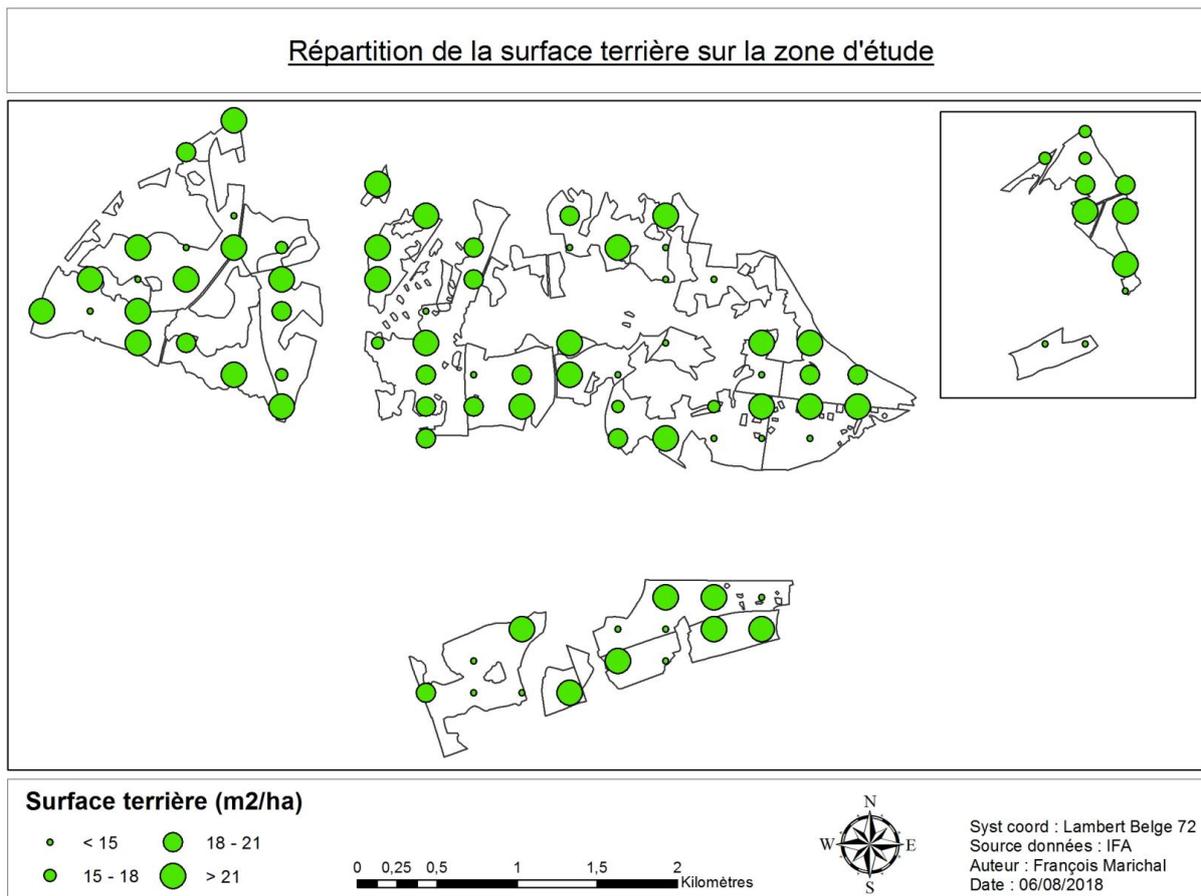


Figure 9. Cartographie de la répartition de la surface terrière sur la zone d'étude

De la même façon, le VHA de la zone d'étude (226 m³/ha) est du même ordre de grandeur, mais inférieur à celui de la commune de Gedinne (254 m³/ha) et à celui en Région wallonne (255 m³/ha). On pourrait à nouveau justifier cela par le probable rajeunissement de la hêtraie étudiée. Ce rajeunissement passe par une diminution du nombre de gros et très gros bois dans les peuplements ce qui implique une diminution globale du volume sur pied à l'hectare.

De plus, la circonférence moyenne de la zone d'étude (109 cm) est bien plus élevée que la valeur moyenne en Wallonie (+40%). Cela s'explique sans doute par le fait que la hêtraie de la zone d'étude reste à l'échelle wallonne une hêtraie peu structurée avec un étage dominant de gros bois, et ce malgré le récent rajeunissement. On retrouve en effet dans ces peuplements une plus forte proportion de gros et très gros bois en comparaison avec l'entièreté de la Wallonie (voir figures 10 et 13 : courbes des NHA en fonction des classes de circonférence).

Tableau 6. Comparatif des données dendrométriques pour les différentes sources de données d'inventaires

Données	IPRFW Wallonie	IPRFW Gedinne	IFA Zone d'étude
<i>NHA (nb tiges/ha)</i>	454	551	210
<i>GHA (m²/ha)</i>	22	22	19,8
<i>VHA (m³/ha)</i>	255	254	226
<i>CMOY (cm)</i>	78	67	109
<i>AMC (cm/an)</i>	1,3	1,5	/
<i>AMV (m³/ha/an)</i>	6	3,1	/
<i>C150 quadratique (cm)</i>	78	71	109

L'inventaire forestier d'aménagement (IFA) montre que la structure de la hêtraie est assez éloignée de la structure classique en « j inversé » d'une futaie irrégulière théorique (figure 10, courbe en rouge méthode Fagneray). Cette structure possède une déficience en tiges dans les catégories de moyenne grosseur (90 à 130 cm). En revanche, la structure est dotée d'un surplus des grosses catégories de grosseur (170 à 210 cm) qui s'observe très clairement en termes de surface terrière (figure 11). Cette observation est typique des hêtraies vieillissantes résultantes d'une importante capitalisation du volume sur pied. En effet, les bois arrivant à une circonférence entre 150 et 190 cm ont été conservés dans le but d'en tirer un profit plus important lors de la vente (une fois la catégorie 200 cm atteinte). À noter que cette caractéristique devait sans doute être encore plus flagrante avant la crise du hêtre. En effet, cet événement a mené à la coupe sanitaire de beaucoup d'individus de grosse circonférence abaissant ainsi le NHA de ces catégories.

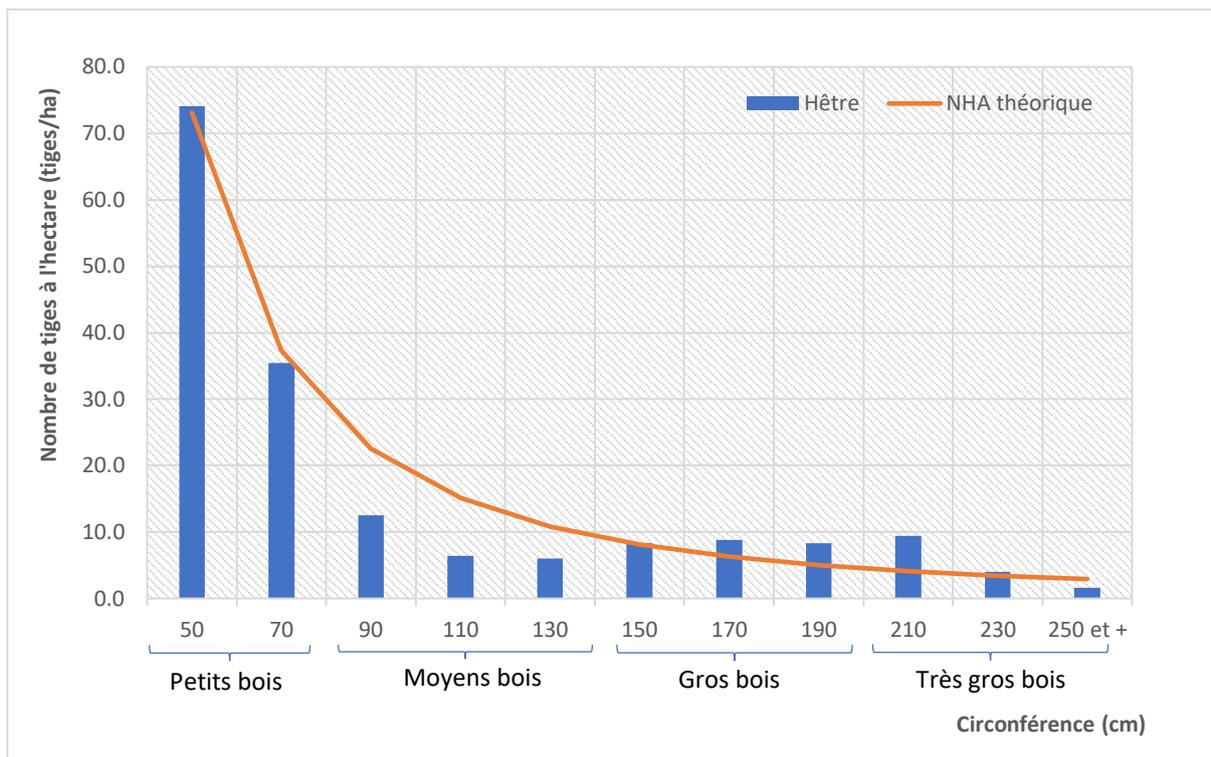


Figure 10. Évolution du nombre de tiges à l'hectare en fonction de la circonférence pour la zone d'étude (données IFA) et courbe théorique de décroissance du nombre de tiges selon la méthode Fagneyr

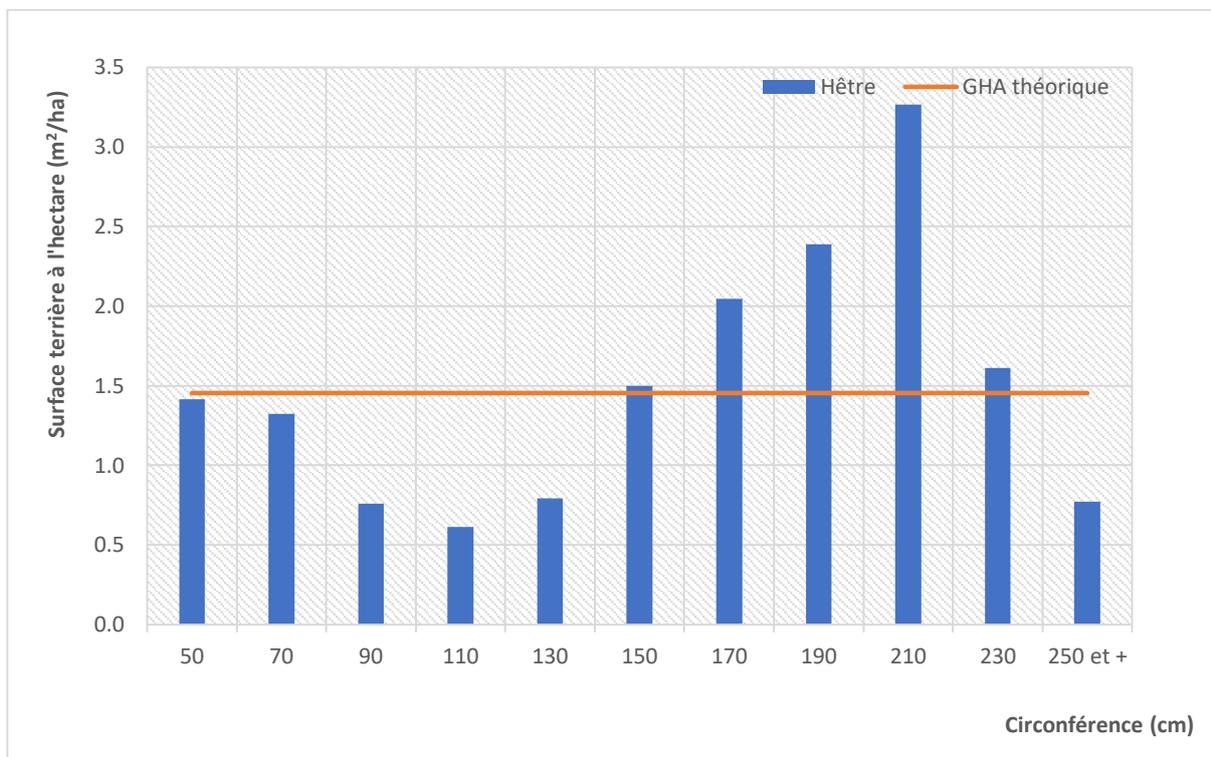


Figure 11. Évolution de la surface terrière à l'hectare en fonction de la circonférence pour la zone d'étude (données IFA) et courbe théorique d'équilibre de la surface terrière à l'hectare selon la méthode Fagneyr

Du point de vue de la composition en essences, la hêtraie est très peu diversifiée et majoritairement dominée par le hêtre (84%). En effet, en plus du hêtre, on retrouve quelques chênes sessiles (*Quercus petraea*), du bouleau (*Betula sp.*) et un peu de sorbiers (*Sorbus aucuparia*) en accompagnement (figure 12). Les zones proches des îlots résineux sont par contre beaucoup plus diversifiées. On retrouve dans ces endroits une multitude d'essences résineuses comme l'épicéa (*Picea abies*), l'épicéa de Sitka (*Picea sitchensis*), le douglas (*Pseudotsuga menziesii*), le mélèze (*Larix sp.*) ou encore le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*). Cette faible diversité d'essences feuillues et à l'inverse la très bonne diversité en essences résineuses résultent sans aucun doute du climat rigoureux ardennais et des conditions pauvres et acides du sol. De plus, le faible nombre d'essences feuillues est sans doute également le résultat de la pression du gibier sur la régénération naturelle dans cette zone, en particulier sur des essences comme le chêne ou le sorbier.

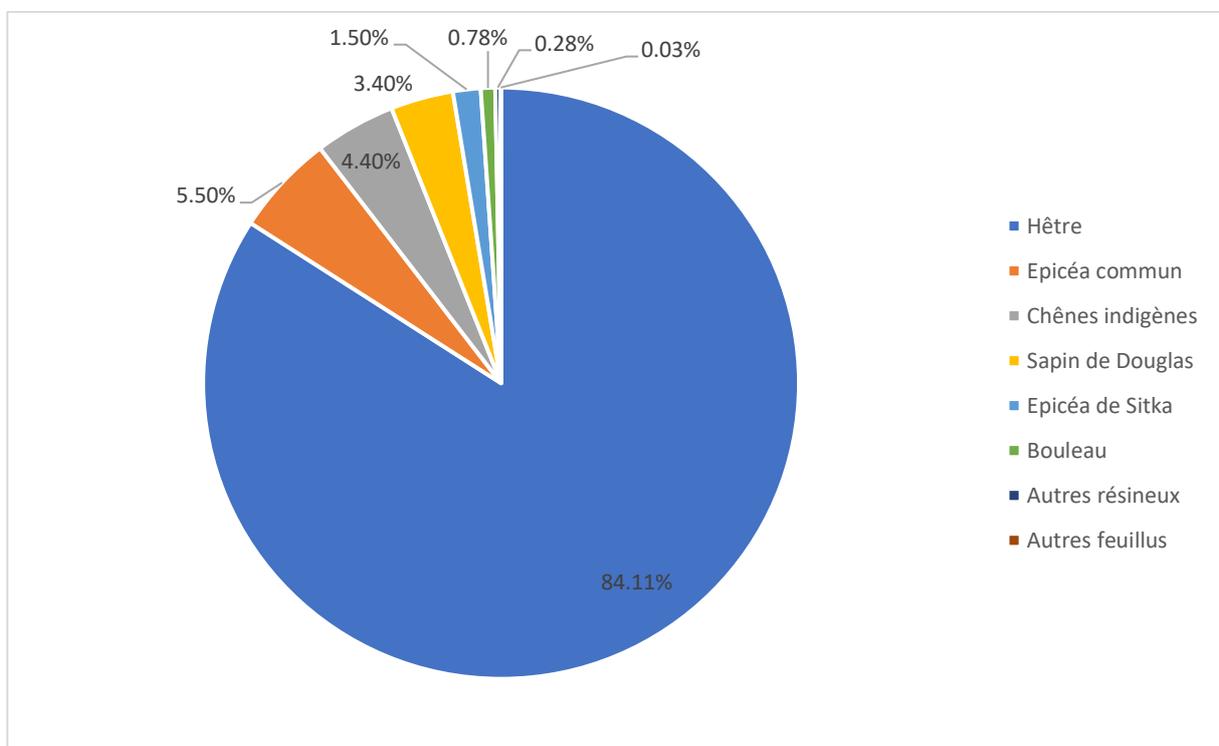


Figure 12. Représentation du pourcentage de recouvrement par essence

Problématique

Depuis le début des années 2000, la hêtraie a été fortement exploitée en raison des récents soucis sanitaires rencontrés dans cette région. En effet, la hêtraie de Gedinne ayant été fortement touchée par la crise sanitaire du hêtre, ce sont des milliers de mètres cubes de bois qui se sont retrouvés subitement sur le marché. Dans le but de limiter les pertes financières, les gestionnaires forestiers ont rapidement abattu les arbres malades afin de ne pas laisser le bois pourrir et ainsi de le valoriser au maximum. Cependant, c'est l'effet inverse qui s'est produit : l'abondance de matière première a précipité la chute des prix du hêtre. À noter également un fort impact sur le marché de la tempête de 1999 en France. En effet,

l'abondance de chablis en un court laps de temps à largement participé à l'effondrement des prix du hêtre.

Ensuite, petit à petit, le marché s'est redressé et le prix du hêtre a progressivement augmenté (sans pour autant atteindre les valeurs d'avant crise). De nouveau, à la suite du récent dépérissement étudié dans ce travail, les gestionnaires forestiers ont tendance à récolter ce qui peut encore l'être avant que le dépérissement ne soit trop important. Cette phase nouvelle va encore plus mettre à mal les peuplements toujours meurtris par la crise du hêtre du début des années 2000. En effet, le dépérissement touchant principalement les gros bois, c'est donc ceux-ci qui sont massivement exploités par les propriétaires.

4.2.2 Commune de Gedinne

Premièrement, selon l'IPRFW, le NHA de la commune de Gedinne (551 tiges/ha) est supérieur à la moyenne des hêtraies wallonne (+21%). Cela s'explique sans doute par la présence d'une bonne régénération dans cette zone avec une probable abondance de petits bois dans les peuplements. À noter que dans les deux cas, le seuil d'inventaire est le même et est de 22 cm.

Deuxièmement, le GHA de Gedinne est identique à la moyenne wallonne (22 m²/ha) et correspond aux normes recommandées en matière de hêtraie irrégulière. Par conséquent on ne peut pas vraiment parler d'éclaircissement de la futaie à l'échelle de la commune, même si c'est bien le cas pour la zone d'étude en particulier. En dépit du GHA optimal, l'abondance éventuelle de petites tiges indique peut-être malgré tout un éclaircissement du couvert.

Ensuite, le VHA est également très proche entre Gedinne et la Wallonie (environ 250 m³/ha). À noter que la circonférence moyenne de Gedinne est de 67 cm tandis qu'elle est de 78 cm pour la Wallonie. Si pour un volume sur pied équivalent, la circonférence de Gedinne est inférieure à celle de la Région wallonne, cela confirme bien qu'en moyenne la commune de Gedinne possède plus de petites tiges que la Wallonie.

En outre, une autre variable très intéressante à étudier est l'accroissement en circonférence. En effet, cette information est très importante pour se faire une idée de la productivité d'un peuplement. Cet accroissement moyen en circonférence est légèrement supérieur pour la commune de Gedinne (1,48 contre 1,30 cm/an pour l'entièreté de la région). Cela s'explique sans doute par le fait que la hêtraie est plus jeune à Gedinne. En effet, les petits bois ayant une meilleure croissance que les gros, l'accroissement moyen est donc supérieur.

Quant à l'accroissement moyen en volume, il est près de deux fois inférieur pour Gedinne (3,14 m³/ha/an) par rapport à la moyenne wallonne (6 m³/ha/an). Cela est probablement dû d'une part au fait que Gedinne se trouve en Haute Ardenne (donc productivité naturellement moindre, car climat plus froid). D'autre part, cette zone a fortement été touchée par la « maladie du hêtre » au début des années 2000. Ce phénomène peut expliquer en bonne partie cette faible productivité. En effet, les individus touchés par les attaques de scolytes et

de champignons vont maximiser leur énergie dans la survie de la tige et par conséquent minimiser l'énergie allouée à la croissance. Même près de 20 ans après la crise, les conséquences se font toujours ressentir.

Enfin, une question subsiste : pourquoi la commune de Gedinne présente-t-elle un bon AMC alors que l'AMV est très faible ? Cela s'explique sans doute par la présence de beaucoup de petits bois qui tirent la moyenne de l'AMC vers le haut. Cependant, ces petits bois ont peu d'impact sur l'AMV qui reste fortement déterminé par les gros bois dépérissants et pour la plupart toujours sur pied. En effet, pour un gain d'un centimètre de circonférence, un gros arbre aura une croissance plus importante en volume qu'un petit arbre et donc au plus la circonférence moyenne est faible, au plus, proportionnellement, le gain en volume sera modéré.

