

Analyse économique de stratégies de renouvellement des peuplements face au changement climatique

Etude du cas des Hêtraies pures dans la région Grand-Est



Mémoire de dominante d'approfondissement Ressources Forestières et Filière

Présenté par : Julie FUEYO

Stage effectué du 02/03/2020 au 07/08/2020, à :

Office National des Forêts – DT Grand-Est
Cité Administrative - 14 rue du Maréchal Juin
67084 Strasbourg CEDEX
Maître de stage : Régis BINDNER

AgroParisTech Nancy
14 rue Girardet
54000 Nancy
Maître de stage : Eric LACOMBE

Enseignant référent : Eric LACOMBE

Soutenu le : 17/09/2020

Année 2019/2020

Source illustration : Hubert Schmuck

Résumé

Le présent rapport détaille les conclusions d'un stage de six mois portant sur l'analyse économique de différentes stratégies de renouvellement des Hêtraies face au changement climatique en Grand-Est, avec la perspective de changer d'essence pour s'y adapter. Le projet comprenait la délimitation des peuplements forestiers et des essences étudiés, l'élaboration d'hypothèses sur l'évolution du climat et donc de différents états du monde possibles dans le futur ainsi que d'itinéraires sylvicoles réalistes permettant d'adapter les peuplements étudiés au changement climatique à venir selon son intensité, en futaie régulière et irrégulière. Le Bénéfice Actualisé Grande Durée de chaque stratégie pour chaque état du monde a été calculé afin de comparer ces itinéraires sur un plan strictement économique. Les résultats de l'étude montrent que le choix de l'itinéraire dépend vraisemblablement de l'avis du gestionnaire sur l'évolution du climat car celle-ci est difficile à modéliser et à anticiper, et qu'installer des essences très résistantes avec un taux plus faible de productivité est à envisager si l'on pressent l'arrivée d'un changement climatique catastrophique, mais que l'on peut à priori attendre la fin du cycle en cours. L'amélioration de la modélisation prédictive sur le climat permettrait également d'améliorer ces conseils aux gestionnaires sur les stratégies de renouvellement et de changement d'essences.

Summary

This report details the conclusions of a six-month internship on the economic analysis of different strategies for renewing beech forests in the face of climate change in the Grand-Est region, with the perspective of changing the species for adaptation. The project included the delimitation of forest stands and species studied, the development of hypotheses on the evolution of the climate and therefore of different possible states of world in the future as well as realistic silvicultural itineraries allowing the adaptation of the stands studied to future climate change according to its intensity, in regular and irregular high forest. The Long Term Discounted Benefit of each strategy for each state of world has been calculated in order to compare these itineraries on a strictly economic level. The results of the study show that the choice of the route probably depends on the opinion of the manager on the evolution of climate because this one is difficult to model and to anticipate, and that to install very resistant species with a lower productivity rate is to be considered if we foresee the arrival of catastrophic climate change, but we can wait for the end of the current cycle. Improved predictive climate modeling would also improve advice to managers on species renewal and change strategies.

FICHE SIGNALÉTIQUE D'UN TRAVAIL D'ÉLÈVE

| AgroParisTech | TRAVAIL D'ÉLÈVE |
|---|--|
| TITRE : Analyse économique de stratégies de renouvellement des peuplements face au changement climatique – Etude du cas des Hêtraies pures dans la région Grand-Est | Mots clés : renouvellement, changement climatique, économie, hêtre |
| AUTEUR ou AUTRICE : Julie FUEYO | Année : 2019/2020 |
| Caractéristiques : 1 volumes ; 64 pages ; 39 figures ; 6 annexes ; 0 cartes ; bibliographie | |

CADRE DU TRAVAIL

| | | |
|---|--|--------------------------------|
| ORGANISME DE STAGE : Direction Territoriale Grand Est de l'Office National des Forêts / AgroParisTech Nancy | | |
| Nom du responsable : Régis BINDNER / Eric LACOMBE | | |
| Fonction : Référent élaboration et suivi des aménagements forestiers / Enseignant chercheur | | |
| Nom du correspondant APT : Eric LACOMBE | | |
| <input type="checkbox"/> 1A <input type="checkbox"/> 2A <input checked="" type="checkbox"/> 3A | <input type="checkbox"/> Stage entreprise <input type="checkbox"/> Stage assistant ingénieur <input checked="" type="checkbox"/> Stage fin d'études Date de remise : 03/09/2020 | <input type="checkbox"/> Autre |

SUITE À DONNER (*à compléter par AgroParisTech*)

- Consultable et diffusable
- Confidentiel de façon permanente
- Confidentiel jusqu'au/...../..... , puis diffusable

Engagement de non plagiat

1 Principes

- Le plagiat se définit comme l'action d'un individu qui présente comme sien ce qu'il a pris à autrui.
- Le plagiat de tout ou parties de documents existants constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée
- Le plagiat concerne entre autres : des phrases, une partie d'un document, des données, des tableaux, des graphiques, des images et illustrations.
- Le plagiat se situe plus particulièrement à deux niveaux :
 - Ne pas citer la provenance du texte que l'on utilise, ce qui revient à le faire passer pour sien de manière passive.
 - Recopier quasi intégralement un texte ou une partie de texte, sans véritable contribution personnelle, même si la source est citée.

2 Consignes

- Il est rappelé que la rédaction fait partie du travail de création d'un rapport ou d'un mémoire, en conséquence lorsque l'auteur s'appuie sur un document existant, il ne doit pas recopier les parties intéressantes mais il doit les synthétiser, les rédiger à sa façon dans son propre texte.
- Vous devez systématiquement et correctement citer les sources des textes, parties de textes, images et autres informations reprises sur d'autres documents, trouvés sur quelque support que ce soit, papier ou numérique en particulier sur internet.
- Vous êtes autorisés à reprendre d'un autre document de très courts passages in extenso, mais à la stricte condition de les faire figurer entièrement entre guillemets et bien sûr d'en citer la source.

3 Sanction : En cas de manquement à ces consignes, la DEVE/le correcteur se réservent le droit d'exiger la réécriture du document sans préjuger d'éventuelles sanctions disciplinaires.

4 Engagement :

Je soussigné (e) FUEYO Julie

Reconnait avoir lu et m'engage à respecter les consignes de non plagiat

A Champagne le 03/08/2020

Signature :

Fueyo

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier Eric LACOMBE et Régis BINDNER, mes deux maîtres de stage, pour leur implication et leur contribution à la réalisation de cette étude et de ce mémoire ainsi que pour leur disponibilité, leur écoute et leur soutien malgré les conditions de travail peu favorables aux échanges. Merci également à Pablo ANDRES-DOMENECH pour son apport et son appui sur toute la partie économique de ce stage. Je remercie aussi Rodolphe PIERRAT pour ses remarques et appréciations sur le travail effectué.

Je tiens également à adresser mes remerciements à toutes les personnes contactées et qui ont répondu présentes pour partager leurs travaux sur le changement climatique en forêt d'avoir pris le temps de me fournir les ressources nécessaires à la conduite de cette étude.

Merci enfin à l'UMR Silva d'AgroParisTech Nancy et à l'équipe du Pôle système d'information Est de la Direction Territoriale de l'Office Nationale des Forêts dont l'accueil fut bref mais chaleureux.

Table des matières

| | |
|---|----|
| Table des figures..... | 5 |
| Table des tableaux | 5 |
| Liste des abréviations | 6 |
| Introduction | 7 |
| 1. Présentation de la démarche, méthodologie..... | 10 |
| 1.1. Questions de recherche | 10 |
| 1.2. Scénarios de changement climatique | 10 |
| 1.3. Conséquences générales du changement climatique en forêt | 12 |
| 1.4. Conséquences du changement climatique sur le hêtre | 13 |
| 1.5. Choix des essences de remplacement..... | 15 |
| 1.6. Etats du monde retenus | 16 |
| 1.7. Peuplements de départ, types et localisation..... | 20 |
| 1.8. Choix des itinéraires sylvicoles..... | 20 |
| 1.8.1. Recommandations générales | 20 |
| 1.8.2. Scénarios retenus | 21 |
| 1.9. Arbres de décisions | 24 |
| 1.10. Modélisation des peuplements | 28 |
| 1.10.1. Choix de l’outil de modélisation..... | 28 |
| 1.10.2. Traitement pour les peuplements réguliers..... | 29 |
| 1.10.2.1. Croissance des essences..... | 29 |
| 1.10.2.1.1. Hêtre et profil P1 | 29 |
| 1.10.2.1.2. Profil P2 | 29 |
| 1.10.2.2. Modélisation du peuplement et application des itinéraires sylvicoles..... | 30 |
| 1.10.2.3. Intégration du changement climatique..... | 30 |
| 1.10.2.4. Grille de prix des essences..... | 31 |
| 1.10.2.5. Calcul et application de l’âge d’exploitabilité..... | 31 |
| 1.10.2.6. Renouvellement des peuplements et travaux sylvicoles..... | 32 |
| 1.10.3. Traitement pour les peuplements irréguliers | 33 |
| 1.10.3.1. Taux de fonctionnement | 33 |
| 1.10.3.2. Croissance des essences..... | 34 |
| 1.10.3.3. Modélisation du peuplement et application des itinéraires sylvicoles..... | 34 |
| 1.11. Méthode d’évaluation économique | 35 |
| 1.11.1. Bénéfice Actualisé Grande Durée | 35 |
| 1.11.2. Méthode d’analyse..... | 35 |
| 2. Résultats..... | 36 |
| 2.1. Peuplements réguliers de type 21 et 23 | 36 |
| 2.2. Peuplement irrégulier de type 53 | 41 |
| 2.3. Conclusions générales..... | 41 |
| 3. Discussion..... | 43 |
| 3.1. Limites | 43 |