Conclusion

Selon les données, il est clair que la hêtraie présente sur la commune de Gedinne a récemment été rajeunie par les martelages intensifs effectués depuis le début des années 2000. Ces martelages ont visé les arbres touchés par la « maladie du hêtre », généralement de gros arbres âgés.

De plus, cette maladie a également eu pour impact une diminution de la productivité de la futaie. En plus d'une réaction à la crise sanitaire, cette diminution de la productivité des peuplements résulte du changement de structure dû au martelage des gros bois via la création de trouées non productives (figure 9).

Enfin, les exploitations successives liées à la purge des bois malades ont mené à la limitation du couvert et à la création de grosses trouées. Ces dernières limitent la production de la forêt, mais sont propices au développement de la régénération naturelle. À noter l'abondante régénération naturelle de la futaie gedinnoise probablement expliquée par les fortes fainées apparues en réaction au dépérissement des arbres. En effet, en cas de stress, une forte fructification est un mécanisme naturel de l'arbre afin d'assurer sa descendance et ainsi de maximiser son fitness (Hacket-Pain et al., 2015).

4.2.3 Région wallonne

Ce graphique du nombre de tiges à l'hectare en fonction de la circonférence possède une structure typique en « j inversé ». Cette observation est en contraste avec le graphique de la structure pour la zone d'étude (figure 10). En effet, ce graphique possède un déficit en moyens bois et un surplus de gros et très gros bois. Dans le cas de la Région wallonne, il semble que seul le surplus en gros et très gros bois soit également présent. Globalement, la structure wallonne est équilibrée même si une tendance à la capitalisation est à noter. Il est également intéressant de savoir que dans ce cas-ci, tous les types de hêtraies sont pris en compte (jeunes plantations, peuplements irréguliers, jardinés...).

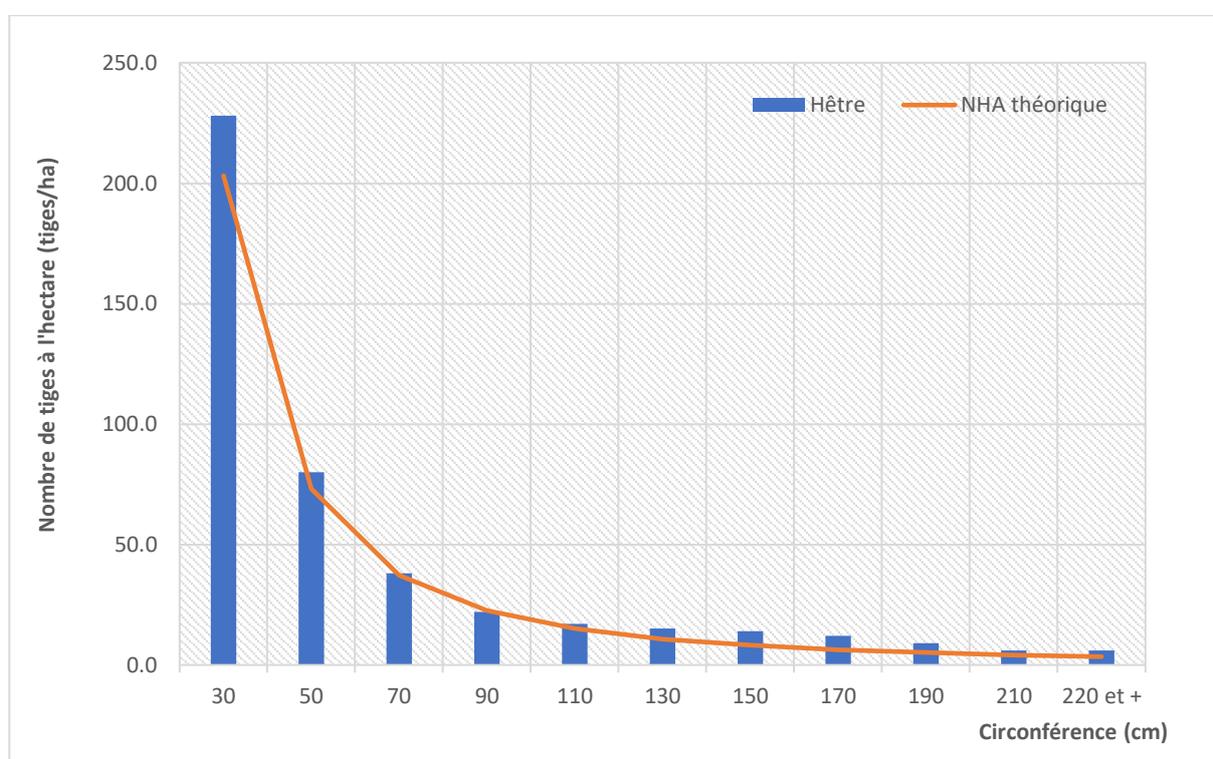


Figure 13. Évolution du nombre de tiges à l'hectare en fonction de la circonférence pour la Région wallonne (données IPRFW) et courbe théorique de décroissance du nombre de tiges selon la méthode Fagneyray

Du point de vue de la surface terrière en fonction de la circonférence, le graphique à l'échelle de la Région wallonne est à nouveau beaucoup plus équilibré que celui de la zone d'étude (figure 11). En effet, le graphique de la Wallonie ne présente pas ce déficit au niveau des moyens bois (circonférence entre 90 et 130 cm). Néanmoins les deux graphiques présentent une surcapitalisation des gros et très gros bois ce qui résulte de la volonté du sylviculteur de garder le plus longtemps possible les arbres sur pied afin de les valoriser au maximum lors de la vente. En outre, le prix du hêtre ayant plongé en réaction à la crise sanitaire du début des années 2000, les gestionnaires ont logiquement préféré garder les arbres sur pied plus longtemps et attendre ainsi un moment plus favorable pour la vente.

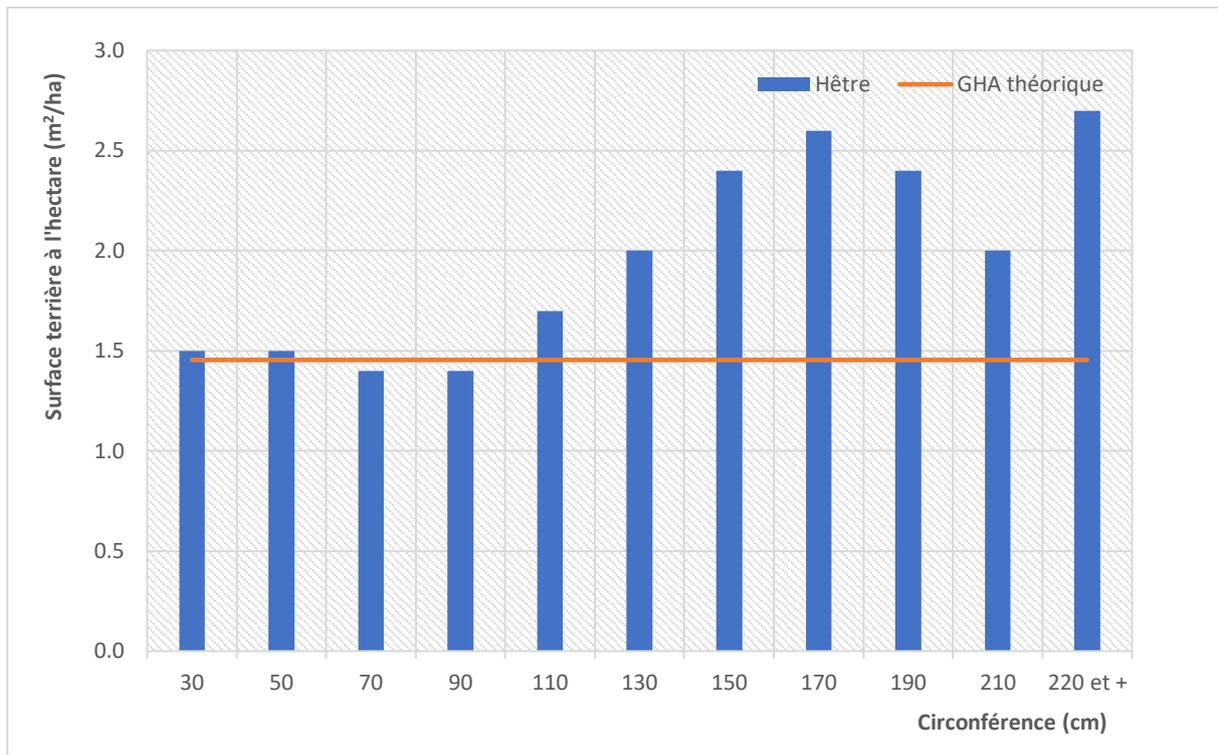


Figure 14. Évolution de la surface terrière à l'hectare en fonction de la circonférence pour la Région wallonne (données IPRFW) et courbe théorique d'équilibre de la surface terrière à l'hectare selon la méthode Fagneray

4.3 RÉGÉNÉRATION NATURELLE

Selon l'inventaire IFA, pour l'ensemble de la zone d'étude, le recouvrement moyen de la régénération est de 61,2 % (dont 56,8 % assimilée à une régénération d'avenir⁹). Cette régénération se compose majoritairement de hêtre et de résineux (épicéa, douglas, épicéa de Sitka, mélèze). Ce pourcentage de recouvrement témoigne d'une régénération naturelle importante et dynamique. Le tableau 7 reprend les pourcentages des différents stades de régénération pour chacune des essences. En revanche, comme l'illustre la figure 15, le pourcentage de recouvrement de la régénération est assez variable en fonction de la localisation de la placette. Néanmoins, il est intéressant de noter que ce recouvrement reste constant par zone, c'est-à-dire que pour plusieurs placettes accolées, le recouvrement reste le même. De ce fait, au sein de la zone d'étude on retrouve par endroit des zones avec une

⁹ Selon l'IFA, la régénération est qualifiée d'avenir si elle se trouve dans des conditions où elle peut croître normalement ou être libérée par un martelage. L'évaluation doit être faite indépendamment de la présence de dégâts

importante régénération naturelle tandis qu'à d'autres endroits cette régénération se fait plus discrète.

La figure 16 illustre la répartition entre les trois types de régénération (semis, fourrés et gaulis-perchis¹⁰) au sein de la zone d'étude. Globalement, les placettes présentent les trois types de régénération, mais avec des répartitions différentes. Pour beaucoup de placettes, les trois types possèdent un pourcentage presque identique, mais pour d'autres seuls un ou deux types de régénération sont présents.

Tableau 7. Répartition des pourcentages et types de régénération en fonction de l'essence

Essences	Total	Semis	Semis installé	Fourrés	Gaulis – perchis
Hêtre	79,36	7,07	15,19	23,45	33,65
Épicéa commun	13,02	3,37	3,53	2,59	3,53
Sapin de Douglas	1,61	0,65	0,40	0,32	0,24
Épicéa de Sitka	1,44	0,61	0,21	0,33	0,28
Mélèze	1,20	0,13	0,40	0,56	0,11
Bouleau pubescent	0,94	0,00	0,17	0,00	0,77
Autres saules	0,56	0,00	0,28	0,28	0,00
Houx	0,41	0,23	0,11	0,06	0,02
Bouleau	0,39	0,06	0,00	0,00	0,33
Pin sylvestre	0,31	0,09	0,12	0,00	0,10
Total	100,00	12,71	20,60	27,61	39,08

Ce tableau met en évidence le fait que le hêtre se régénère très bien sur la zone d'étude. En outre, plus d'un tiers de la régénération est sous forme de gaulis et de perchis. Au regard de la figure 10, une fois que cette régénération aura dépassé le seuil d'inventaire, elle alimentera la classe de grosseur 40-50 cm. Cette large régénération permet la perspective de perpétuation de la courbe en « j inversé ». En revanche, aucune donnée qualitative n'est

¹⁰ Semis haut : hauteur < 30 cm et installé : 30 cm < hauteur < 150 cm
 Fourré : 150 cm < hauteur < 3 m
 Gaulis-perchis : hauteur > 3m

fournie ce qui ne permet pas de garantir que cette régénération sera conservée au fil des différentes coupes d'éclaircie et du reste de la révolution.

À noter le faible intérêt du gibier pour cette régénération. En effet, l'observation visuelle lors des visites de terrain indique que peu de jeunes tiges de hêtre sont atteintes d'écorcement ou de frottement.

Enfin, un lien peut être établi entre la régénération très abondante par endroits (figure 15) et la présence localisée de trouées (figure 9). En effet, les gros îlots de régénération se retrouvent très souvent dans les zones de faible surface terrière (inférieure à 12 m²/ha).

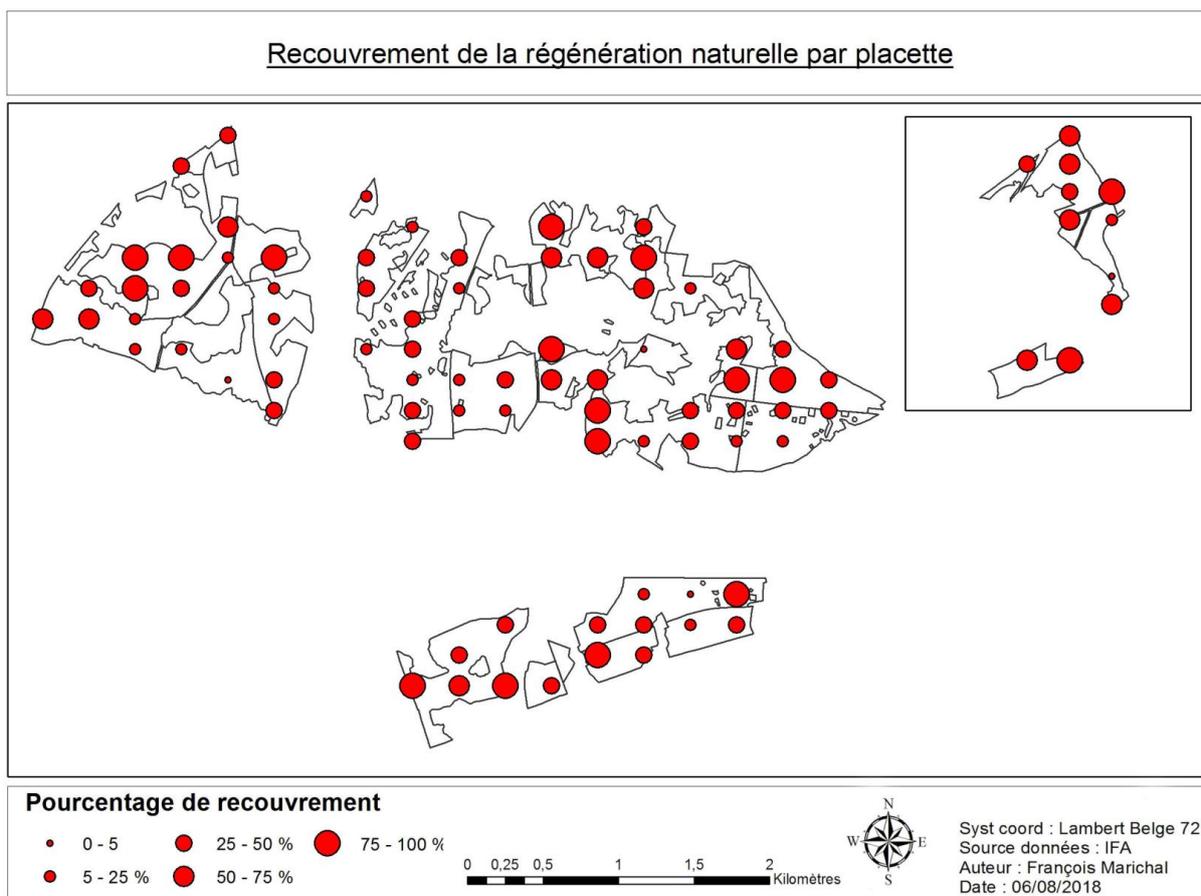


Figure 15. Cartographie du recouvrement de la régénération naturelle par placette

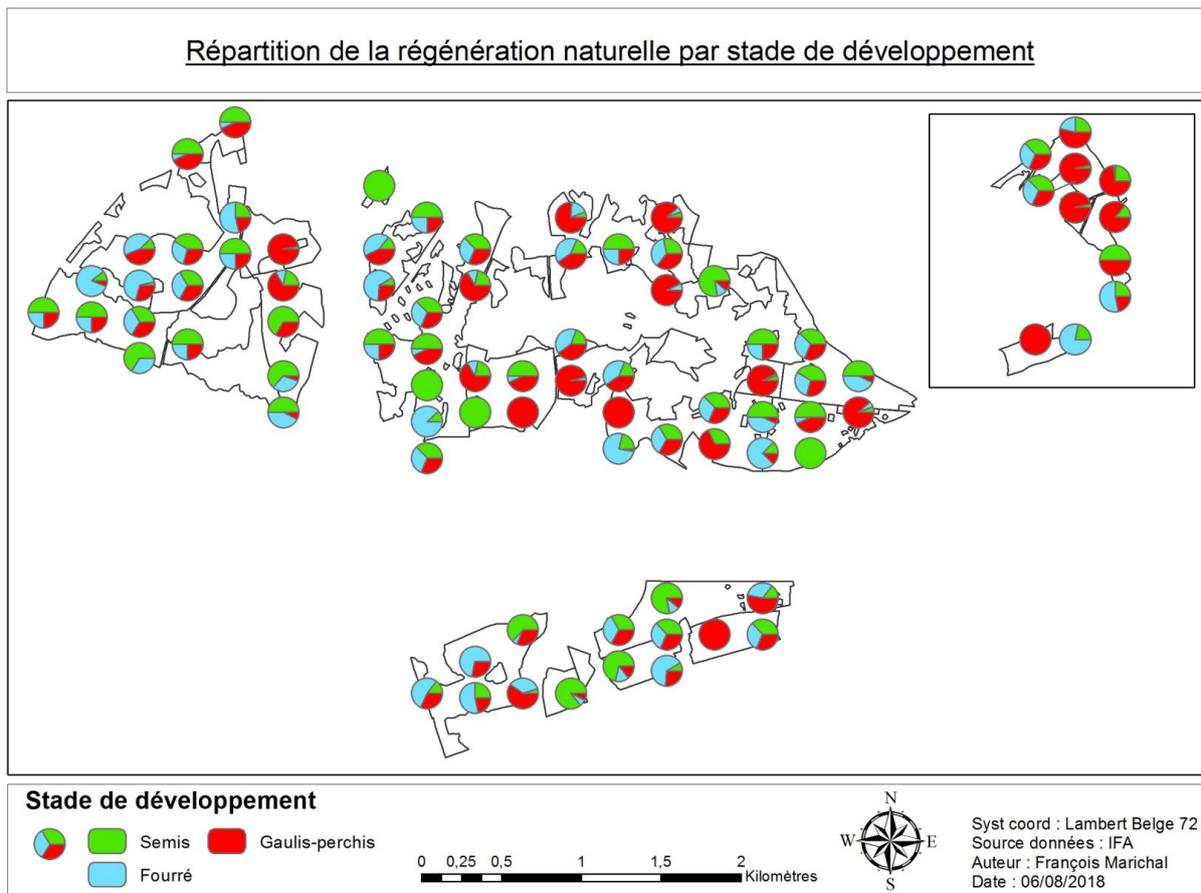


Figure 16. Cartographie de la répartition de la régénération naturelle par stade de développement

4.4 ÉTAT SANITAIRE

La hêtraie de la Croix-Scaille a été très durement touchée par la crise sanitaire du hêtre au début des années 2000. Cette crise aurait été initiée en automne 1998 par une série de gels précoces et intenses avec des vents de secteurs nord-ouest (Huart et al., 2003). Ce phénomène inhabituel a eu pour effet de créer des nécroses sur l'écorce des arbres (Rondeux, 2000). Ces dégâts ont fragilisé les arbres, ce qui a ouvert la porte aux attaques de parasites de faiblesse tels que le scolyte. En effet, le scolyte est attiré par l'odeur d'éthanol issue de la fermentation des tissus nécrosés par le gel (Huart et al., 2003). Les dégâts résultant de ces attaques ont permis l'installation dans les individus touchés de champignons lignivores, augmentant ainsi encore les dégâts sur les tissus ligneux. Les premiers symptômes sont apparus à l'automne 1999 et se sont considérablement amplifiés en 2000 pour atteindre un pic en 2001 (Huart & Rondeux, 2001). Les symptômes globalement observés se composaient notamment de piqûres d'insectes, de carpophores, de décollements d'écorce, de bris de tronc ou encore de clarification du feuillage. Les zones les plus touchées par cette « maladie du hêtre » sont l'Ardenne et plus particulièrement les zones de haute altitude (> 350 mètres) (Huart et al., 2003 ; Rondeux, 2000). En outre, il apparaît que ce sont préférentiellement les

gros arbres (C150 > 150 cm) qui présentent ces symptômes, même si une attaque sur des individus d'une plus petite circonférence n'est pas à exclure.