| | | |
|--------|--|----|
| 3.1.1. | Evolution du climat et effet sur les peuplements forestiers | 43 |
| 3.1.2. | Réalisme, pertinence et cohérence de la modélisation | 43 |
| 3.1.3. | Aspects économiques | 43 |
| 3.2. | Perspectives..... | 44 |
| 3.2.1. | Perspectives opérationnelles | 44 |
| 3.2.2. | Perspectives de développement de l'étude | 44 |
| | Conclusion..... | 46 |
| | Références bibliographiques..... | 47 |
| | Liste des contacts..... | 49 |
| | ANNEXES | 50 |
| | Annexe 1 : Table des caractéristiques dendrométriques du hêtre (d'après Travaux d'élèves utilisant le modèle Fagacées sur Capsis, 2012-2018) | 51 |
| | Annexe 2 : Table des caractéristiques dendrométriques de P1 (d'après Travaux d'élèves utilisant le modèle Fagacées sur Capsis, 2012-2018) | 52 |
| | Annexe 3 : Table des caractéristiques dendrométriques de P2 | 54 |
| | Annexe 4 : Exemple du traitement élaboré pour les peuplements réguliers | 56 |
| | Annexe 5 : Grille de prix des essences selon le diamètre élaborée pour les états du monde E1, E2 et E3 | 57 |
| | Annexe 6 : Grille de prix des essences selon le diamètre élaborée pour l'état du monde E6 | 57 |