À l'heure actuelle, l'état sanitaire des peuplements de la Croix-Scaille reste toujours préoccupant même si la dynamique du phénomène de la « maladie du hêtre » a beaucoup ralenti à partir de 2002 (Claessens et al., 2017). De très nombreux indices témoignant de cette crise sanitaire sont toujours présents. En effet, même si on ne dénombre pas de nouvelles attaques de scolytes, beaucoup d'arbres précédemment touchés sont toujours sur pied. Ces individus présentent comme symptômes principaux de multiples trous sur le tronc qui correspondent aux anciennes galeries des insectes. De plus, il n'est pas rare de voir au pied de certains arbres de nombreux fragments d'écorces issus du dépérissement sur pied de l'arbre. En outre, une majorité des individus observés possèdent des anomalies de structures du houppier. En comparaison avec la norme DEPEFEU (voir Annexe 3), de nombreux arbres possèdent une forte déficience en ramifications et en branches fines (figure 17).



Figure 17. Photo illustrative des anomalies de structure du houppier (localisation : Louette Saint-Pierre)

Néanmoins, même si aucune nouvelle attaque n'est à dénombrer, il existe une rétroaction importante de la banque de spores des champignons avec la fructification de nombreux carpophores sur les tiges touchées. L'organisme responsable de ces détériorations est sans aucun doute un champignon endophyte, ce qui explique qu'il ressurgit en cas de stress, plusieurs années après l'attaque. Grâce à une collaboration avec le CRAW¹¹, deux des

¹¹ Centre wallon de Recherches agronomiques - Gembloux

organismes les plus récurrents sur la zone d'étude ont pu être identifiés. Le premier, et qui est celui de loin le plus représenté, est l'amadouvier (*Fomes fomentarius* L.). Le second, présent en bien moins grand nombre sur la zone d'étude, est le polypore brûlé ou tramète brûlée (*Bjerkandera adusta*). Ces deux basidiomycètes sont des parasites de faiblesse c'est-à-dire qu'ils s'attaquent à des arbres faibles ou blessés. De plus, *Bjerkandera adusta* se retrouve même sur des souches ou des troncs déjà pourrissants. Une chose importante à noter est la constante orientation des carpophores sur les troncs. En effet, ces fructifications apparaissent presque systématiquement sur la face nord des troncs (figure 18). Il serait par conséquent imaginable que ces fructifications apparaissent préférentiellement sur les tissus corticaux nécrosés par les gels de novembre 1998. Il apparaît donc évident qu'un rapport existe avec les vents froids de secteurs nord-est/ouest lesquels sont considérés comme déclencheurs de la crise sanitaire du hêtre du début des années 2000 (Huart et al., 2003).

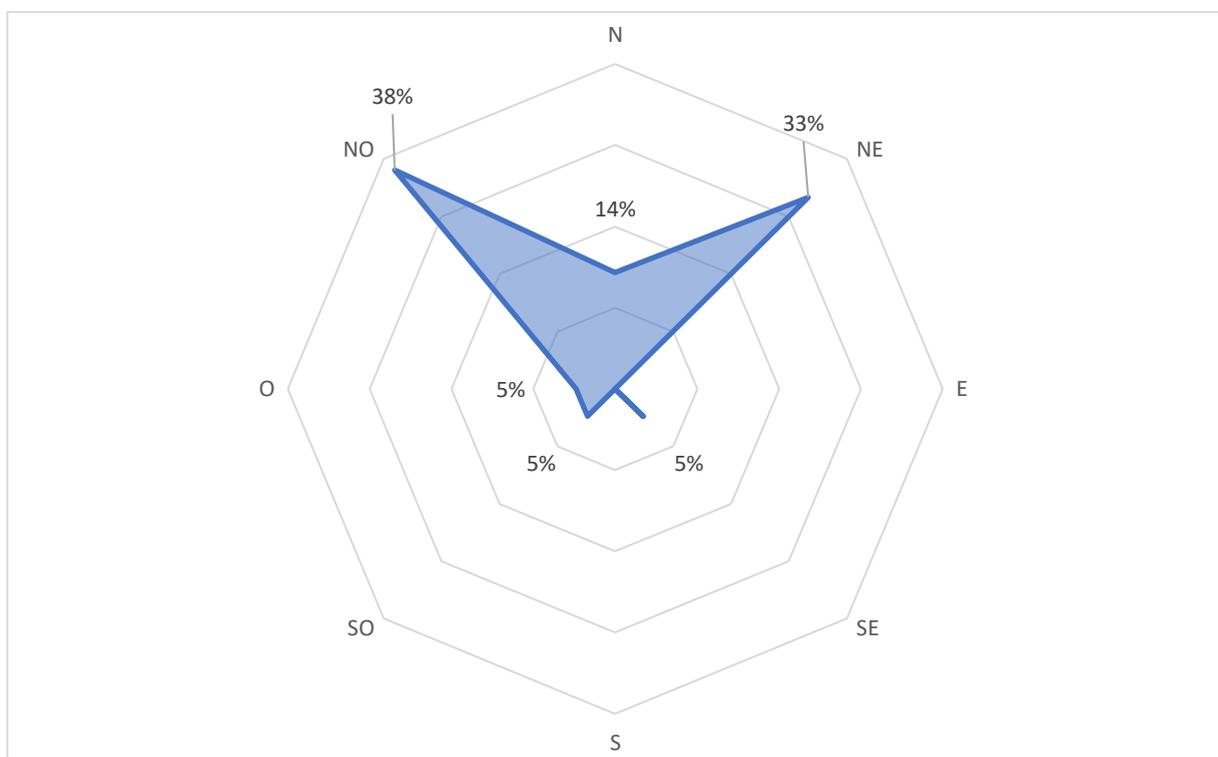


Figure 18. Répartition de l'orientation des carpophores pour les arbres touchés sur la zone d'étude (données F. Marichal)

En outre, un autre symptôme intéressant à noter sur certains arbres est la présence d'une mousse noirâtre sur les troncs. À nouveau, l'orientation de cette mousse est de secteur nord-est/ouest, mais la présence de ce phénomène sur les arbres dépérissants n'est pas systématique. Ces mousses forment une croûte noirâtre cassante à l'état sec tandis qu'elles arborent un aspect verdâtre gélatineux à l'état humide. Cette coloration pourrait être le résultat d'un dépérissement rapide de la mousse qui serait survenue suite à un suintement toxique de l'écorce ou à des conditions climatiques défavorables. Par la suite, cet état de décomposition couplé à l'humidité prolongée constituerait des conditions propices au développement d'une communauté d'algues unicellulaires et de champignons gélatineux

(Huart et al., 2003). C'est précisément la présence d'un de ces champignons (*Hypoxylon fragiforme*) qui provoquerait cette coloration noire. De plus, ce champignon peut également provoquer une décoloration noirâtre de l'écorce, et ce même en l'absence de mousse. Par conséquent, il serait utile d'étudier plus en détail la pénétration de ce champignon dans le bois et son éventuel rôle dans l'abaissement des défenses de l'arbre. En outre, il apparaît que *Hypoxylon fragiforme* pourrait jouer un rôle dans l'attraction des scolytes sur ces arbres affaiblis.

Ces symptômes sont répartis de façon relativement constante sur l'entièreté de la zone d'étude. Cependant, une légère amélioration de l'état global de la hêtraie est à noter sur les versants chauds. Cette observation sur le terrain est probablement à mettre en relation avec les conditions climatiques plus douces généralement allouées aux versants chauds avec un effet de mitigation des vents froids de secteur nord-est.

5. ENQUÊTE SUR LE DÉPÉRISSEMENT

5.1 HYPOTHÈSE D'UN INCIDENT CLIMATIQUE COMME FACTEUR DÉCLENCHANT

Afin d'expliquer les causes du dépérissement global observé sur la hêtraie de la Croix-Scaille, il est utile de s'intéresser aux événements déclencheurs de ce phénomène. Le but est ici de confronter le climat observé sur la Croix-Scaille au cours de ces 20 dernières années avec différents paramètres en lien avec la santé du hêtre (selon le fichier écologique des essences ; Petit et al., 2017). De plus, il est intéressant de mettre en évidence des potentielles similitudes entre ces éventuels incidents déclencheurs et la crise sanitaire du hêtre du début des années 2000.

5.1.1 Matériel et méthode

Une analyse complète des données météo est un bon moyen d'isoler un ou plusieurs événements climatiques inhabituels susceptibles d'avoir déclenché d'une part la crise du hêtre du début des années 2000 et d'autre part le plus récent dépérissement observé sur le cantonnement de Beauraing (lesquels sont plus que probablement liés).

Par conséquent, plusieurs sources de données sont à disposition. La première est l'Institut Royal Météorologique (IRM) qui possède l'avantage de fournir un suivi depuis le XIX^{ème} siècle. Le service en ligne de l'IRM permet de sortir pour chaque commune belge des données de températures et de précipitations moyennes sous la forme d'un diagramme ombrothermique. Grâce à ce type de données, il est possible de se faire une idée globale du climat moyen de la commune. Il est cependant impossible d'isoler un événement extrême.

La seconde source de données est une station météo gérée par l'Université Catholique de Louvain (UCL) et située à proximité de la zone d'étude. Ce dispositif permet de fournir de façon mensuelle un relevé des températures moyennes et des précipitations cumulées. En outre, il est capable de fournir pour chaque mois les températures minimales et maximales relevées. Combinées aux précipitations, c'est précisément ces dernières données qui permettent d'isoler un événement climatique extrême et inhabituel pour un mois donné. À noter que le jeu de données s'étale entre le mois de septembre 1998 et le mois de décembre 2017 et qu'un technicien effectue le relevé des données une fois par semaine.

La première étape de la démarche est d'isoler la période potentielle de déclenchement de la crise sanitaire du hêtre du début des années 2000. Selon (Huart et al., 2003), une période de froid intense pour une période inhabituelle pourrait être à l'origine de la formation de ces grandes lésions corticales sur le tronc. Ces blessures, de par la fermentation des tissus, se révèlent être très attractives pour les insectes xylophages secondaires dont le scolyte est le meilleur exemple. Plus concrètement, l'auteur pointe le mois de novembre 1998 comme

période initiatrice de ces dégâts. Cette période se caractérise par d'intenses gelées inhabituellement précoces avec des vents de secteurs nord-est/ouest. Après analyse des données de la station météo de l'UCL, il s'avère que pour le mois de novembre 1998, une température moyenne de 1,4°C a été mesurée. En outre, la température minimale recensée est de -9,4°C ce qui est en effet assez exceptionnel pour un mois de novembre. De surcroît, la station météo mesurant les températures à l'abri du vent, il est tout à fait imaginable d'obtenir des valeurs inférieures à -15°C sur les hauts plateaux ardennais dans les secteurs orientés vers le nord et exposés au vent. À noter également une période assez douce précédant le coup de froid. En effet, pour les mois de septembre et d'octobre 1998, des températures maximales de respectivement 21,8°C et 15,1°C ont été relevées ce qui a sans doute participé au « choc » thermique » précipitant le hêtre dans une crise sanitaire.

L'étape suivante est d'identifier dans une période post crise du hêtre, un ou plusieurs nouveaux incidents climatiques qui auraient pu réenclencher ce processus de crise sanitaire en passant notamment par la réactivation des spores des champignons endophytes toujours présents sur les arbres sur pied. Afin d'identifier ces potentiels incidents, le jeu de données de la station UCL a été reclassé de façon à faire apparaître dans un premier temps les mois avec les températures extrêmes les plus faibles et dans un second temps les mois avec les précipitations mensuelles les plus faibles et les plus élevées. Ensuite, en fonction de la période de l'année des mois concernés, plusieurs types d'anomalies climatiques sont mises en évidence. Premièrement, cette méthode fait facilement ressortir le phénomène de gels intenses (température inférieure à -8°C) hors saison (avant décembre ou après février). De cette façon, certains gels tardifs ou hâtifs ont pu être identifiés. Ensuite, le jeu de données a également mis en évidence des sécheresses printanières ou estivales qui se caractérisent par des précipitations anormalement faibles pour le printemps ou l'été. Enfin, le dernier critère d'identification est la présence de précipitations anormalement élevées en hiver. Afin de démontrer le caractère exceptionnel de ces chiffres, ceux-ci sont systématiquement comparés à la moyenne mensuelle pour l'ensemble du jeu de données (normale). Après cette analyse des données de la station météo de l'UCL, cinq saisons apparaissent comme suspectes.

5.1.2 Année 2003

L'année 2003 a été une année particulièrement anormale d'un point de vue climatique. En effet, le printemps de cette année a été marqué par des gels assez intenses avec des températures allant jusqu'à -8,9°C au mois d'avril. Ces gels tardifs sont très impactants pour l'écologie du hêtre (Petit et al., 2017) et il n'est pas à exclure qu'un tel phénomène ait eu des conséquences fâcheuses pour les individus constituant le peuplement de la Croix-Scaille. De plus, l'année 2003 a été marquée par une canicule s'étalant sur les mois d'août et de septembre. Cette vague de chaleur est caractérisée par de très hautes températures (18° de moyenne en août) combinées à de faibles précipitations atteignant moins de la moitié de la normale (tableau 8). Enfin, cette année se caractérise également par de fortes gelées au mois

de novembre avec des températures descendant à $-8,6^{\circ}\text{C}$. La combinaison de ces évènements extrêmes a sans aucun doute constitué un stress très important pour les arbres ayant pour conséquence une forte mobilisation des réserves énergétiques de l'individu. Pour confirmer ces propos, l'étude des données d'accroissement du hêtre pour cette année montre une très forte baisse de la croissance pour l'année 2004 (Latte et al., 2017). Ceci démontre bien qu'un stress implique pour l'arbre une plus forte mobilisation énergétique dans sa survie et par conséquent une diminution de l'énergie allouée à la croissance radiale. En cas de combinaison de facteurs menant à un stress très intense, il est donc très probable que le manque d'énergie et de réserves amorce un dépérissement de l'arbre.

Tableau 8. Températures et précipitations pour les mois d'août et de septembre 2003

Mois	Précipitations (mm)	Normale (mm)	Température ($^{\circ}\text{C}$)	Normale ($^{\circ}\text{C}$)	Température max ($^{\circ}\text{C}$)
<i>Août</i>	62,9	115,12	17,99	15,60	33,6
<i>Septembre</i>	22,1	90,72	12,02	12,60	24,4

5.1.3 Hiver 2009-2010

L'hiver 2009-2010 se démarque des autres par de très fortes précipitations pour les mois de novembre et de décembre. En effet, les précipitations cumulées pour ces deux mois atteignent près du double des précipitations attendues (tableau 9).

Tableau 9. Précipitations mensuelles et moyennes pour les mois de novembre et de décembre 2009

Mois	Précipitations (mm)	Normale (mm)
<i>Novembre</i>	288,8	128,26
<i>Décembre</i>	224,9	162,93
Total	513,7	291,19

La problématique avec ces fortes précipitations sur une courte période est l'engorgement des sols. En effet, le hêtre est une essence particulièrement sensible à l'engorgement hivernal (Petit et al., 2017). Un excès d'eau à cette période pourrait sensibiliser le hêtre aux scolytes et aux champignons à cause de la forte humidité ambiante associée à ces conditions climatiques.

5.1.4 Année 2011

L'année 2011 se marque quant à elle par une importante sécheresse printanière. En effet, les valeurs de précipitations pour les mois de mars, d'avril et de mai sont près de trois fois inférieures à la moyenne (tableau 10). Cette sécheresse est évidemment très impactante quand on sait que la majorité de la croissance du hêtre se fait à cette époque et que c'est donc à ce moment que les besoins en eau sont les plus grands. De ce fait, la croissance radiale a une nouvelle fois été fortement réduite pour la saison de végétation 2011 (Latte et al., 2017).

Tableau 10. Précipitations mensuelles et moyennes pour les mois de mars, avril et mai 2011

Mois	Précipitations (mm)	Normale (mm)
<i>Mars</i>	33,7	93,29
<i>Avril</i>	29,7	72,55
<i>Mai</i>	18,5	83,98
Total	81,9	249,72

À l'inverse, l'hiver 2011-2012 s'est révélé très pluvieux. À eux seuls, les mois de décembre et de janvier ont accumulé plus de 500 mm de pluie ce qui se révèle bien au-delà de valeurs habituellement rencontrées (+67% ; tableau 11). À nouveau, ce phénomène d'engorgement hivernal a pu créer des conditions idéales pour la résurgence des champignons déjà présents dans les arbres sous forme de spores.

Tableau 11. Précipitations mensuelles et moyennes pour les mois de décembre 2011 et janvier 2012

Mois	Précipitations (mm)	Normale (mm)
<i>Décembre</i>	327,5	162,93
<i>Janvier</i>	193,9	143,48
Total	521,4	306,41

5.1.5 Année 2015

Enfin, la dernière année exceptionnelle recensée est l'année 2015. Cette année se caractérise par de très intenses gelées tardives avec pour le mois d'avril des valeurs de température allant jusqu'à -11,6°C. À noter également pour ce mois d'avril un écart thermique très important avec des températures allant jusqu'à 22,7°C. Le mois de mars n'est pas en reste avec des températures maximales de 17,3°C.

Ces hautes températures avant une très forte gelée sont à mettre en relation avec l'évènement déclencheur de la crise sanitaire du hêtre en 1998 (point 5.1.1). Lors de cette crise, c'est précisément un gel de cette ampleur qui a provoqué les dégâts corticaux ouvrant la porte aux parasites de faiblesse. Une gelée d'une telle intensité pour la saison printanière a sans aucun doute eu de gros impacts sur les tissus gorgés en eau à cette époque ainsi que sur les bourgeons débouffés ou en phase de débouffement.

Conclusion

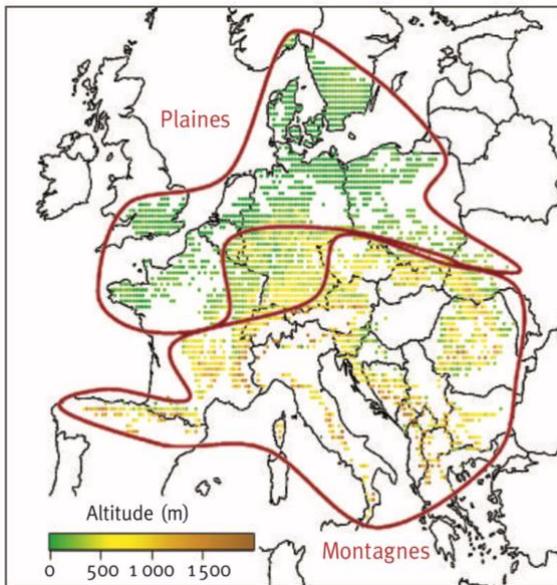
Le but initial de la démarche étant d'identifier certains évènements climatiques extrêmes ayant pu déclencher ce récent dépérissement, cinq saisons anormales ont pu être mises en évidence. Les années 2003 et 2011 se marquent par des sécheresses estivales (2003) et printanières (2011). Ensuite, les hivers 2009 et 2011 se sont révélés très pluvieux, engorgeant ainsi les sols. Enfin, 2003 et 2015 se sont également montrés exceptionnels de par leurs gels tardifs très intenses. L'année 2015 est clairement à mettre en parallèle avec la crise sanitaire

du début des années 2000. En effet, de telles gelées suivant une période douce se sont déjà produites en 1998, déclenchant ainsi une crise sanitaire. Il n'est donc pas impossible que le phénomène se soit répété en 2015 expliquant ainsi le dépérissement observé de nos jours.

5.2 HYPOTHÈSE D'UNE RÉACTION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

La sensibilité du hêtre aux sécheresses printanières et/ou estivales et aux canicules le prédispose à souffrir des épisodes chauds et secs en saison de végétation, et cela d'autant plus que la station est exposée : basse altitude, versants sud accusés. Sa sensibilité face aux aléas climatiques est renforcée par la faiblesse de son enracinement en présence de contraintes physiques (sols de faible profondeur ou présentant un obstacle tel que l'hydromorphie temporaire ou la compacité). En outre, dans le cadre des changements climatiques, la récurrence de ces événements extrêmes va sans doute s'accroître ce qui inscrit le hêtre comme une essence vulnérable dans ce contexte. Par conséquent, il conviendra d'être particulièrement prudent dans le choix de la station (Petit et al, 2017).

Le changement climatique est une réalité inéluctable dont les conséquences sont encore floues et difficilement mesurables. Néanmoins, les experts du GIEC prévoient une hausse des températures de 2 à 4°C d'ici la fin du XXI^{ème} siècle ainsi qu'une augmentation de fréquence des événements climatiques extrêmes (IPCC, 2014). En considérant le fait que ces changements globaux ont déjà actuellement des conséquences, il se peut fortement que l'aire de répartition naturelle du hêtre commence peu à peu sa migration nordique. De ce fait, les stations les plus basses en altitude ne sont probablement déjà plus adaptées à la sylviculture du hêtre. En outre, la banalisation des incidents climatiques peut être une résultante de ces changements climatiques et les récurrentes agressions climatiques vis-à-vis du hêtre peuvent mener cette essence à dépérir du fait de sa capacité de résilience trop faible. La figure 19 décrit l'aire de distribution naturelle du hêtre en Europe en rapport avec l'altitude. En complément, la figure 20 place les points issus de la figure 19 dans un diagramme climatique de façon à visualiser la translation future du climat belge. Cette illustration permet de replacer le futur climat belge dans l'aire de répartition actuelle du hêtre.



- Les points de la figure 20 correspondent aux points de la grille sur la carte.
- La couleur des points renseigne l'altitude (voir légende figure 19).
- Le polygone noir indique l'enveloppe du climat belge, de la plaine maritime aux plateaux ardennais.
- La flèche rouge indique grossièrement la translation de cette enveloppe selon le changement climatique prédit par le GIEC pour la fin du XXIe siècle (IPCC, 2014 ; moyennes des principaux modèles et scénarios).
- Le polygone gris indique l'enveloppe du climat français actuel.

Figure 19. Aire de distribution naturelle du hêtre en Europe en fonction du gradient d'altitude (Latte et al., 2017)

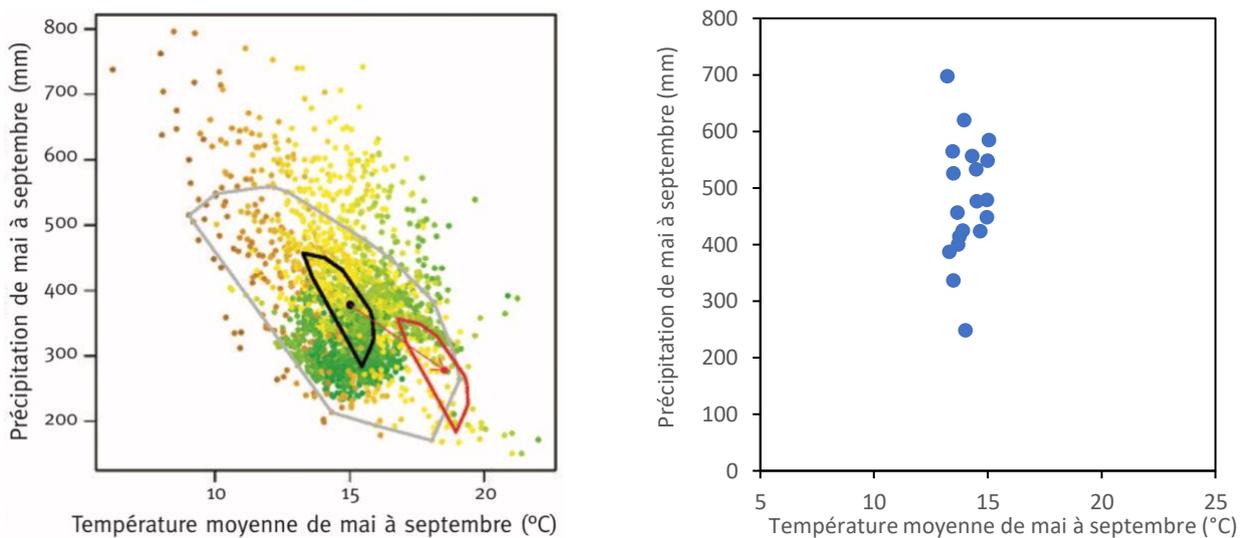


Figure 20. Distribution des hêtraies dans un diagramme climatique (Latte et al., 2017) et cas de la Croix-Scaille (source : UCL)

Pour aller plus loin, après analyse de l'évolution de l'accroissement radial du hêtre (Latte & Claessens, 2014), il apparaît que celui-ci a augmenté à partir des années 1930 pour ensuite drastiquement diminuer depuis les années 1980. Cette élévation de l'accroissement s'explique sans doute par l'augmentation globale de la température combinée à une amélioration de la fertilité des sols via les retombées azotées atmosphériques (Claessens, 2016). Ensuite, la diminution de l'accroissement à partir des années 1980 s'explique par l'augmentation de la fréquence des événements climatiques extrêmes impactant la croissance. En effet, à la suite de ces stress plus fréquents, la sensibilité climatique du hêtre a également fortement augmenté pendant cette période. À noter que ces observations sont valables pour l'ensemble de la hêtraie wallonne donc le vieillissement ou simplement

l'évolution de la sylviculture ne peuvent entièrement expliquer de tels changements. Un autre point à considérer est le fait qu'un individu mourant aura une réponse plus importante à une anomalie climatique (Latte et al., 2016). Dans le cadre de la hêtraie de la Croix-Scaille, cette caractéristique est d'autant plus importante du fait que les hêtres présents sont âgés et dépérissants.

Enfin, cette étude dendrochronologique (Latte & Claessens, 2016) met en évidence le fait que l'accroissement annuel est plus influencé par les conditions climatiques de l'année précédente que de celle en cours. Il semblerait donc que certains processus physiologiques limiteraient la capacité de l'arbre à stocker des réserves carbonées pour l'année suivante (chute précoce des feuilles, cavitation ou mort racinaire) tandis que d'autres utilisent intensément ces réserves (fructifications abondantes). Cela a pour conséquence que l'arbre se retrouve avec moins de ressources à allouer pour l'année suivante. De plus, une augmentation de la température a pour effet un accroissement de l'évapotranspiration ce qui augmente la dépendance pour les arbres vis-à-vis de l'eau disponible. Cela est évidemment très dommageable quand on sait que le hêtre est une espèce très sensible au stress hydrique (Petit et al., 2017).

Par conséquent, il apparaît qu'un des premiers effets des changements climatiques est une augmentation de la fréquence des événements climatiques extrêmes. D'un point de vue physiologique, cette augmentation des événements stressants provoque chez le hêtre un épuisement progressif des réserves énergétiques de l'arbre. C'est la répétition de ces phénomènes climatiques qui plonge les arbres dans cet état de dépérissement, ceux-ci étant incapables de reconstruire leurs réserves avant la prochaine perturbation.

5.3 HYPOTHÈSE D'UN ÂGE TROP AVANCÉ FAVORISANT LE DÉPÉRISSEMENT DU HÊTRE

L'âge d'un arbre est une donnée très importante quand on étudie une essence dont la longévité est limitée. En Wallonie, la longévité du hêtre est estimée à environ 250 ans (Petit et al, 2017), c'est pourquoi une telle étude prend tout son sens dans le cadre d'un travail sur le dépérissement du hêtre.

5.3.1 Matériel et méthode

5.3.1.1 Échantillonnage de hêtres à dater

La première étape est la sélection, au sein de compartiments martelés, d'arbres d'intérêt. Parmi ces individus sont sélectionnés des arbres de différents états sanitaires, autant sains que dépérissants et uniformément répartis sur l'ensemble des classes de grosseur supérieures à 120 cm (car martelage à partir de cette classe de circonférence). Au total, 30 arbres sont sélectionnés. Ce nombre représente un minimum pour effectuer une analyse statistique

valable. Afin de ne pas abîmer les arbres sur pied ayant encore un avenir, seuls des arbres déjà martelés sont choisis.

5.3.1.2 Données récoltées

Caractérisation des arbres

Une fois sélectionné, chaque arbre est soumis à une multitude de mesures et d'observations qui sont compilées dans une fiche terrain propre à chaque individu (voir annexe 1). Premièrement, afin de maximiser les chances de retrouver l'arbre après coupe, un point GPS¹² est pris côté nord du tronc et une croix jaune est matérialisée sur une racine à l'aide d'une bombe de couleur.

Ensuite, divers paramètres dendrométriques tels que la hauteur¹³ ou la grosseur à 150 cm sont mesurés. De plus, une caractérisation complète de l'état sanitaire est réalisée via une analyse visuelle du tronc afin de déceler la présence éventuelle de carpophores, de suintements, de décollements d'écorce, d'anciennes attaques de scolytes ou encore de dégâts d'exploitation ou de gibier. Pour aller plus loin, la présence, la hauteur et l'orientation d'éventuels carpophores sont également notées. En outre, une attention particulière est également portée à la présence éventuelle et à l'orientation de la caractéristique mousse noire retrouvée sur certains arbres dépérissants.

Enfin, pour définir l'arbre comme sain ou dépérissant, une description de l'état global du houppier est déterminée grâce au système de cotation de la méthode DEPEFEU (Nageleisen, 2013). Un arbre sain se définit comme un individu ne présentant aucune trace de carpophores ou d'ancienne attaque de scolytes. De plus, il doit présenter un score DEPEFEU inférieur ou égal à 3. À l'inverse, un arbre est jugé dépérissant s'il présente soit des champignons soit des indices d'anciennes attaques de scolytes (ou les deux). De plus, un arbre dont le score DEPEFEU est supérieur à 3 est automatiquement considéré comme dépérissant.

¹² Garmin 62s

¹³ Haglöf Vertex III and Transponder T3

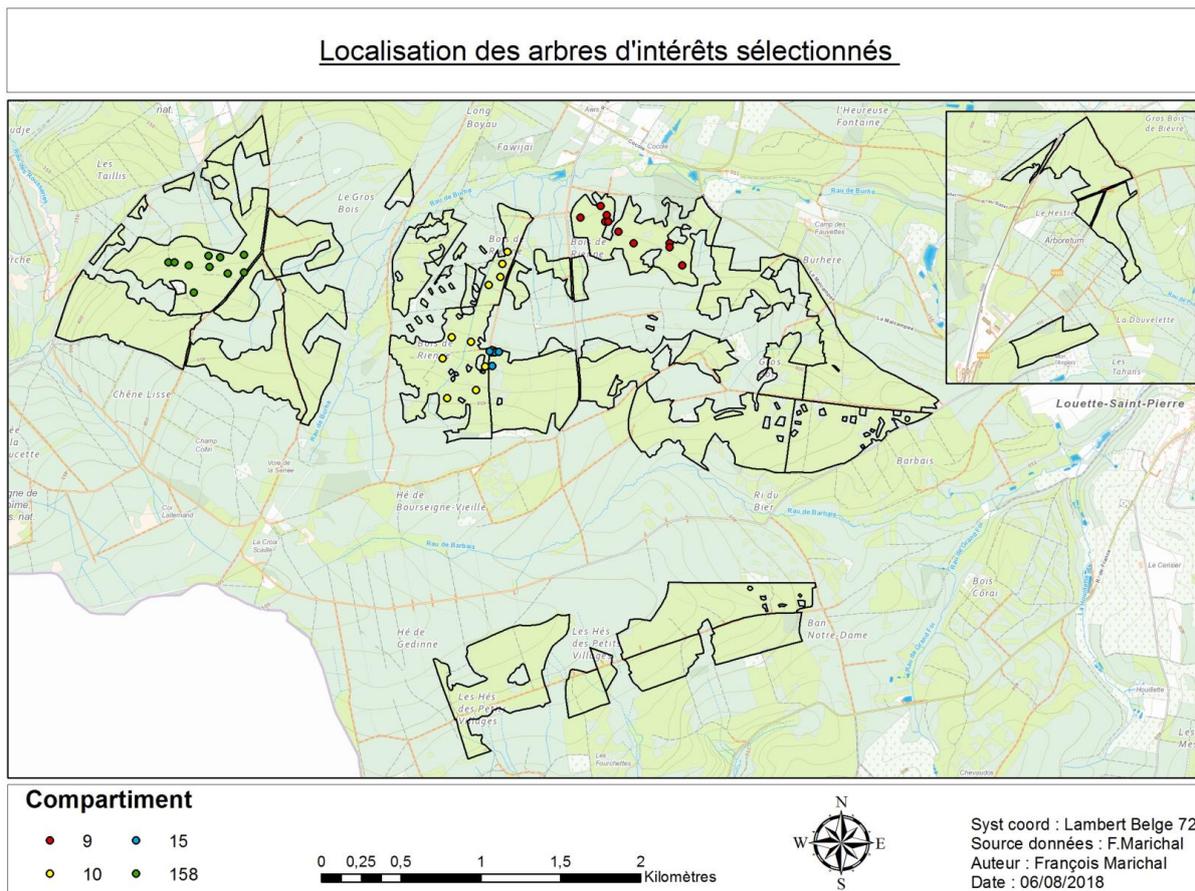


Figure 21. Localisation des arbres sélectionnés sur fond IGN

Estimation de l'âge

Une fois les arbres abattus, l'étape suivante consiste à un prélèvement après coupe d'une rondelle de souche tout en veillant bien à garder l'identifiant et la localisation de l'échantillon. La collecte des échantillons se fait grâce à une tronçonneuse¹⁴ et correspond à la coupe d'une rondelle ou d'un triangle partant de la moelle vers la périphérie de la souche. La récolte de ces rondelles de souches a pour but le comptage des cernes depuis la moelle. Cette méthode permet de donner une estimation plus précise de l'âge des arbres qu'un carottage qui peut passer à côté du centre (figure 22). Néanmoins, la lenteur de l'exploitation limitant le nombre d'arbres abattus, un carottage est réalisé en complément sur les arbres toujours sur pied afin de compléter l'échantillonnage.

¹⁴ Stihl MS 441

Au total, la phase de terrain a permis la récolte de 28 échantillons exploitables (23 carottes et 5 rondelles de souche). Parmi ces 28 échantillons, 18 proviennent d'arbres dépérissants et 10 d'arbres sains.

Vient ensuite le comptage des cernes. Cette importante étape vise à fournir une estimation aussi précise que possible du nombre de cernes entre la moelle et l'écorce, et donc de l'âge de l'arbre échantillonné.

L'étape finale consiste en l'étude statistique de la relation éventuellement existante entre le dépérissement et l'âge avancé de l'arbre. Cette relation pourrait être un des facteurs explicatifs du dépérissement observé dans cette hêtraie de la Croix-Scaille.

5.3.1.3 Protocole de récolte et de comptage des cernes

Pour les individus carottés, la première étape est la récolte pour chacun des arbres présélectionnés d'une carotte de bois reliant l'écorce au cœur. Pour ce faire, il faut avoir recours à l'utilisation d'une tarière de Pressler¹⁵. La prise d'échantillon se fait à une hauteur de 80 cm en veillant à viser aussi bien que possible le cœur présumé de l'arbre. Une fois la carotte récoltée, il est impératif de très rapidement la stocker dans de bonnes conditions afin d'éviter que celle-ci ne se déforme lors du séchage.

Pour se faire, la carotte est directement collée à l'aide de colle à bois¹⁶ sur un support fait sur mesure. Ce support se présente sous la forme d'une latte rainurée d'environ 45 cm de long. En outre, la carotte est maintenue sur le support grâce à des élastiques. De cette façon, la carotte restera bien droite lors du séchage facilitant ainsi les prochaines étapes du traitement. À noter que le collage de la carotte se fait en orientant verticalement les fibres du bois par rapport au futur plan de coupe (figure 23). Cette orientation permettra une meilleure lecture des cernes et rendra plus facile l'identification du centre de l'arbre. Bien entendu, chaque carotte est identifiée en notant son numéro correspondant, la date de prélèvement et la circonférence de l'arbre sur le support de la carotte. Dans le cas d'une rondelle de souche, après récolte l'échantillon est identifié et mis à sécher pendant une semaine avant la suite du traitement (Latte et al., 2012).

¹⁵ Haglöf 060050-00100-0400 400 mm

¹⁶ Colle à bois Bison super forte (norme D2)

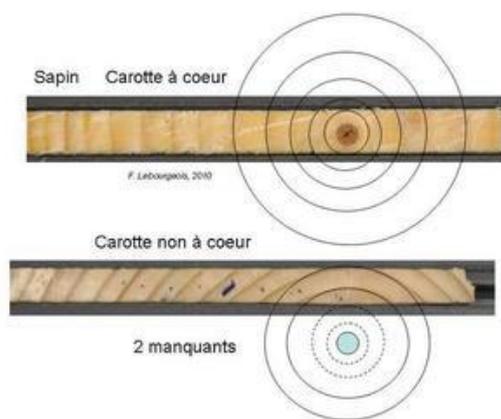


Figure 22. Risque lié au carottage

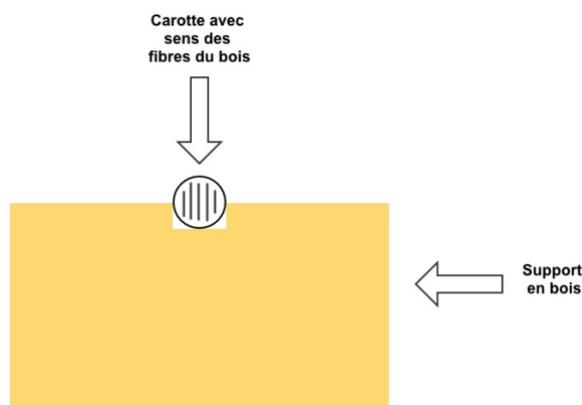


Figure 23. Schéma de collage de la carotte sur son support

Ensuite, une fois la carotte sèche, elle est poncée. Le but final est de poncer la carotte jusqu'au niveau de la latte. De cette façon, la lecture des cernes est grandement facilitée et cela permet en outre un repérage aisé du centre de l'arbre (figures 24 et 25). Le ponçage à proprement parler se fait tout d'abord de façon grossière grâce à une ponceuse à rouleau avec un grain de P80. Ensuite, le ponçage est progressivement affiné avec une ponceuse circulaire. Au fur et à mesure du ponçage, le grammage du papier de verre croit progressivement. Il démarre à un grain de P80 pour ensuite passer à P120 puis P320 et enfin P1000 pour l'étape de finition (Lebourgeois, 2014).



Figure 24. Carotte avant ponçage

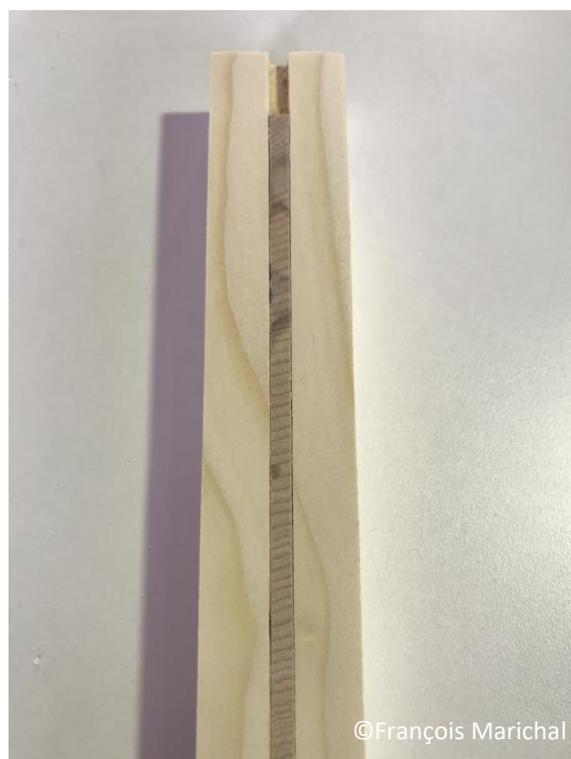


Figure 25. Carotte après ponçage

En outre, la manipulation est très semblable pour les rondelles de souche. Avant le ponçage il faut cependant passer l'échantillon au rabot afin d'égaliser la surface très imparfaite due à la

trace de la chaîne de la tronçonneuse. Une fois cette étape réalisée, la même manipulation de ponçage, avec le même grain, est appliquée à la rondelle.

L'étape finale est le comptage du nombre de cernes à partir de la moelle permettant ainsi de fournir une bonne estimation de l'âge de l'arbre. Afin de faciliter ce travail, la carotte sur son support ou la rondelle de souche est digitalisée par un scanner à haute résolution¹⁷. Cette manipulation permet un meilleur grossissement et par conséquent une meilleure visualisation des cernes de croissance. Une fois l'image digitalisée (à 800 dpi) obtenue, celle-ci est traitée grâce au logiciel WinDENDRO afin de permettre un zoom approfondi de l'image, rendant ainsi aisé le comptage des cernes de croissance. Les données sont encodées dans un fichier Excel (annexe 4).

5.3.2 Analyses statistiques

Afin de mettre en évidence des éventuelles différences entre les échantillons d'arbres sains et dépérissants, plusieurs tests statistiques sont réalisés.