Table des figures

| | |
|---|----|
| FIGURE 1: EVOLUTION DU BILAN RADIATIF DE LA TERRE OU "FORÇAGE RADIATIF" EN W/M ² SUR LA PERIODE 1850-2250 SELON LES DIFFERENTS SCENARIOS (METEOFRANCE, 2020) | 10 |
| FIGURE 2: SIMULATION DE LA TEMPERATURE MOYENNE ANNUELLE EN CHAMPAGNE-ARDENNE PAR RAPPORT AUX SCENARIOS D'EVOLUTION DU GIEC (METEOFRANCE, 2020)..... | 11 |
| FIGURE 3: SIMULATION DE LA TEMPERATURE MOYENNE ANNUELLE EN LORRAINE PAR RAPPORT AUX SCENARIOS D'EVOLUTION DU GIEC (METEOFRANCE, 2020) | 12 |
| FIGURE 4: SIMULATION DE LA TEMPERATURE MOYENNE ANNUELLE EN ALSACE PAR RAPPORT AUX SCENARIOS D'EVOLUTION DU GIEC (METEOFRANCE, 2020) | 12 |
| FIGURE 5: CARTOGRAPHIE PREDICTIVE DE LA DISTRIBUTION FUTURE DU HETRE A PARTIR DE PLUSIEURS MODELES DIFFERENTS (CHEAIB ET AL., 2012) | 15 |
| FIGURE 6: DEFINITION DE RESISTANCE ET RESILIENCE DES PEUPELEMENTS (LEFEVRE ET AL., 2011) | 16 |
| FIGURE 7: POURCENTAGE DE PERTE D'ACCROISSEMENT EN SURFACE TERRIERE POUR LE HETRE ET P1 DANS L'ETAT DU MONDE E2 EN FONCTION DU TEMPS | 17 |
| FIGURE 8: POURCENTAGE DE PERTE D'ACCROISSEMENT EN SURFACE TERRIERE POUR LE HETRE ET P1 DANS L'ETAT DU MONDE E3 EN FONCTION DU TEMPS | 17 |
| FIGURE 9: POURCENTAGE DE MORTALITE ANNUELLE POUR LE HETRE ET P1 DANS L'ETAT DU MONDE E4 EN FONCTION DU TEMPS | 18 |
| FIGURE 10 : POURCENTAGE DE MORTALITE ANNUELLE POUR LE HETRE ET P1 DANS L'ETAT DU MONDE E6 EN FONCTION DU TEMPS | 19 |
| FIGURE 11: POURCENTAGE DE PERTE D'ACCROISSEMENT EN SURFACE TERRIERE POUR LE HETRE, P1 ET P2 DANS L'ETAT DU MONDE E4 EN FONCTION DU TEMPS | 19 |
| FIGURE 12: POURCENTAGE DE PERTE D'ACCROISSEMENT EN SURFACE TERRIERE POUR LE HETRE, P1 ET P2 DANS L'ETAT DU MONDE E6 EN FONCTION DU TEMPS | 19 |
| FIGURE 13: LEGENDE DES ARBRES DE DECISION POUR LES PEUPELEMENTS REGULIERS | 24 |
| FIGURE 14: ARBRE DE DECISION POUR LES PEUPELEMENTS DE TYPE 21 ET 23 ET LES ETATS DU MONDE E1, E2 ET E3 | 24 |
| FIGURE 15: ARBRE DE DECISION POUR LES PEUPELEMENTS DE TYPE 21 ET 23 ET L'ETAT DU MONDE E4 | 25 |
| FIGURE 16: ARBRE DE DECISION POUR LES PEUPELEMENTS DE TYPE 21 ET 23 ET L'ETAT DU MONDE E6 | 26 |
| FIGURE 17 : LEGENDE POUR LES ARBRES DE DECISION POUR LE PEUPELEMENT DE TYPE 53 | 26 |
| FIGURE 18: ARBRE DE DECISION POUR LE PEUPELEMENT DE TYPE 53 DANS LES ETATS DU MONDE E1, E2 ET E3 | 27 |
| FIGURE 19 : ARBRE DE DECISION POUR LE PEUPELEMENT DE TYPE 53 DANS L'ETAT DU MONDE E6 | 27 |

Table des tableaux

| | |
|---|----|
| TABLEAU 1: ITINERAIRES POUR LES PEUPELEMENTS REGULIERS (21 ET 23) | 23 |
| TABLEAU 2: ITINERAIRES POUR LE PEUPELEMENT IRREGULIER (53)..... | 23 |
| TABLEAU 3: CALCULS UTILISES POUR LA CONSTRUCTION DE LA TABLE DENDROLOGIQUE DE P2..... | 30 |
| TABLEAU 4: COUTS DES TRAVAUX SYLVICOLES | 33 |
| TABLEAU 5: ACCROISSEMENT EN DIAMETRE DES ESSENCES | 34 |
| TABLEAU 6: SCENARIO DE PROBABILITES DES ETATS DU MONDE | 35 |
| TABLEAU 7: TABLEAU DE RESULTATS BRUTS POUR UN PEUPELEMENT DE TYPE 21 ET AVEC OBLIGATION D'ENGRILLAGEMENT | 36 |
| TABLEAU 8: TABLEAU DE RESULTATS BRUTS POUR UN PEUPELEMENT DE TYPE 21 ET SANS OBLIGATION D'ENGRILLAGEMENT..... | 36 |
| TABLEAU 9: TABLEAU DE RESULTATS BRUTS POUR UN PEUPELEMENT DE TYPE 23 ET AVEC OBLIGATION D'ENGRILLAGEMENT | 37 |
| TABLEAU 10: TABLEAU DE RESULTATS BRUTS POUR UN PEUPELEMENT DE TYPE 21 ET SANS OBLIGATION D'ENGRILLAGEMENT | 37 |
| TABLEAU 11: SCENARIOS MAXIMISANT LE BAGD ; POINT DE DEPART DE TYPE 21 ; AVEC ENGRILLAGEMENT | 38 |
| TABLEAU 12: SCENARIOS MAXIMISANT LE BAGD ; POINT DE DEPART DE TYPE 21 ; SANS ENGRILLAGEMENT..... | 39 |
| TABLEAU 13: SCENARIOS MAXIMISANT LE BAGD ; POINT DE DEPART DE TYPE 23 ; AVEC ENGRILLAGEMENT | 39 |
| TABLEAU 14: SCENARIO MAXIMISANT LE BAGD ; POINT DE DEPART DE TYPE 23 ; SANS ENGRILLAGEMENT | 39 |
| TABLEAU 15: ITINERAIRE RETENU SELON LES SCENARIOS DE PROBABILISATION DES ETATS DU MONDE POUR UN POINT DE DEPART DE TYPE 21 AVEC ENGRILLAGEMENT | 40 |
| TABLEAU 16:ITINERAIRE RETENU SELON LES SCENARIOS DE PROBABILISATION DES ETATS DU MONDE POUR UN POINT DE DEPART DE TYPE 21 SANS ENGRILLAGEMENT | 40 |
| TABLEAU 17: ITINERAIRE RETENU SELON LES SCENARIOS DE PROBABILISATION DES ETATS DU MONDE POUR UN POINT DE DEPART DE TYPE 23 AVEC ENGRILLAGEMENT | 40 |
| TABLEAU 18 : ITINERAIRE RETENU SELON LES SCENARIOS DE PROBABILISATION DES ETATS DU MONDE POUR UN POINT DE DEPART DE TYPE 23 SANS ENGRILLAGEMENT | 40 |
| TABLEAU 19: TABLEAU DE RESULTATS BRUTS POUR UN PEUPELEMENT DE TYPE 53..... | 41 |
| TABLEAU 20: SCENARIO MAXIMISANT LE BAGD ; POINT DE DEPART DE TYPE 53 | 41 |

Liste des abréviations

BA : Bénéfice Actualisé

BAGD : Bénéfice Actualisé Grande Durée

BASI : Bénéfice Actualisé en Séquence Infinie

BETA : Bureau d'Economie Théorique et Appliquée

DT : Direction Territoriale

ONF : Office National des Forêts

UMR : Unité Mixte de Recherche

Introduction

Le changement climatique a des effets à moyen et long termes sur les activités humaines et notamment celles qui sont étroitement liées au climat et à ses modifications, comme les productions agricoles ou la gestion des forêts.

Les conséquences en forêt française sont déjà observables : la crise des scolytes des années 2018 et 2019, largement favorisée par les sécheresses printanières et estivales, ainsi que les dépérissements de plus en plus fréquents et marqués observés sur de nombreuses essences comme le sapin ou le hêtre, sont des marqueurs importants de ce réchauffement des températures et des modifications des régimes climatiques.

Les gestionnaires forestiers envisagent plusieurs modalités de manifestation de l'évolution du changement climatique afin de s'y préparer. Le premier cas de figure concerne des événements ponctuels, majeurs et brutaux entraînant la destruction des peuplements sur de grandes surfaces : sécheresses estivales entraînant des mortalités massives l'année concernée, incendies, tempêtes, etc. Malgré leur ampleur localisée et le fait qu'ils soient à l'origine de nombreuses dynamiques naturelles des forêts, ces événements peuvent conduire à la modification de la succession des cortèges d'espèces actuels, en augmentant la fréquence d'apparition des espèces pionnières par exemple, et donc de la succession des écosystèmes (Lefèvre et al., 2011).

La deuxième éventualité est que les variations à long terme des paramètres climatiques, suivant plutôt une tendance d'augmentation pour les températures et de diminution pour les précipitations, vont exercer une pression continue sur la globalité des essences forestières (Lefèvre et al., 2011). Cela pourra avoir des conséquences positives, comme l'allongement des périodes de végétation et donc une potentielle augmentation de la productivité (Bastien et al., 2000), mais ces mêmes phénomènes pourront engendrer des conséquences négatives : la germination précoce entraînera une destruction plus importante des pousses lors de gelées tardives ; la diminution des précipitations aura pour conséquence la diminution de l'accroissement des peuplements ; il est également envisageable que certains paramètres modifient les interactions entre espèces, favorisant par exemple les cycles biologiques des ravageurs (comme on l'a vu avec les crises des scolytes en 2018 et 2019) ou en fragilisant les populations de pollinisateurs (Lefèvre et al., 2011)