- Mise en évidence de l'effet de l'âge sur le dépérissement
→ Comparaison de moyennes (test t de Student)
 - Mise en évidence de l'effet de la grosseur sur le dépérissement
→ Comparaison de moyennes (test t de Student)
 - Comparaison de l'effet combiné des différentes variables (âge, circonférence et hauteur) sur le dépérissement
→ Analyse discriminante pas à pas (stepwise)
- Après vérification des conditions d'application

5.3.3 Résultats et discussion

5.3.3.1 Comparaison des moyennes des âges des arbres sains et dépérissants

La première analyse statistique consiste en la comparaison des moyennes de ces deux échantillons afin de mettre en évidence l'égalité ou non entre ces deux moyennes. Pour réaliser cette analyse, le logiciel statistique Minitab 18 est utilisé. Certaines figures sont néanmoins tirées du complément de Microsoft Excel, XLStat, ce dernier étant plus visuel que Minitab.

¹⁷ Epson Expression 100000 XL

Avant de procéder au test d'égalité des moyennes, il est tout d'abord nécessaire de vérifier les conditions d'applications de ce test. Premièrement, chaque échantillon doit comprendre au minimum dix répétitions. C'est le cas puisque l'échantillon d'arbres dépérissants en comporte 18 tandis que l'échantillon d'arbres sains en possède 10 (tableau 12).

Tableau 12. Statistiques descriptives des données d'âge

<i>État sanitaire</i>	n	min	max	moyenne	STD
<i>Sain</i>	10	122	229	157	36
<i>Dépérissant</i>	18	130	238	188	35

Ensuite, il faut vérifier la normalité des populations pour chacun des échantillons. Pour ce faire, Minitab et XLStat permettent de réaliser plusieurs tests de normalité comme celui de Shapiro-Wilk, d'Anderson-Darling, de Lilliefors ou encore celui de Jarque-Bera. Afin d'accepter l'hypothèse nulle (H0) et donc de déclarer la population comme normale, il est nécessaire que la p-valeur soit supérieure à 0,05. Après réalisation des tests, les deux populations sont bien déclarées comme normales (p-values de 0,079 pour les individus sains et de 0,134 pour les dépérissants). Le détail des analyses statistiques est présenté en annexe 6.

Enfin, la dernière condition d'application est l'égalité des variances (rapport supposé de 1). Pour vérifier cette condition, un test d'égalité des variances est réalisé. Minitab et XLStat laissent le choix entre trois tests : test F de Fisher, test de Levene et test de Bartlett. Après réalisation du test de Fisher, l'égalité des variances est bien respectée, la p-valeur étant de 0,903 (acceptation de l'hypothèse nulle car p-valeur supérieure à 0,05).

Maintenant que les conditions d'application sont respectées, il est possible de tester l'égalité des moyennes des deux échantillons. Étant donné qu'on ne connaît pas la variance des populations dans lesquelles ont été prélevés les échantillons, il faut avoir recours au test t de Student afin de tester ces moyennes. Le test en question déclare les moyennes comme égales ($m_1 - m_2 = 0$) si la p-value est supérieure à 0,05 (AH0). Dans le cadre de cette étude, la p-value est inférieure à 0,05 ce qui mène par conséquent à un rejet de l'hypothèse nulle et donc à une inégalité des moyennes ($m_1 \neq m_2$; figure 26). Par conséquent, il apparaît que statistiquement il y a une différence significative (car $0,05 < p\text{-valeur} < 0,01$) entre l'âge des arbres sains et celui des arbres dépérissants. La première conclusion à faire est donc qu'a priori les arbres atteints de dépérissement sont bel et bien plus vieux que les arbres identifiés comme sains. D'un point de vue quantitatif, les individus dépérissants sont en moyenne âgés de 188 ans tandis que les arbres sains sont en moyenne 30 ans plus jeunes (159 ans). Indépendamment de l'état sanitaire, l'âge moyen des arbres échantillonnés est de 178 ans.

Test F de Fisher / Test bilatéral :

Intervalle de confiance à 95% autour du rapport des variances :
[0,259; 2,878]

Rapport	0,964
F (Valeur observée)	0,964
F (Valeur critique)	3,722
DDL1	17
DDL2	9
p-value (bilatérale)	0,903
alpha	0,05

Interprétation du test :

H0 : Le rapport entre les variances est égal à 1.

Ha : Le rapport entre les variances est différent de 1.

Étant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil alpha=0,05, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H0.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H0 alors qu'elle est vraie est de 90,30%.

Figure 26. Résultats du test d'égalité des moyennes des âges (test t de Student)

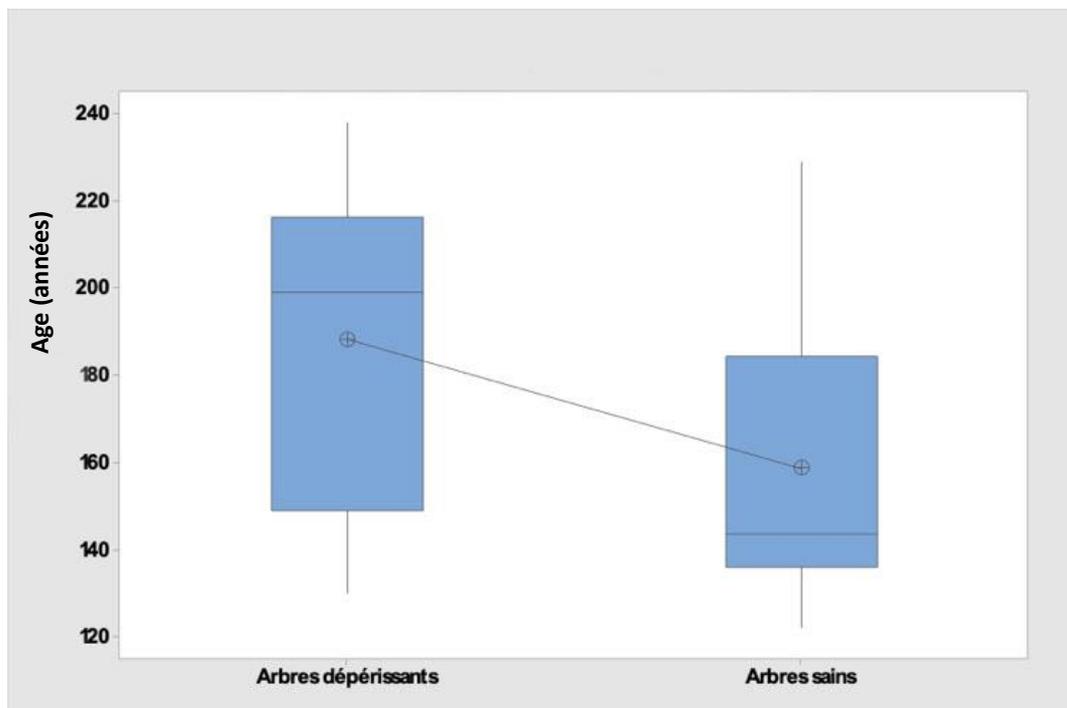


Figure 27. Boxplot des moyennes des âges des échantillons d'arbres sains et dépérissants

5.3.3.2 Comparaison des moyennes des circonférences des arbres sains et déperissants

De nouveau, la première étape avant de réaliser cette opération est de vérifier les conditions d'application (minimum 10 répétitions, populations normales et égalité des variances). Une fois ces conditions validées, les moyennes des échantillons sont comparées grâce à un test t de Student (car les variances des populations sont inconnues). Les résultats de ce test donnent une p-valeur de 0,532 ce qui est donc supérieur à 0,05. Par conséquent, l'hypothèse nulle d'égalité des moyennes ne peut être rejetée (H_0) et il apparaît donc qu'a priori il n'y a pas de relation statistique significative entre le dépérissement et la grosseur des individus (figure 28).

Test t pour deux échantillons indépendants / Test bilatéral :	
Intervalle de confiance à 95% autour de la différence des moyennes :	
[-24,447 ; 46,247]	
Différence	10,900
t (Valeur observée)	0,634
t (Valeur critique)	2,056
DDL	26
p-value (bilatérale)	0,532
alpha	0,05

Interprétation du test :

H_0 : La différence entre les moyennes est égale à 0.

H_a : La différence entre les moyennes est différente de 0.

Étant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0,05$, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H_0 .

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 alors qu'elle est vraie est de 53,17%.

Figure 28. Résultats du test d'égalité des moyennes des circonférences (test t de Student)

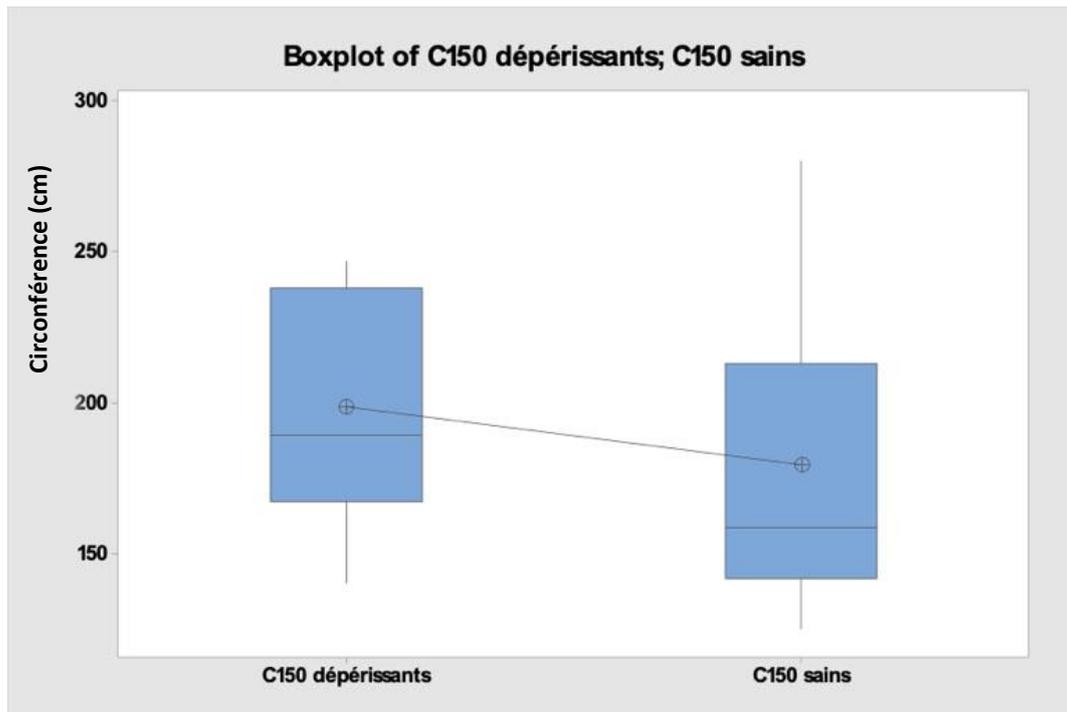


Figure 29. Boxplot des moyennes des circonférences des échantillons d'arbres sains et dépérissants

5.3.3.3 Analyse discriminante stepwise

Une analyse discriminante pas à pas est effectuée en utilisant une sélection par étapes (stepwise). L'analyse discriminante est utilisée pour déterminer les variables qui permettent de discriminer naturellement deux ou plusieurs groupes. L'idée de base de cette analyse est de déterminer si des groupes sont différents par rapport à la moyenne qu'ils prennent sur une variable particulière, et d'utiliser cette variable pour prédire l'appartenance à un groupe. L'analyse suivante est réalisée avec le logiciel SAS 9.4 et une illustration des résultats des tests est donnée en annexe 6.

Par défaut, le niveau de signification d'un test issu d'une analyse de covariance est utilisé comme critère de sélection. La variable considérée est la variable dépendante (dépérissement) et les variables déjà choisies agissent comme des covariables (âge, circonférence et hauteur).

À l'étape 1, la tolérance est de 1,0 pour chaque variable considérée, car aucune variable n'est encore entrée dans le modèle. La variable âge est sélectionnée car sa F-value (4.49) est la plus grande parmi toutes les variables.

À l'étape 2, avec la variable âge déjà dans le modèle, l'âge est testé pour être supprimé avant qu'une nouvelle variable ne soit sélectionnée pour l'entrée. Puisque l'âge répond au critère de rester, il est utilisé comme covariable dans l'analyse de la covariance pour la sélection de variables.

Comme aucune autre variable ne peut être ajoutée ou supprimée du modèle, la procédure s'arrête à l'étape 2 et affiche un résumé du processus de sélection (figure 30).

The SAS System
The STEPDISC Procedure

Stepwise Selection Summary										
Step	Number In	Entered	Removed	Partial R-Square	F Value	Pr > F	Wilks' Lambda	Pr < Lambda	Average Squared Canonical Correlation	Pr > ASCC
1	1	Age		0.1473	4.49	0.0438	0.85270842	0.0438	0.14729158	0.0438

Figure 30. Récapitulatif du processus de sélection

A la fin du processus de sélection de la ou des meilleure(s) variable(s) explicative(s) du dépérissement, seule la variable âge est gardée dans le modèle. Le coefficient de détermination de l'âge étant de 0,15, cela signifie que 15% de la variabilité du dépérissement est expliquée par l'âge. En outre, le fait que seule la variable âge soit retenue à la fin du processus signifie que c'est bien l'âge qui statistiquement explique le mieux le phénomène de dépérissement. On peut donc conclure que l'âge des arbres est bien une variable permettant de différencier d'une part un groupe d'arbres sains et d'autre part un groupe d'arbres dépérissants.

5.4 HYPOTHÈSE D'UNE INCOMPATIBILITÉ STATIONNELLE

Une bonne adéquation station-essence est un élément essentiel si l'on veut appliquer une sylviculture de production. Cette hypothèse d'incompatibilité stationnelle s'intéresse d'une part à l'alimentation hydrique et minérale de la Croix-Scaille. D'autre part, elle introduit les notions d'aptitude stationnelle et de tassement de sol, problématiques bien connues en forêt.

5.4.1 Alimentation hydrique

De façon générale, le hêtre est une essence sensible au manque d'eau en général et particulièrement aux canicules et aux sécheresses estivales. En outre, cette essence est peu apte à se développer sur une station à régime hydrique alternatif. Concernant l'apport en eau, le hêtre a besoin pour se développer d'un minimum annuel de 750 mm de pluie ce qui ne pose pas de problème sur le massif de la Croix-Scaille puisque les précipitations annuelles sont d'environ 1200mm, généralement bien réparties sur l'année.

Afin de mettre en évidence des éventuels problèmes locaux d'alimentation hydrique, une analyse de la cartographie des niveaux hydriques¹⁸ sur la zone d'étude a été réalisée. Des zones d'exclusion, de tolérance, de tolérance élargie et d'optimum ont été définies selon l'écogramme du hêtre (figure 32). Selon le tableau 13, près de 87% de la surface présente un niveau hydrique optimal pour la sylviculture du hêtre. De plus, 3,6% de la surface se trouve en niveau de tolérance. En outre, environ 1,36% de la surface se trouve en zone de tolérance élargie. Enfin, un peu moins de 10% de la surface de la zone d'étude possède un niveau hydrique excluant toute sylviculture du hêtre. En conclusion, près de 90% de la surface possède un niveau hydrique satisfaisant pour une essence telle que le hêtre. En revanche, environ 10% de la surface ne permet pas des conditions de croissance suffisantes, ceci pouvant expliquer certains dépérissements localisés, principalement dans sols gorgés en eau (niveaux hydriques de -3 et -4) ou bien pour les sols à régime hydrique alternatif (-2 RHA et -3 RHA). Un des principaux problèmes de l'enracinement oblique et moyennement profond du hêtre est sa difficulté à se développer dans les sols engorgés (Petit et al., 2017). En effet, c'est précisément ces types de sol qui pourraient mener à un état d'anaérobiose et par conséquent à la pourriture de certains tissus (Huart et al., 2003).

Tableau 13. Pourcentage de surface associée à chaque zone de niveau hydrique

Optimum	86,56%
Tolérance	3,59%
Tolérance élargie	1,36%
Exclusion	8,49%

5.4.2 Alimentation minérale

Concernant le niveau trophique¹⁹, théoriquement, près de 94,5% de la surface se trouve en tolérance pour la sylviculture du hêtre. De plus, 1,2% de la surface est à l'optimum et le reste de la surface (4,3%) se trouve à un niveau de tolérance élargie. Ces chiffres expliquent que le niveau trophique n'est a priori pas le facteur limitant à la sylviculture du hêtre. Néanmoins, seule une très mince partie est à l'optimum, le reste étant presque entièrement en tolérance. De ce fait, les conditions édaphiques ne sont pas optimales et des carences minérales locales pourraient malgré tout survenir.

¹⁸ Caractérise la disponibilité en eau du sol assurant les fonctions métaboliques des essences forestières

¹⁹ Caractérise la richesse chimique du sol en éléments échangeables

Tableau 14. Pourcentage de surface associé à chaque zone de niveau trophique

Optimum	1,21%
Tolérance	94,48%
Tolérance élargie	4,30%

En effet, un facteur limitant bien connu en sylviculture est la carence en éléments échangeables. Cette carence minérale peut mener à une simple perte de productivité comme elle peut entraîner les peuplements dans une phase de dépérissement global.

Dans le cadre d'un autre travail de fin d'études, une étude visant à quantifier la fertilité chimique des sols a eu lieu sur le massif de la Croix-Scaille. Cette quantification passe par le prélèvement et l'analyse de différents échantillons de sols répartis sur la zone d'étude (figure 31). Le tableau de résultats suivant (tableau 15) donne les valeurs obtenues pour les mesures de pH et les concentrations en différents éléments échangeables. Le tableau 16 décrit les différentes teneurs en éléments échangeables que le sol doit contenir afin de garantir de bonnes conditions de production en hêtre (Weissen & Michaux, 1998).

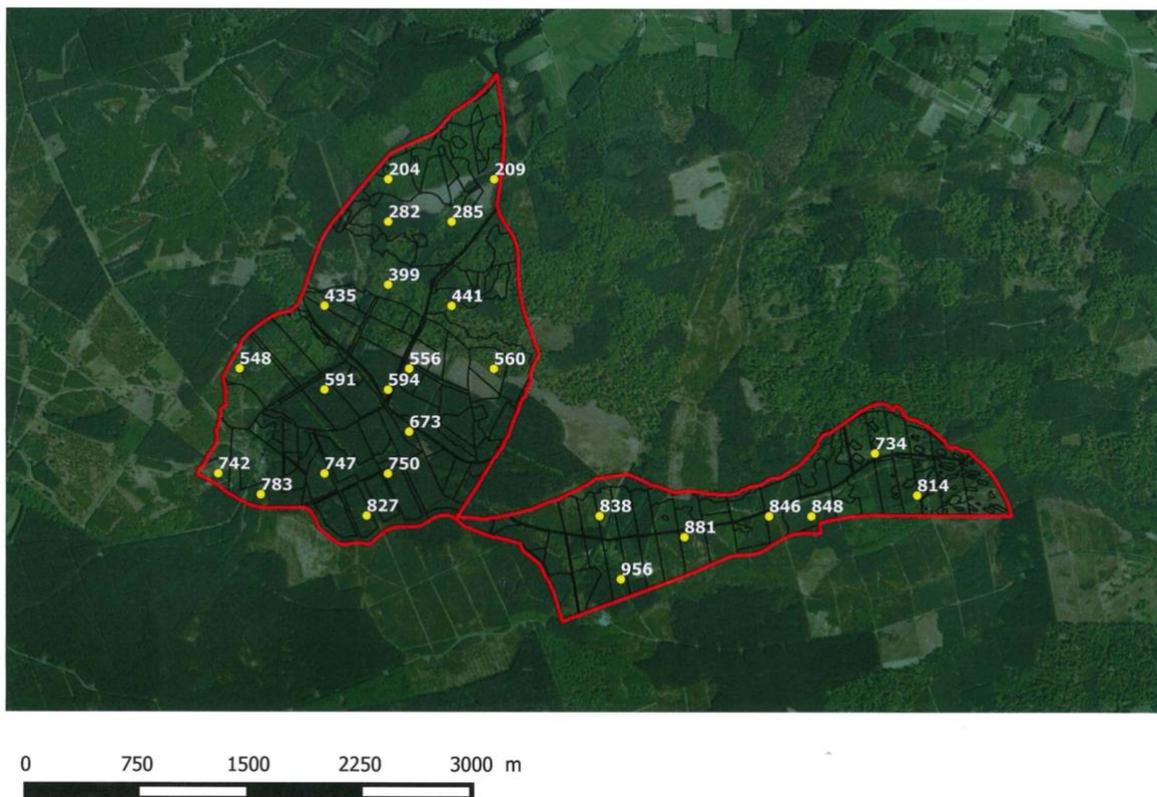


Figure 31. Localisation des points de prélèvement des échantillons (TFE Gaëtan Engelmann)

Après comparaison entre les tableaux 15 et 16, il apparaît que les valeurs de pH sont légèrement trop acides en dessous de la limite de satisfaction. En outre, la concentration en potassium est à l'optimum tandis que celle en calcium est satisfaisante. En revanche, les

valeurs de phosphore et de magnésium sont trop faibles ce qui prouve bien que le phénomène de carence minérale sur le massif de la Croix-Scaille est avéré.

Tableau 15. Teneurs (mg/100g) en éléments échangeables dans la couche de 0-20 cm du sol du massif de la Croix-Scaille (TFE Gaëtan Engelmann)

pH eau	pH KCl	P	K	Ca	Mg
4,1	3,5	2,4	4	5,6	1,5

Tableau 16. Teneurs (mg/100g) en éléments échangeables à dépasser dans la couche de 0-20 cm pour une sylviculture de production en hêtre

	pH eau	pH KCl	P	K	Ca	Mg	Mn
Satisfaisant	4,2	3,6	3-4	2-3	3-5	2	?
Optimum	5	4,5	5	4	15-25	2-3	1-2 (>3 excès)

Dans le cas du hêtre, il est reconnu que cette espèce a tendance à présenter de fortes fructifications dans une situation de stress (stress hydrique, stress trophique ou encore attaque parasitaire). De plus, il apparaît que généralement les arbres présentant de fortes fructifications sont souvent associés à une densité de feuillage faible ou nulle (Weissen & Michaux, 1998). Cette observation est bien en accord avec le fait que ce sont a priori les arbres stressés qui ont tendance à fructifier abondamment.

En outre, Weissen & Michaux ont testé différents types d'amendements et de fertilisations et ont observé les effets de ces traitements sur la fructification et la densité du feuillage. Globalement il en ressort que les traitements d'amendement (ajout de CaCO₃) ont un effet positif sur la densité du feuillage sans pour autant impacter la fructification. De plus, la fertilisation en magnésium (traitement dolomie + kiesérite) permettrait une augmentation de la fréquence des bonnes fructifications tout en présentant une meilleure densité de feuillage.

En conclusion, il apparaît que de fortes fructifications, en particulier quand elles se succèdent à faibles intervalles, seraient à mettre en relation avec la dégradation des cimes d'arbres souffrant de déficience en Mg. Ce phénomène pourrait donc expliquer les observations récentes de cimes très dégarnies sur le massif de la Croix-Scaille ou même les plus anciennes observations datant des années 80. Garder des sols suffisamment riches en éléments échangeables est donc primordial afin d'envisager toute sylviculture du hêtre.

5.4.3 Aptitude selon le fichier écologique des essences

Au regard de l'écogramme du hêtre, un niveau trophique de -2 et un niveau hydrique entre 0 et 2 placent le hêtre dans un état entre l'optimum et la tolérance (cas pour plus de 80% de la zone d'étude). En revanche, cette espèce est très sensible aux sols à régime hydrique alternatif (RHA) et en particulier aux sols à RHA de -3 (exclusion). Ce risque est principalement lié à l'engorgement hivernal, mais également à la sécheresse printanière ou estivale. Dans le cadre

de la Croix-Scaille, les risques sont assez faibles étant donné que moins de 5% de la surface se trouve dans ces conditions (figure 32).

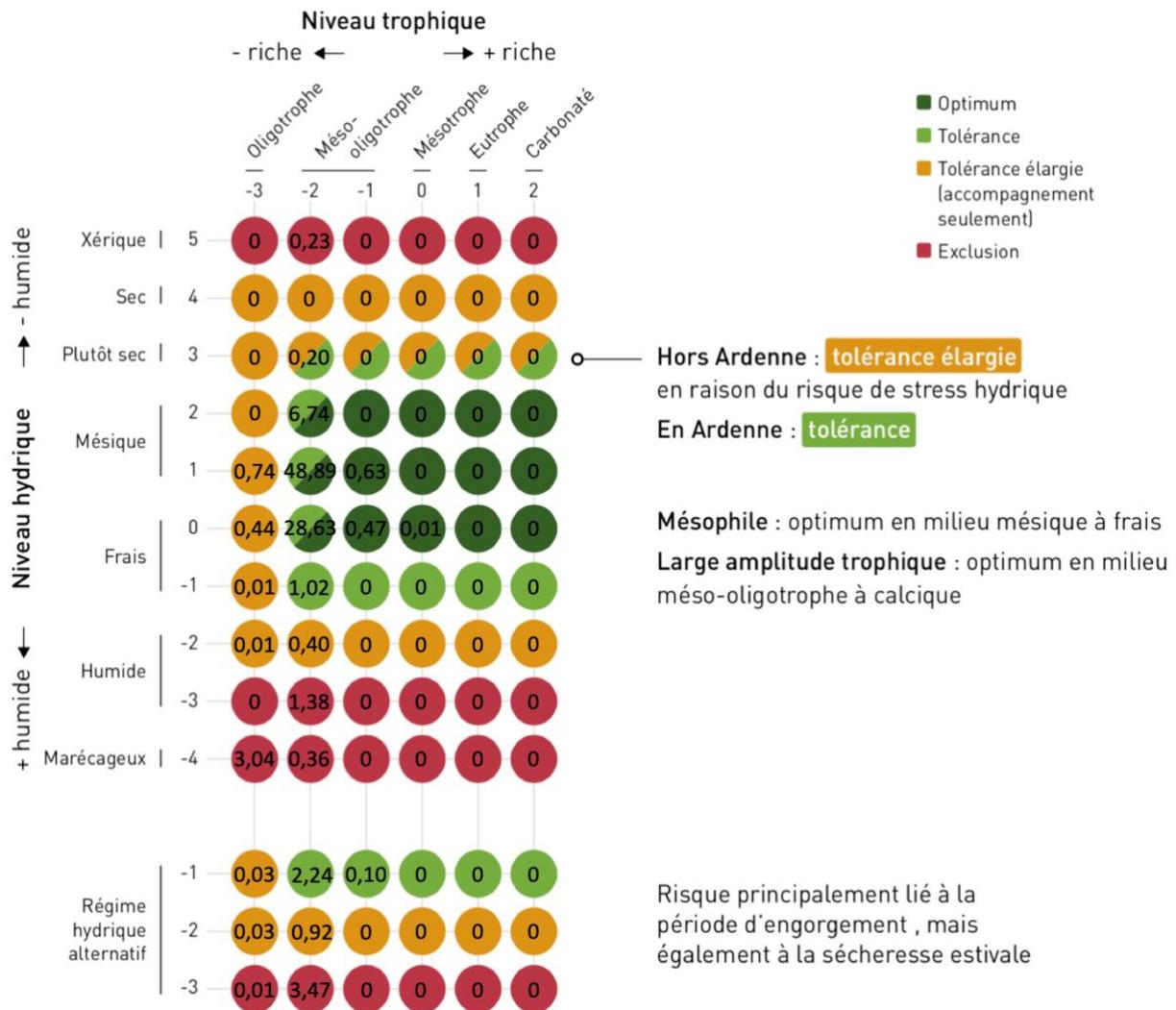


Figure 32. Écogramme du hêtre et pourcentage de surface du massif de la Croix-Scaille projeté dans celui-ci

Enfin, après croisement des couches des niveaux hydriques et trophiques (figure 33), il apparaît à nouveau que près de 90% de la zone se trouve en conditions acceptables pour le développement du hêtre. Le reste de la zone, soit une cinquantaine d'hectares, possède des conditions moins propices et clairement limitantes pour la sylviculture du hêtre. En outre, l'étroite correspondance entre les valeurs du tableau 17 et celles du tableau 14 témoigne bien de la grande dépendance du hêtre vis-à-vis du niveau trophique quant à son aptitude au développement.

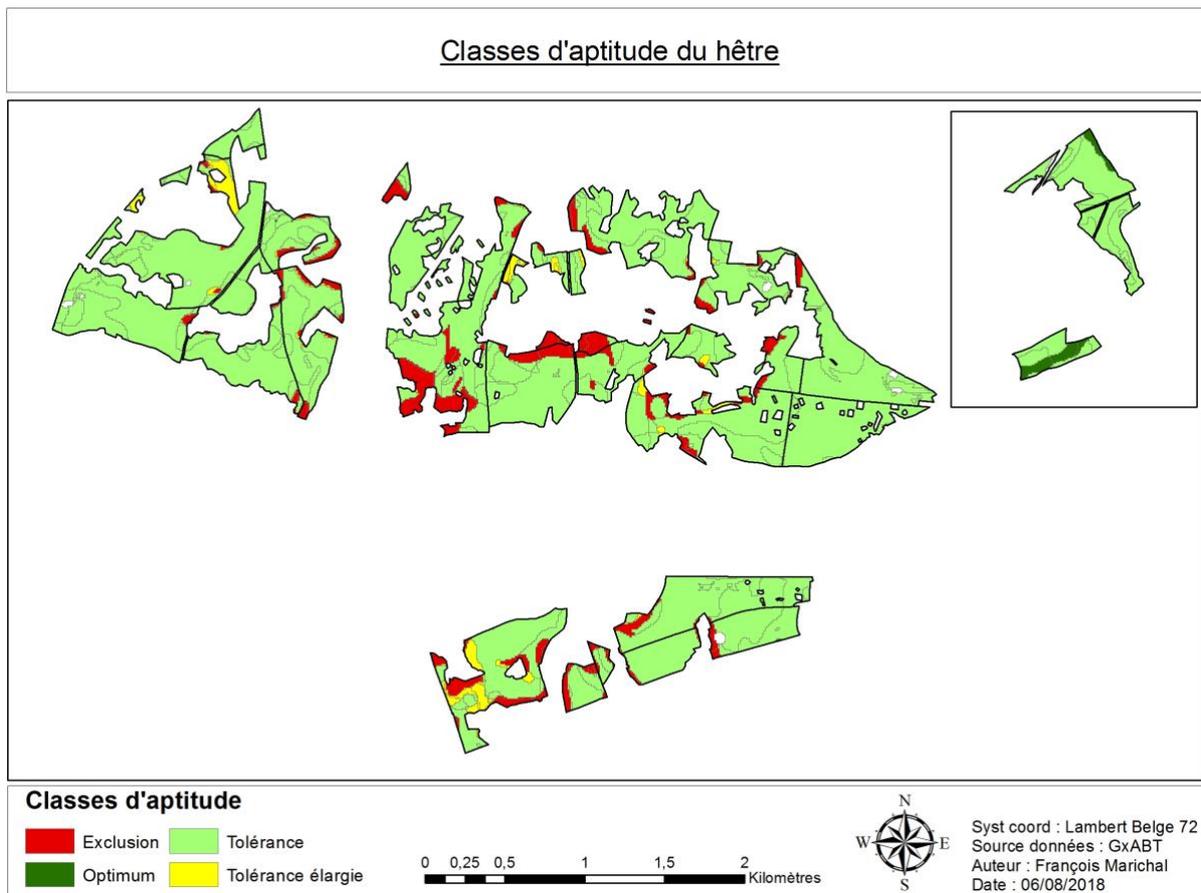


Figure 33. Cartographie des classes d'aptitude du hêtre sur la zone d'étude

Tableau 17. Pourcentage de surface par type de zone après croisement des niveaux hydriques et trophiques

Zone	Surface (ha)	Pourcentage
Exclusion	41,94	8,27%
Tolérance élargie	13,03	2,57%
Tolérance	446,29	88,05%
Optimum	5,62	1,11%

5.4.4 Problématique du tassement de sol

Tout d'abord, il faut savoir que le hêtre est une essence particulièrement sensible au tassement du sol. Sur le terrain, cette compaction du sol se marque par de nombreuses anciennes voies de débardage. De plus, ces sites touchés par la compaction sur sol sont généralement colonisés par du jonc (*Juncus sp.*), plante indicatrice du tassement de sol. La Croix-Scaille étant établie majoritairement sur un sol limono-caillouteux, les risques sont légèrement moindres dû à la présence d'une charge, ce qui rend le sol un peu plus porteur. Néanmoins, un tassement de sol peut tout de même mener à une perte de macro et de microporosité du sol. Une diminution de la macroporosité correspond à une diminution du volume occupé par les pores qui assurent la circulation de l'air et de l'eau gravitaire. Cette diminution conduit à une réduction de la perméabilité du sol. De plus, une réduction de la

microporosité correspond à la diminution de la réserve d'eau utile pour les plantes. Cette modification de la porosité du sol est défavorable, particulièrement en cas de sécheresse prolongée ce qui est particulièrement désavantageux pour le hêtre (Destain, 2013).

Une des raisons de ce compactage du sol est la répétition de passages de machines d'exploitation forestière (tracteurs, broyeurs, débusqueurs, porteurs, ...). Il faut savoir que le passage répété des machines constitue un processus additif et induit des effets à longue durée, difficiles à corriger. En peuplements résineux, la mise en place d'un réseau de cloisonnements d'exploitation limitant ce tassement est courante, mais en peuplements feuillus c'est seulement depuis peu que les exploitants sont tenus d'appliquer ce dispositif. La principale conséquence de la libre circulation des machines au sein de la parcelle est un tassement du sol en surface créant un horizon compact entravant le bon développement racinaire des arbres.

De plus, l'entrée de telles machines sur le sol forestier provoque des dégâts comme l'orniérage ou le scalpage (enlèvement local des couches superficielles ; Destain, 2013). La conséquence principale de tels dégâts est un tassement des horizons de surface, plus particulièrement pour les sols limoneux ou argilo-limoneux, lesquels sont plus sensibles à ce phénomène. Pour revenir sur le site d'étude de la Croix-Scaille, cette zone est bien établie sur un sol limoneux, mais de type caillouteux (Petit et al., 2017). En effet, la présence d'une charge caillouteuse diminue la sensibilité à la compaction, car les cailloux prennent en charge une partie des contraintes liées au passage des machines. De plus, il faut savoir qu'une teneur élevée en humus a tendance à augmenter l'élasticité du sol et de ce fait réduire sa sensibilité à la compaction (Destain, 2013). En outre, un contrôle de la période de passage de ces machines lourdes est primordial. En effet, le tassement est d'autant plus important pour les périodes où le sol possède une haute teneur en eau. Par conséquent, le passage des engins forestiers en période d'engorgement est donc à proscrire.

Les conséquences directes de ce tassement du sol sont d'une part une perte de porosité et d'autre part la formation de couches imperméables empêchant la percolation de l'eau. Ces problématiques réduisent la disponibilité de l'oxygène dans le sol et par conséquent, via un phénomène d'anaérobiose, provoquent la mort des racines fines ce qui perturbe le développement de l'arbre.

Ensuite, une conséquence indirecte de cette hydromorphie de surface est l'envahissement par une végétation spécifique des sols compactés (jonc, carex, molinie, ...). A priori ce n'est actuellement pas le cas sur la Croix-Scaille néanmoins le risque demeure. En cas d'envahissement trop important, cela limite les perspectives de régénération naturelle et par conséquent cela augmente les travaux de contrôle de la végétation et de plantation artificielle. En outre, une autre conséquence indirecte de cette perte de porosité est une potentielle limitation du choix des essences de plantation. En bref, un tassement de sol à l'échelle de la parcelle peut totalement modifier les potentialités de la station et ainsi un sol convenant

initialement à du hêtre peut ne plus lui convenir après des passages répétés des machines d'exploitation (D.S.F, 2015).

Enfin, le tassement de sol peut également avoir un impact sur le développement de champignons comme l'armillaire (*Armillaria spp.*) ou encore *Phytophthora spp.* L'apparition de ces deux pathogènes est favorisée par l'hydromorphie de surface, elle-même aggravée par le tassement de sol (D.S.F, 2015). Pour aller plus loin, en plus de provoquer des dégâts sur le système racinaire, *Phytophthora spp.* peut induire un dépérissement du houppier (Petit et al. 2017). Par conséquent, les dépérissements de houppiers observés sur le terrain pourraient potentiellement être expliqués en partie par la compaction de l'horizon de surface et de ce fait l'apparition de pathogènes comme *Phytophthora spp.*

6. DISCUSSION

6.1 PLACE DU HÊTRE EN TANT QU'ESSENCE

Le hêtre est une espèce relativement bien représentée en Région wallonne (8% de la surface de la forêt wallonne selon l'IPRFW) cependant elle possède de nombreuses limites et contraintes à sa sylviculture. Le principal facteur limitant est l'approvisionnement et la disponibilité en eau au cours de la saison de végétation. En effet, le hêtre a besoin d'un approvisionnement en eau constant, sans excès ni déficit ainsi que d'une humidité de l'air élevée (Armand, 2002). De ce fait, la place actuelle du hêtre est mise à mal par les prévisions alarmantes des changements climatiques, auxquels le hêtre serait très sensible.

Ensuite, malgré son remplacement historique par le chêne, le fait que le hêtre soit l'essence climacique par excellence en Région wallonne explique sa présence abondante dans nos forêts. De ce fait, cette essence a depuis de nombreuses décennies fait l'objet d'un intérêt particulier auprès des forestiers. De plus, le hêtre possède une aisance de régénération dans une multitude de conditions écologiques ce qui facilite son implantation et limite les coûts de sa sylviculture. En outre, son bois possède des qualités mécaniques et esthétiques intéressantes lui procurant ainsi un large panel d'utilisations. C'est précisément pour ces raisons que le hêtre possède la réputation qu'il a aujourd'hui et qui fait que cette essence est toujours, en termes de volume sur pied, la deuxième essence feuillue en Wallonie (Alderweireld et al., 2015).

Par conséquent, économiquement, le hêtre possède un intérêt particulier que ce soit tant pour meubler les maisons que, sous forme de bois énergie, pour les chauffer. De ce fait, le marché du bois de hêtre est important même si le prix du hêtre a fortement baissé à la suite de la crise sanitaire du début des années 2000. Cette crise a fortement fragilisé le marché, remettant en cause la continuité de la sylviculture de cette essence. Le futur s'annonce quant à lui aussi indécis avec les changements climatiques qui frappent à la porte, apportant encore un peu plus d'indécision sur l'avenir économique de cette espèce. De plus, comparées à d'autres essences comme le chêne, les utilisations du hêtre ne sont pas aussi diversifiées, en particulier en utilisation extérieure. Enfin, même si le hêtre jouit d'un attrait particulier dans nos régions, une perte de productivité et de qualité liée à un dépérissement global combiné aux incertitudes climatiques pourrait remettre en cause son statut d'essence de production. Par conséquent, il est nécessaire de revoir la place du hêtre et de pousser le propriétaire à orienter sa sylviculture en diversifiant les essences.

6.2 ÉVOLUTION ET FUTUR DE LA HÊTRAIE WALLONNE

Ces dernières décennies ont été synonymes de changements progressifs pour cette espèce qui a vécu une évolution contrastée en termes d'accroissement moyen annuel. Dans un

premier temps, les valeurs d'accroissement en circonférence du hêtre ont progressivement augmenté au cours du XX^{ème} siècle pour atteindre un maximum dans les années 1980. Cette augmentation de la productivité est attribuée à une sylviculture plus dynamique, aux retombées azotées atmosphériques fertilisantes ou encore aux effets positifs du réchauffement climatique (Latte et al., 2017).

La seconde phase est un phénomène de diminution de l'accroissement qui est le résultat de la succession de stress climatiques. Une autre problématique est le phénomène de tassements de sols qui a été amorcé dans les années 60 avec le début de l'utilisation de machines lourdes facilitant l'exploitation forestière. Cette révolution mécanique n'a à proprement parler pas induit une baisse directe de l'accroissement néanmoins certains auteurs considèrent qu'elle a contribué à sensibiliser le hêtre aux effets des accidents climatiques (Latte et al., 2017). Cette sensibilisation se fait par les tassements qui ont eu pour impacts de modifier le comportement hydrique du sol et d'altérer le fonctionnement des racines « tassées » induisant ainsi des dépérissements de cimes.

De plus, il faut ajouter à cette problématique un phénomène de retombées polluantes et azotées lesquelles ont encore affaibli une hêtraie déjà instable. Le tout combiné au tassement de sol ont contribué au dépérissement observé par endroits de nos jours.

En outre, Latte et al. mettent en évidence l'augmentation depuis 1980 de la variabilité interannuelle de l'accroissement. Cela signifie que la sensibilité du hêtre vis-à-vis du climat a tendance à augmenter. Par conséquent, un climat plus rigoureux, une vague de chaleur ou encore une sécheresse auront des impacts plus marqués sur l'accroissement du hêtre. Ce phénomène n'est évidemment pas à négliger dans un contexte de changements climatiques.

Un autre aspect important à considérer est l'âge de la hêtraie. La hêtraie wallonne est majoritairement de type irrégulier, mais cela n'empêche que certains individus puissent être âgés de deux à trois siècles. En outre, particulièrement en forêt privée, le faible prix du hêtre incite les propriétaires à laisser leur bois sur pied, ce qui provoque une capitalisation en volume. Cette surcapitalisation participe au vieillissement global de la hêtraie wallonne, ce qui pourrait avoir des conséquences physiologiques. En effet, la longévité du hêtre étant d'environ 250 ans en Wallonie, une hêtraie trop vieille pourrait naturellement dépérir avec par exemple une perte de ramification fine, des défoliations ou encore une chute brutale de la productivité.

Ensuite, il pourrait se poser la question de la gestion passée de la hêtraie wallonne. Le fait que la hêtraie wallonne possède une surreprésentation des gros et très gros bois (figures 13 et 14) pose alors la question de savoir si le forestier ne s'est pas trop concentré sur ces grosses classes de circonférence. Dans un but de mettre dans de bonnes conditions ces gros bois qui ont une forte valeur d'avenir, les plus petits individus dominés ont probablement été sacrifiés. Néanmoins, maintenant que le dépérissement touche localement les hêtraies wallonnes, la

relève à court et moyen terme n'est plus forcément assurée et il reste juste ces gros bois malades qui présentent un avenir incertain et une valeur économique amoindrie.

6.3 LA HÊTRAIE DE LA CROIX-SCAILLE

La croissance du hêtre est tardive, moyenne et soutenue. Cela signifie que le hêtre a une productivité moyenne, qu'il prend son temps pour démarrer, mais qu'il garde un rythme de croissance tout au long de sa vie. Une estimation de la courbe de productivité pour la hêtraie de la Croix-Scaille est donnée à la figure 34.

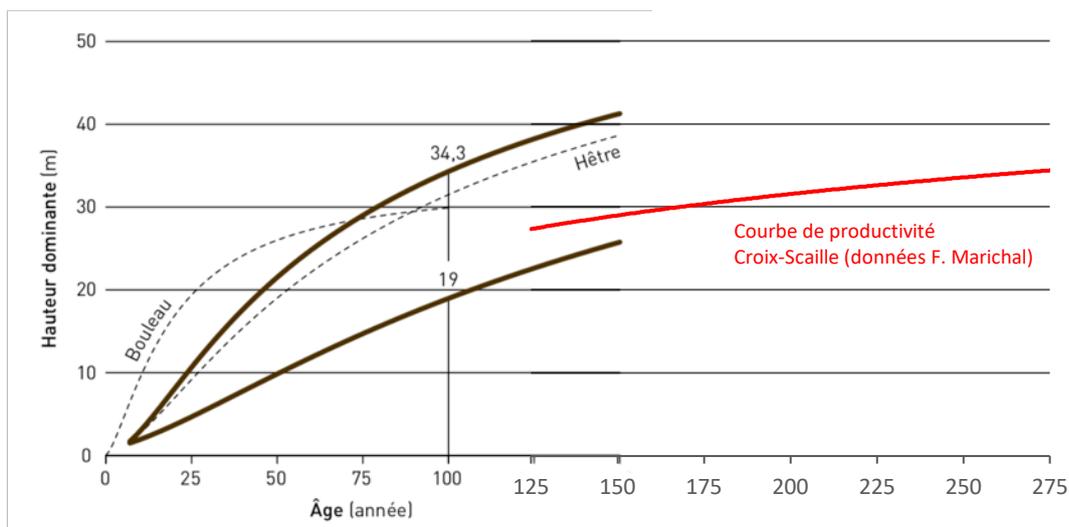


Figure 34. Courbes de productivité du hêtre en Wallonie et sur le massif de la Croix-Scaille (comparaison avec le bouleau)

Selon la fertilité des stations, la hauteur attendue d'un hêtre à l'âge d'exploitation est d'environ 25 à 40 m. En Wallonie les plus hauts sujets mesurés atteignent 52 m, en forêt de Soignes. Au niveau du massif de la Croix-Scaille, la hauteur des individus matures est assez élevée et peut atteindre sans problème 30 à 35 m (figure 34). En outre, pour le hêtre, l'accroissement moyen en volume est compris entre 4 et 10 m³/ha/an vers 150 ans (Rondeux et al., 1997). Cette valeur est très dépendante du type de station. Dans le cas de la zone d'étude (commune de Gedinne), la croissance se situe autour de 3 m³/ha/an, ce qui est assez peu productif (source IPRFW).

Le dépérissement de la hêtraie de la Croix-Scaille est un fait inéluctable. En effet, les peuplements sont clairsemés, déstructurés et individuellement, les arbres présentent de nombreux signes de dépérissement. Pour être précis, ce sont principalement les étages supérieurs de la futaie qui dépérissent, la régénération de hêtre étant bien présente. En outre, cette hêtraie est devenue très peu productive, limitant ainsi l'attrait économique de son exploitation. Cette perte de productivité résulte principalement de la présence de trouées colonisées par la régénération naturelle ainsi que d'une diminution récente des cernes d'accroissements (Latte et al., 2014).

Cependant, il ne faut pas s'arrêter qu'à l'espèce hêtre mais plutôt voir la hêtraie en tant que formation, en considérant l'ensemble de l'écosystème forestier. Certes la hêtraie est dépréssante, mais elle possède un réel potentiel d'amélioration, et ce sans devoir révolutionner la sylviculture. En effet, la hêtraie de la Croix-Scaille possède bon nombre d'essences compagnes qui ne demandent qu'à être mieux valorisées. En revanche, changer ainsi le système en place représente une charge de travail et un coût important, notamment via les plantations d'essences secondaires et la protection de celles-ci contre le gibier (répulsifs, clôtures).

La présence d'essences compagnes est une opportunité de mélanger la futaie. Les avantages des peuplements mélangés sont multiples comme par exemple une meilleure activité biologique des sols améliorant ainsi la décomposition de la fane. De plus, le mélange permet la répartition des risques phytosanitaires. En effet, en cas d'attaque d'un pathogène ou d'un ravageur sur une essence cible, seule cette essence sera touchée et pas l'entièreté du peuplement comme c'est le cas actuellement. En outre, le prélèvement minéral dans le sol est plus équilibré et mieux réparti, chaque essence ayant des besoins différents et souvent complémentaires. Ensuite, travailler avec plusieurs essences permet de s'adapter aux évolutions du cours du bois. Par exemple, en cas de chute des prix d'une essence, il suffit de concentrer les ventes sur les essences dont le marché est favorable en laissant en attente celles dont le prix n'est pas satisfaisant. Il ne faut en outre pas négliger la fonction d'éducation que pourraient avoir les espèces compagnes sur la régénération de hêtre. Cet abri permettrait une simplification des tailles et élagages artificiels facilitant ainsi la qualification des tiges d'avenir. Enfin, mélanger les essences est un bon moyen de maximiser la biodiversité. Chaque espèce possède sa propre faune et flore associée et la combinaison de chacune de ces espèces participe à l'amélioration de l'écosystème forestier (C.D.A.F, 2008).

Néanmoins, il existe certaines difficultés et limites à l'instauration d'un mélange fonctionnel. Le premier frein est d'ordre technique. En effet, toutes les essences, qu'elles soient héliophiles ou sciaphiles, ne requièrent pas les mêmes interventions. Le hêtre par exemple possède un tempérament sciaphile et donc dans l'optique de l'installation d'espèces de lumière, il sera nécessaire de contrôler la régénération du hêtre laquelle est assez envahissante. De plus, des interventions ciblées sur chaque essence demandent de la main d'œuvre et par conséquent représentent un investissement financier. Ensuite, toutes les espèces du mélange ne possèdent pas forcément un marché du bois bien développé. Par exemple, le bouleau est très répandu en Wallonie, mais même si ses qualités esthétiques et mécaniques sont indéniables, le commerce et l'industrie restent toujours un peu sceptiques quant à son utilisation et sa valorisation. Cependant, les incertitudes des marchés futurs sont telles qu'il serait peu judicieux de se fermer des portes.

En outre, l'entièreté de la station n'est pas forcément adaptée à la sylviculture du hêtre. Un type de sol particulier et problématique est le sol à argiles blanches. Ce type de sol est assez bien représenté sur la zone d'étude (figure 6) et mérite donc une attention particulière. Le

principal problème avec les sols à argiles blanches est un fonctionnement très contrasté entre les saisons concernant l'engorgement et l'approvisionnement en eau. En hiver, la formation d'une nappe perchée engorge rapidement les horizons de surface. Ce phénomène crée des conditions d'anaérobiose asphyxiante pour les racines des arbres établis sur ces sols. À l'inverse, en été, l'abaissement de la nappe perchée peut mener à des problèmes d'approvisionnement en eau à cause du faible réservoir utile maximal de ces sols créant ainsi des conditions de stress hydrique (Timal et al., 2012). Ces deux phénomènes opposés sont précisément deux des facteurs limitants à la sylviculture du hêtre. En effet, cette essence redoute particulièrement les engorgements hivernaux et les sécheresses printanières et estivales (Petit et al., 2017).

Enfin, un second problème directement observé sur le terrain est le mouvement lié à ces argiles. En effet, sous l'action du vent, les arbres bougent provoquant un mouvement du système racinaire et par conséquent une compaction du sol argileux. Cette liberté de mouvement des grosses racines crée donc un espace de vide entre le sol et la racine. Ce phénomène s'est matérialisé sur le terrain par une résurgence de l'eau en surface à chaque mouvement de l'arbre (sorte de mini geysers). Cela démontre bien l'existence d'un espace entre le sol et les racines, espace qui est dans ce cas présent comblé par l'eau de pluie. Le principal problème avec ce mouvement des grosses racines est la possibilité qu'elles se brisent en cas de grands vents. Le cas échéant, cela mènerait à la rupture de la colonne d'eau et par conséquent à un arrêt de l'approvisionnement en eau pour les parties supérieures de l'arbre.

7. RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES

7.1 FREINER LES PRÉLÈVEMENTS DE GROS BOIS

Une première mesure est d'adapter le prélèvement en fonction des objectifs de recapitalisation. En aménagement, un grand principe de base est le concept de possibilité qui se définit comme la quantité de bois susceptible d'être exploitée annuellement dans une forêt. Dans le cadre d'une forêt à l'équilibre, la possibilité de récolte annuelle correspond à l'accroissement moyen annuel (en volume ou en surface terrière). Dans le cas de la Croix-Scaille, le but sera ici de recapitaliser c'est-à-dire de prélever moins que l'accroissement annuel. Dans la pratique, la possibilité se calcule selon la formule suivante :

$$P = (12 \times AMG) + \left(\frac{GHA \text{ obs} - GHA \text{ cible}}{n} \right)$$

La possibilité (P) dépend donc de l'accroissement annuel en GHA (AMG), de la durée de la rotation (12 dans ce cas), du GHA actuel (19,8 m²/ha selon inventaire IFA ; tableau 6) et du GHA cible c'est-à-dire celui que l'on vise pour être à l'équilibre. Dans ce cas-ci, pour arriver à l'équilibre on jouera sur le n, c'est-à-dire le nombre de rotations au bout desquelles on souhaite atteindre l'équilibre. De cette façon, la possibilité sera inférieure à l'accroissement sur la durée d'une rotation et par conséquent il y aura recapitalisation.

En outre, une pratique courante en hêtraie de la Croix-Scaille est le recours à des coupes sanitaires. Ces martelages particuliers visent non pas à récolter l'accroissement, mais bien à tenter d'enlever tous les individus apparaissant comme dépérissants, mais qui possèdent encore une valeur marchande. De prime abord, cette méthode est un bon moyen de limiter la source d'inoculum des différents pathogènes, cependant dans la réalité ce type de martelage participe grandement au déséquilibre des peuplements et au tassement du sol. En effet, ce type de martelage cible les arbres sur base de leur état sanitaire indépendamment de leur grosseur, ce qui mène à la coupe presque systématique des très gros bois, ces derniers étant a priori plus enclins au dépérissement. Cela a pour conséquence la création d'un peuplement déséquilibré, avec une faible surface terrière et une déficience en très gros bois (voir figures 10 et 11). Compte tenu de ces faits, il serait donc plus opportun de revoir la méthode de martelage et d'adopter une méthode mixte ciblant à la fois les arbres trop atteints tout en prenant en compte leur grosseur. De façon plus globale, il est important de prendre en compte l'accroissement de la hêtraie afin d'éviter de se retrouver avec des peuplements trop clairsemés et éclaircis. Le nouvel inventaire permanent mis en place en 2017 sera donc un outil important en vue de mieux connaître la productivité de la hêtraie et d'ainsi mieux adapter l'intensité des coupes.

7.2 DIVERSIFIER LA RÉGÉNÉRATION

Un point fondamental pour envisager sereinement la continuité de la hêtraie de la Croix-Scaille est la diversification en essences. En effet, les changements climatiques vont redistribuer les cartes et le mélange est une des armes les plus importantes afin d'améliorer la résilience des peuplements (Claessens, 2016). Pour rester cohérent avec le contexte local, il est préférable de favoriser les essences compagnes déjà présentes sur le massif. En effet, ces essences comme le chêne sessile, le sorbier ou encore le bouleau présentent naturellement une écologie compatible avec une telle station ardennaise. La première chose à faire sera donc de protéger la régénération naturelle de ces espèces très sensibles à l'abrutissement par le gibier.

Ensuite, si malgré ces efforts, trop peu de tiges de ces essences sont présentes, il faudra envisager la plantation artificielle en guise de regarnissage. Afin de garantir une proportion suffisante en mélange, cet enrichissement devra prendre part dans les trouées d'au moins 7 ares. En effet, les essences secondaires doivent représenter entre 20 et 40% du couvert dominant (Orfinger et al., 2005). En outre, cette plantation pourra être enrichie en essences encore non présentes dans la région comme du châtaignier, de l'érable sycomore (zones les plus fertiles) ou encore du tilleul à petites feuilles (versants sud-est). L'utilisation de telles essences peu communes en Ardenne demande néanmoins la validation de la comptabilité écologique avec la station. Pour le châtaignier, la Croix-Scaille offre une station compatible tant du niveau de l'approvisionnement en eau que du point de vue du niveau tropique. La limite vient ici de l'altitude élevée qui augmente le risque aux gelées tardives. Par conséquent, pour l'utilisation d'une telle essence en accompagnement, il faut bien vérifier de la planter dans les parties basses et bien exposées du massif. Concernant l'érable sycomore et le tilleul à petites feuilles, la situation est sensiblement la même. Ces essences sont globalement compatibles avec la station, pour autant qu'on évite les zones trop acides et trop humides (voir figures 4 et 5). Il faut également bien veiller à protéger les plants, car ces essences sont très appréciées par la faune. En bref, ces trois essences (châtaignier, érable sycomore et tilleul à petites feuilles) ont de bonnes chances de s'établir et de se développer sur la zone d'étude. Néanmoins, leur croissance étant ralentie par les températures estivales trop faibles, il faudra dans un premier temps valoriser ces essences en tant qu'accompagnement et pas comme espèces productives principales.

Enfin, pour remédier au problème d'installation du hêtre sur les sols à argiles blanches, la solution la plus adaptée serait un arrêt progressif de la hêtraie pour se tourner vers une sylviculture du chêne sessile. Comparée au hêtre, cette espèce possède l'avantage d'avoir un enracinement bien plus puissant, capable de transpercer ces couches compactes. En outre, il apparaît que le chêne et particulièrement le chêne sessile serait une essence relativement bien adaptée aux changements climatiques. À noter que les sols à argiles blanches ne couvrent

environ que 8% de la zone d'étude (figure 6 et tableau 4) ce qui correspond potentiellement à environ 40 ha à transformer après expertise de terrain.

7.3 DYNAMISER LA SYLVICULTURE

L'objectif suivant de cette approche nouvelle est de redynamiser la sylviculture du hêtre. Cette volonté s'inscrit dans un but de valorisation de la régénération existante et établie. En effet, il existe dans le massif de la Croix-Scaille d'importants îlots de régénération de hêtre. Néanmoins, même si la régénération est présente en quantité, la qualité individuelle des tiges mérite plus de discussions. Le problème vient principalement du fait que ces tiges ont une croissance libre dénuée de toute sylviculture. Dans le but d'éduquer la tige, il serait judicieux de valoriser la compression naturelle créée par l'abondance de régénération de celle-ci. Si on continue à décapitaliser, on crée des conditions microclimatiques moins favorables à la qualité des perches (grosses branches, fourches, ...). Une fois la hauteur finale de grume atteinte, ces arbres continueront à être détournés afin d'optimiser l'espace du houppier et ainsi de maximiser la croissance en circonférence de la grume.

Le gros avantage de la dynamisation de la sylviculture est la réduction de l'âge d'exploitation. En effet, le fait de faire émerger plus rapidement les perches d'avenir favorise un développement et une maturation rapides de l'arbre. Dans le cadre des problèmes de dépérissement observés sur la Croix-Scaille, réduire la révolution serait très utile pour limiter ce dépérissement étant donné que ce dernier est dépendant de l'âge de l'arbre (voir point 5.3). Enfin, une réduction de la révolution permettrait de limiter les risques d'exposition aux accidents climatiques.

7.3.1 La méthode QD

D'un point de vue pratique, la méthode QD est une technique novatrice et plus dynamique visant la sylviculture d'arbres objectifs (Baar et al., 2004 ; Wilhelm & Rieger, 2017). Cette méthode, développée par MM. Wilhelm et Rieger, est une technique bien connue en Allemagne qui priorise une production de bois de qualité, de grande valeur, de manière multifonctionnelle, naturelle et avec un minimum d'investissements. La force de cette méthode est d'être adaptable aux aléas climatiques grâce à la combinaison de plusieurs essences. La méthode QD se compose de quatre étapes représentant chacune un stade de la croissance de l'arbre.

Premièrement, l'étape initiale consiste en l'établissement et le développement de la régénération. La disparition d'un ou de plusieurs arbres suite à une exploitation, un chablis ou une mortalité va permettre la mise en lumière des recrûs présents dans la strate herbacée. Pour cette étape, il est important de miser prioritairement sur une régénération naturelle en suffisance et variée. En outre, il est important de valoriser les essences compagnes déjà présentes sur le massif en les protégeant du gibier et de la flore envahissante (ronce, fougère,

...). Pour compléter cette régénération naturelle, la plantation d'essence accompagnantes est vivement conseillée afin de diversifier la futaie et ainsi de lui garantir une meilleure adaptabilité et résilience face aux perturbations futures.

Concernant les travaux, l'établissement de la nouvelle génération d'arbres n'a besoin que de petites interventions représentant peu de moyens. Ces interventions agiront sur la compétition et s'effectueront de manière ponctuelle, uniquement en cas de nécessité avérée. Ces actions consistent à prélever de manière complète ou partielle les individus trop compétiteurs. Ces interventions visent à réguler la compétition au sein de la régénération favorisant ainsi un élagage naturel. En revanche, l'enrichissement en essence est plus coûteux. En effet, outre la plantation, il faut protéger les plants contre le gibier via l'utilisation de répulsifs ou encore la mise en place de clôtures.

Vient ensuite l'étape de qualification. La qualification est le stade où les jeunes arbres voient leur croissance en hauteur prendre son plein essor. Ils ont dépassé la végétation herbacée et ligneuse concurrente. Le but de cette étape va également être l'obtention des arbres objectifs, ces derniers présentant une bille de pied sans branches grâce à l'élagage naturel obtenu via la compétition avec les arbres voisins. Si un arbre est trop concurrent d'une tige d'avenir, il peut être soit annelé ou abattu en fonction de son impact sur le houppier de la tige concernée. En dernier recours, l'élagage peut être fait artificiellement, toutes les branches sous l'extension du houppier sont donc élaguées. Afin d'obtenir ces arbres objectifs, il va être nécessaire de fonctionner préalablement avec des tiges d'avenir. L'évolution de ces individus va être évaluée à intervalle de maximum 6 ans, dans le but de déceler parmi ces derniers les « supervitaux ». Toutes ces tiges, qu'elles soient désignées dans le futur comme arbre objectif ou non, ne seront pas forcément des « supervitaux » ; tout dépendra de la génétique du sujet. C'est pourquoi il est primordial pour la rentabilité économique de la méthode QD d'identifier parmi les tiges d'avenir celles qui sont « supervitales », car elles sont censées détenir le plus grand potentiel de plus-value.

L'étape suivante est celle de dimensionnement qui correspond au moment où les arbres d'avenirs voient leur houppier se développer fortement, boostant ainsi la croissance du fût. C'est lors de cette étape que la désignation réfléchie des arbres objectifs va avoir lieu parmi les arbres d'avenir. Cette sélection doit se faire en prenant en compte un paramètre essentiel : les layons de débardage. Ces layons, espacés d'environ 40 mètres auront pour rôle d'éviter autant que possible que les machines d'exploitation parcourent l'entièreté de la surface, augmentant ainsi le tassement de sol.

Lors de la désignation des arbres objectifs, les tiges d'avenir avec la présence d'un critère éliminatoire, par exemple la présence d'une fourche "en V", sont directement exclues. Il faut également que la distance entre arbres objectifs soit au minimum de 12 mètres pour avoir une croissance en grosseur optimale. Enfin, les individus désignés doivent être marqués de manière persistante afin d'être visibles au moins jusqu'à l'intervention qui suit : le détournage.

Cette intervention consiste à éliminer tous les arbres concurrents de l'arbre objectif au niveau du houppier afin de permettre l'expansion latérale de celui-ci favorisant ainsi la production de bois.

La maturation est l'étape finale et commence dès que l'arbre atteint 75 à 80% de sa hauteur totale finale. C'est lors de cette étape qu'il faut s'intéresser aux diamètres objectifs minimaux qui sont spécifiques à chaque essence. Non seulement il ne faut pas prélever un arbre objectif avant qu'il soit à maturité, mais il est surtout nécessaire que l'arbre ait produit du bois précieux avec un fil droit d'une épaisseur minimale de 20 cm pour arriver à un niveau de valeur très intéressant. De plus, le prélèvement d'un arbre doit être réfléchi en fonction du marché du moment pour une essence donnée.

Pour conclure, l'application de la méthode QD pourrait être une bonne solution pour redynamiser la sylviculture en place tout en se prémunissant contre les effets des changements climatiques. En effet, la sylviculture d'arbres objectifs, de par l'utilisation d'une multitude d'essences, augmente la résilience des peuplements face aux perturbations. Ensuite, mélanger les essences permet de partager les risques en cas d'attaque de ravageurs ou de crise phytosanitaire. De plus, cette technique permet une meilleure valorisation financière des belles grumes, ce qui est non négligeable quand on sait que la hêtraie actuelle connaît quelques ralentissements de la productivité. Cependant, la méthode QD reste une pratique demandant un certain bagage technique, c'est pourquoi son application passera obligatoirement par la formation des techniciens de terrain.

7.4 MESURES PRÉVENTIVES CONTRE LE TASSEMENT DE SOL

La compaction du sol a un impact tellement longévif que les mesures curatives n'ont que peu d'effet afin de mitiger les effets de ce tassement du sol. Par conséquent, il faut agir en amont et prendre des mesures préventives afin de préserver nos sols et d'éviter surtout d'empirer la situation.

Une première mesure très importante est l'exploitation des arbres quand les conditions climatiques sont favorables. Comme spécifié précédemment, la teneur en eau du sol influence fortement la sensibilité à la compaction. Cette sensibilité est maximale pour une teneur en eau proche de 10-20% de la capacité au champ (Destain, 2013). Par conséquent, il est nécessaire d'adapter la période d'exploitation en fonction de ce critère et donc d'exploiter dans la mesure du possible dans des conditions sèches ou en cas de fortes gelées.

Une deuxième mesure est évidemment la mise en place d'un réseau de cloisonnements d'exploitation. Cette technique permet de concentrer le passage des machines sur un réseau de sentiers prédéfinis. Certes cela implique le sacrifice de ces sentiers, mais c'est un bon moyen pour fortement limiter le passage des machines sur le reste du peuplement (Destain, 2013).

Enfin, une dernière mesure est l'utilisation de machines plus légères et adaptées. Le but de cette mesure est principalement de réduire la charge soutenue par chaque essieu. Il faut en outre veiller à bien répartir la charge sur un maximum de roues et de façon homogène sur chaque roue prise individuellement. Cette technique permet d'augmenter la surface de contact et ainsi de limiter la charge supportée par centimètre carré de sol. En pratique, l'utilisation de pneus de grande taille, de pneus basse pression ou de chenilles est un bon moyen d'augmenter cette surface de contact. Pour aller plus loin, l'utilisation de machines à châssis articulés permet d'améliorer l'adhérence en épousant au mieux le relief du sol.

7.5 LUTTE CONTRE LA CARENCE MINÉRALE DU SOL

La solution la plus intuitive pour lutter contre une carence minérale du sol est le recours à des intrants chimiques, l'amendement et la fertilisation du sol. Dans le cadre d'une carence en magnésium, la solution serait donc l'utilisation d'engrais pour amener le sol à un taux en Mg dans les feuilles satisfaisant ($80 < \text{Mg} < 130 \text{ mg}/100\text{g}$, > 130 étant l'optimum). Le problème majeur avec cette solution est le cadre légal qui est très restrictif quant au recours à des intrants en forêt (article 41 du code forestier wallon). Un autre problème est le saut brusque de pH que provoquerait l'ajout d'intrants. Cette modification du pH aurait un effet sur la fixation ou le rejet de minéraux par les arbres. De plus, l'utilisation de ce type de produits représente un danger de contamination de la nappe phréatique ou des écosystèmes voisins.

Une seconde solution, plus proche de la nature et plus durable est un mélange adéquat et équilibré entre différentes espèces. Le mélange en essences permet d'enrichir le sol en éléments échangeables (K, Ca, Mg, Mn). Il apparaît que le hêtre se comporte mieux quand il est en mélange avec du chêne (pour autant que le mélange soit suffisant et le sol pas trop pauvre). De plus, des essences secondaires comme le peuplier tremble, le sorbier ou encore le bouleau verruqueux présentent un feuillage très riche en magnésium et autres éléments. Par conséquent, leur fane pourrait contribuer à influencer favorablement les conditions chimiques, biologiques et physiques des couches superficielles du sol abritant l'essentiel du système racinaire (IRSIA, 1997).

Dans le cadre de la Croix-Scaille, les mesures à prendre ne diffèrent pas du cadre général. Néanmoins, dans ce cas précis, l'amendement et la fertilisation de plus de 500 Ha seraient beaucoup trop coûteux et compliqués à mettre en place. De plus, le statut de forêt publique en zone Natura 2000 limite encore un peu plus le cadre légal rendant improbable l'acceptation d'un tel dossier. Par conséquent, la valorisation des essences compagnes comme le chêne sessile, l'érable sycomore ou le bouleau semble une nouvelle fois la meilleure solution.

7.6 DÉFINITION D'UN NOUVEL ITINÉRAIRE SYLVICOLE

7.6.1 Objectifs généraux de l'itinéraire

Cet itinéraire a pour but premier de redynamiser la sylviculture en place par une plus large valorisation des essences compagnes et un meilleur soin à la régénération existante. Cet itinéraire vise à appliquer la méthode QD ou sylviculture d'arbres objectifs sur cette hêtraie de la Croix-Scaille.

Outre un changement du système sylvicole en place, cet itinéraire a également pour objectif de corriger certaines pratiques inadaptées et destructives pour les peuplements et le sol. Par exemple, à court terme, il sera nécessaire de stopper les coupes sanitaires pures et dures. Il serait plus judicieux d'adopter une nouvelle norme de martelage visant un rééquilibrage de la structure des peuplements. Cette norme nouvelle corrigerait la structure en marquant par exemple les classes de circonférence en surplus (gros bois) tout en épargnant celles en déficit (moyens et très gros bois). Bien entendu, une attention particulière devra toujours être donnée aux arbres atteints, mais sans systématiquement marteler les arbres touchés par les premiers symptômes.

Enfin, afin d'améliorer la protection de l'écosystème et en particulier des sols, il serait utile de renforcer le cahier des charges destiné aux exploitants forestiers. Ce document doit être plus restrictif quant aux périodes d'exploitations et il doit inclure une obligation pour l'exploitant de travailler avec des cloisonnements d'exploitations (prévus par la méthode QD). Au vu de la configuration clairsemée des peuplements de la hêtraie de la Croix-Scaille, ce dernier point ne représente pas un problème. Il est en outre nécessaire de favoriser le cycle des minéraux et la présence de bois mort en forêt. Cette mesure participe à une augmentation de la biodiversité (plus d'espèces d'insectes, d'oiseaux ou encore cortège floristique plus diversifié).

7.6.2 Itinéraire et travaux selon les stades de développement des arbres

Gros et très gros bois

- Diminution de la récolte, se focaliser sur les besoins de la régénération et de la diversification
- Abandon de certains gros bois ou très gros bois dépérissants
 - Favorisation de la biodiversité
 - Bois mort et cycle des nutriments

Moyens bois

- Passage en éclaircie à mi-rotation (tous les 6 ans)

Petits bois

- Passage à mi-rotation pour désigner les arbres objectifs parmi les tiges d'avenir (distance de minimum 12 mètres entre les arbres objectifs)
- Détourages vigoureux des arbres objectifs à mi-rotation (tous les 6 ans)

Perches

- Désignation précoce d'arbres d'avenir et taille de formation éventuelle

Semis/fourrés/gaulis

- Favoriser l'émergence des essences compagnes par dépressages/cassages
- Surveiller l'émergence des belles tiges (arbres d'avenir)
- Surveiller les dégâts d'écorcement

Zones de trouées

- Plantations enrichissantes en essences compagnes dans les endroits déficitaires en régénération (voir figure 15), plantation par îlots avec un maillage de 1m x 1m
 - Chêne sessile, châtaignier, érable sycomore et tilleul à petites feuilles
- Dégagements annuels les trois premières années dans les plantations
- Placement de répulsifs contre le gibier annuellement jusqu'à ce que le bourgeon apical soit hors d'atteinte
- Coupe ou casse des individus trop compétiteurs, malformés ou gênants

Cloisonnements d'exploitation

- Délimitation de layons formant les cloisonnements d'exploitation (environ tous les 40 mètres, passage dans les trouées déjà existantes)

8. CONCLUSION

Un fait irrévocable est l'actuel dépérissement de la hêtraie de la Croix-Scaille. En effet, l'enchaînement des différentes visites de terrain couplé à l'analyse des données d'inventaire fait apparaître l'évidence de peuplements clairsemés et déséquilibrés. Individuellement, les arbres présentent des défauts majeurs notamment au niveau de la formation du houppier ainsi que des traces récurrentes d'attaques de champignons. Pour aller plus loin, les arbres sur pied présentent de nombreuses traces reliques de la crise sanitaire du hêtre du début des années 2000. Ce dépérissement n'est donc pas neuf et il a tendance à s'accroître au cours de ce siècle. C'est pourquoi il est nécessaire d'une part d'isoler les facteurs causant ce dépérissement et d'autre part de fournir des solutions visant à limiter ce dépérissement. L'objectif ultime est de créer des peuplements plus résilients et prêts à faire face aux enjeux incertains du climat de demain.

Pour reprendre les éléments chronologiquement, la première contrainte à laquelle la hêtraie a dû faire face est le tassement de sol. Ce phénomène est apparu dès la généralisation des machines d'exploitation en forêts. Ces engins sont très destructifs pour les sols d'autant plus s'ils sont utilisés à des périodes de l'année inadaptées. Outre le fait que le tassement de sol inhibe le développement du hêtre, il favorise également l'apparition de pathogènes impactant ainsi la croissance des racines et du houppier. Le hêtre étant une essence très sensible à la compaction des sols, le tassement du sol a sans aucun doute très rapidement sensibilisé la hêtraie entraînant ainsi les peuplements dans la première étape du cycle de dépérissement.

Ensuite, un autre facteur déstabilisateur de la hêtraie est le changement climatique. Il ne fait aucun doute que ce dernier est déjà d'actualité impactant ainsi avec des conséquences plus ou moins importantes la forêt wallonne. Ces dernières années, la sensibilité climatique du hêtre a augmenté et à l'inverse son accroissement a diminué. En outre, au cours des dernières décennies, les événements climatiques extrêmes se sont multipliés avec à chaque fois un temps de réapparition un peu plus court et un impact accru. Cela a pour conséquence un épuisement des réserves énergétiques des arbres dû à la récurrence de plus en plus importante de ces anomalies climatiques. Ce manque de temps pour les arbres afin de se remettre de ces stress accentue l'état de dépérissement déjà amorcé par le tassement de sol.

En outre, un autre facteur prépondérant est l'âge avancé de la hêtraie de la Croix-Scaille. La datation par comptage des cernes réalisée dans le cadre de cette étude montre un âge moyen des gros bois (circonférence supérieure à 120 cm) de près de 180 ans. L'étude statistique des résultats montre également une différence significative entre l'âge des arbres sains et celui des arbres dépérissants. Cette étude met en évidence une différence positive d'environ 30 ans pour les individus dépérissants par rapport à ceux dont l'aspect est sain. Certains individus dépassent allègrement les 200 ans, ce qui est très proche de l'espérance de vie théorique du

hêtre en Wallonie. Au regard de cet élément, le dépérissement observé est sans doute renforcé par un état de sénescence naturel causé par un âge trop avancé de la hêtraie.

Dans une moindre mesure, le site d'étude présente certaines limites liées à la situation stationnelle. En effet, environ 10% de la surface ne présente pas un niveau trophique ou hydrique adéquat pour la sylviculture du hêtre. Ces chiffres sont renforcés par la présence locale de sols marginaux comme des sols paratourbeux ou encore des sols à argiles blanches. Le système racinaire du hêtre est très limitant et n'est pas en mesure de se développer dans des sols trop compacts ou gorgés en eau. Cependant, ces limites stationnelles peuvent expliquer une difficulté d'installation du hêtre en ces endroits, en revanche elles n'expliquent pas le dépérissement observé plus récemment. Un autre facteur lié au sol et plus enclin à expliquer le récent dépérissement est une carence minérale du sol. Cette carence notamment en magnésium serait le résultat des successives grosses fructifications produites en réaction à des stress climatiques. En effet, il faut faire le lien entre ces fortes fainées et les différentes situations de stress climatiques observées au cours des récentes décennies.

En bref, le dépérissement observé sur le massif de la Croix-Scaille est explicable par une multitude de facteurs. Parmi ceux-ci on retrouve en fer de lance le tassement de sol, l'âge et les accidents climatiques. Le problème d'incompatibilité stationnelle est plus sporadique et touche une surface restreinte. Le massif de la Croix-Scaille se compose majoritairement de vieux hêtres qui ont d'abord été sensibilisés par le tassement de sol puis sont arrivés les changements climatiques avec l'augmentation de la récurrence des événements extrêmes, ce qui n'a pas amélioré la situation. De ce fait, les arbres sensibilisés et épuisés ont fini par dépérir. Il faut donc oublier la sylviculture conservatrice du hêtre telle qu'on la connaît, car les changements climatiques ne vont aller qu'en s'accroissant. Cela passe par une valorisation des essences déjà présentes avec un renforcement potentiel en essences d'accompagnement. De plus, il faut bien veiller à prendre soin des sols, et à mieux réguler et réglementer les exploitations forestières avec des machines lourdes. Enfin, la sylviculture future se devra d'être plus dynamique, plus proche de la régénération naturelle et plus centrée sur la production d'arbres de grande valeur. En effet, la sylviculture d'arbres objectifs diminue la révolution ce qui constitue une bonne solution au dépérissement quand on sait que ce dernier est influencé par l'âge des arbres. Cela limite en outre la durée d'exposition aux risques sanitaires et climatiques. Un itinéraire technique a été proposé dans le cadre de ce changement de sylviculture.

9. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alderweireld, M., Burnay, F., Pitchugin, M., & Lecomte, H. (2015). Inventaire forestier wallon. Résultats 1994 – 2012. *SPW, DGO3, DNF, Direction des Ressources forestières, Jambes*, 236 p.
- Armand, G. (2002). *Le hêtre autrement*. Paris, Belgique : Institut pour le développement forestier. 263p.
- Baar, F., Snoeck, B., Balleux, P., & Claessens, H. (2004). La sylviculture d'arbres « objectif » ou d'arbres de place. *Forêt Wallonne*, 68, 2-8.
- Centre de développement agro forestier de Chimay. (2008). ORIENTATION SYLVICOLE / Guide n° 007. Consulté à l'adresse http://www.cdaf.be/docs/web/pdf/B1b_orientations_sylvicoles/guide_007_peuplements_melanges.pdf
- Claessens, H. (2016). Quelques considérations pour adapter nos forêts aux changements climatiques. *Sylva Belgica*, 8-17.
- Claessens, H., Claessens, L., Longrée, C., Nivelles, L., Tahir, B., Lisein, J., & Lecomte, H. (2017). Près de 20 ans après sa grave crise sanitaire, où en est la hêtraie ardennaise ? *Forêt Nature*, 142 (Janvier-Février-Mars), 30-36.
- Département de la Santé des Forêts. (2015). Tassements du sol. Consulté 18 avril 2018, à l'adresse <http://ephytia.inra.fr/fr/C/18550/Forets-Tassements-du-sol>
- Destain, M.-F. (2013). La compaction des sols forestiers en Wallonie, 0-53. *SPW, Direction générale opérationnelle agriculture, ressources naturelles et environnement*.
- Hacket-Pain, A. J., Friend, A. D., Laguard, J. G. A., & Thomas, P. A. (2015). The influence of masting phenomenon on growth-climate relationships in trees: Explaining the influence of previous summers climate on ring width. *Tree Physiology*, 35(3), 319-330.
- Huart, O., De Proft, M., Grégoire, J.-C., Piel, F., Gaubicher, B., Carlier, F.-X., Maraîte, H., Rondeux, J. (2003). Le point sur la maladie du hêtre en Wallonie. *Forêt Wallonne* (64), 19.
- Huart, O., & Rondeux, J. (2001). Genèse, évolution et multiples facettes d'une maladie inhabituelle affectant le hêtre en Région wallonne. *Forêt Wallonne*, n° 52.
- IPCC. (2014). Changements climatiques 2014 Rapport de synthèse. Climate Change 2014 : Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.11.012>

- IRM. (2014). Statistiques climatiques des communes belges : Remicourt (INS 64063), 1-6, *Institut Royal Météorologique de Belgique*. Consulté à l'adresse https://www.meteo.be/resources/climateCity/pdf/climate_INS64063_REMICOURT_fr.pdf
- IRSIA. (1997). Scénarios de dépérissement et du rétablissement chez le hêtre et l'épicéa. Risques nouveaux pour la sylviculture du douglas et des mélèzes. Rapport d'activité. *SPW, DGO3, DNF, Direction des Ressources forestières*.
- Latte, N., Debruxelles, J., Sohier, C., Degré, A., & Claessens, H. (2012). La dendroécologie : Un outil pour affiner nos connaissances sur l'autoécologie des essences forestières. *Forêt Wallonne, 116*, 3-17.
- Latte, N., & Claessens, H. (2014). Influence du changement climatique sur l'accroissement du hêtre en Wallonie Contexte. *Forêt Wallonne*, 46-47.
- Latte, N., Lebourgeois, F., Kint, V., Drouet, T., & Claessens, H. (2017). Le Hêtre face au changement climatique : le cas de la Belgique. *Rev. For. Fr. (3)*, 205-218.
- Latte, N., Perin, J., Kint, V., Lebourgeois, F., & Claessens, H. (2016). Major changes in growth rate and growth variability of beech (*Fagus sylvatica* L.) related to soil alteration and climate change in Belgium. *Forests, 7*(8). <https://doi.org/10.3390/f7080174>
- Lebourgeois, F. (2014). Les étapes pour mener à bien une étude dendroclimatologique. Consulté le 8 avril 2018 à l'adresse <https://www6.nancy.inra.fr/foret-bois-lerfob/Le-personnel/Fiches-profil/Scientifiques/LEBOURGEOIS-Francois/La-dendrochronologie/Etude-dendroclimatologique>
- Nageleisen, L.-M. (2013). *DEPEFEU* (Vol. 2), *Département de la santé des forêts*.
- Petit, S., Claessens, H., Vincke, C., Ponette, Q., & Marchal, D. (2017). Le Fichier écologique des essences, version 2.0. *Forêt-Nature, 143*, 12-19.
- Orfinger, C., Huart, O., Claessens, H., & Lejeune, P. (2005). Guide sylvicole pour la restauration des hêtraies perturbées par la maladie du hêtre. *Unité de gestion des ressources forestières et des milieux naturels, Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques*.
- Rondeux, J., Lecomte, H., Florquin, P., Thirion, M., & Hébert, J. (1997). Quelques données inédites sur l'accroissement des peuplements de hêtre en Région wallonne. *Les Cahiers Forestiers de Gembloux, 21*, 16.
- Rondeux, J. (2000). La maladie du hêtre : catastrophe écologique ou accident de la nature. *Parcs & Réserves, 55*(3-4), 49.
- Timal, G., Weissen, F., & Ponette, Q. (2012). Sols à argiles blanches, typologie et aptitudes stationnelles. *SPW-DGARNE-DNF, Namur, Belgique. 24p.*

Weissen, F., & Michaux, C. (1998). Complémentarité nutritionnelle des essences, un facteur de stabilisation d'écosystèmes forestiers ? *Pédologie forestière, Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques*, 20, 10.

Wilhelm, G. J., & Rieger, H. (2017). *Stratégie QD – Une gestion de la forêt basée sur la qualité et les cycles naturels*. Institut pour le développement forestier/Forêt Nature