La composition en essence des peuplements est donc remise en question car les espèces vont certainement migrer vers des espaces restés ou devenus favorables selon leurs besoins physiologiques et cela va avoir un fort effet sur les communautés végétales et les écosystèmes. Ces modifications seront à la fois quantitatives (abondance des espèces) et qualitatives (cortège d'espèces) (Lefèvre et al., 2011). Les observations et modélisations actuelles vont dans ce sens : est entre autres envisagée le déplacement des aires de présence du sapin pectiné, du hêtre et de l'épicéa vers des altitudes plus hautes (montagnardes), en principe plus fraîches et plus arrosées donc moins sujettes à la sécheresse. Cependant, la rapidité et l'intensité du phénomène restent incertaines (Persuy, 2005).

Une des perspectives d'action de la gestion forestière pour anticiper les effets du changement climatique est ainsi d'assister cette migration pour certaines essences dont la niche écologique se situe actuellement dans le Sud de la France voire encore plus au sud ou pour les mêmes essences présente actuellement mais avec des provenances de milieux plus soumis à la sécheresse, a priori plus adaptées. Cette migration assistée s'effectue par plantation, et de nombreux essais se développent en France pour tester les nouvelles essences qui pourraient prendre le relai en cas de coups durs climatiques, comme le projet « îlots d'avenir », initié par l'Office National des Forêts. On recherche la résistance au changement climatique, et la résilience, c'est-à-dire la capacité de retour à l'état initial (de productivité, etc.) de l'essence. Les fortes incertitudes sur les évolutions du climat ainsi que sur

la vitesse du phénomène amènent à s'intéresser à une notion d'assurance, et à l'idée qu'il ne faut pas tout changer d'un coup mais peut-être miser sur des mélanges ou des modes renouvellement différents (Lefèvre et al., 2011).

D'après Lefèvre et al. (2011) le mélange serait plus résistant au changement climatique car la diversité des caractéristiques des espèces rend leur disparition simultanée improbable, notamment pour les accidents sanitaires. Concernant la sécheresse, la densité du peuplement est cependant plus importante que la composition du peuplement. Il est recommandé par cette source de s'appuyer sur la connaissance des stations pour choisir : soit le maintien à long terme de l'essence et sa régénération naturelle ; soit de compléter cette régénération par des plants d'une autre provenance ; soit de régénérer tout le peuplement par plantation de plants d'une autre provenance ; soit de remplacer l'essence par une autre, à l'âge de maturité ou à un âge plus précoce. Il faut cependant être attentif à bien cadrer l'introduction de nouvelles essences car les risques d'importation d'essences envahissantes notamment sont importants.

Une autre source (Jactel et al., 2008) montre ainsi que dans 80% des cas, les peuplements purs sont significativement plus attaqués par les ravageurs qu'un peuplement mélangé, néanmoins cette proportion varie selon la spécificité des insectes ravageurs.

L'étude de Bréda N. et Brunette M. (2019) s'intéressant au risque lié à la sécheresse a montré que d'un point de vue économique, l'adaptation de la gestion des peuplements à la fréquence accrue d'aléas par diminution des rotations par exemple, qu'elle soit immédiate ou retardée est toujours meilleure que l'absence d'adaptation. Les résultats montrent notamment qu'une réduction immédiate de la durée entre deux coupes amène de meilleurs résultats économiques, puis la réduction retardée de la durée entre deux coupes amène de moins bons résultats économiques et ils sont encore moins bons pour l'absence d'adaptation.

Une étude de 2019 comparant le douglas et le hêtre montre qu'il est toujours plus intéressant de substituer le douglas au hêtre, quel que soit le niveau de sécheresse et de changement climatique, on s'interroge donc sur la pertinence de continuer à gérer du Hêtre dans ce contexte (Brèteau-Amorès et al., 2019).

Les laboratoires de recherche tiennent une place essentielle dans l'étude du changement climatique et de la réponse des peuplements forestiers à ces variations. L'Unité Mixte de Recherche Silva, installée sur trois sites différents, AgroParisTech Nancy, l'INRAE Champenoux et l'Université de Lorraine à Vandoeuvre-lès-Nancy, développe un projet de recherche pluridisciplinaire autour de l'écologie des forêts en prenant en compte les évolutions globales du secteur forestier, que ce soit au niveau environnemental, technologique, économique, social, etc. Les objectifs de l'Unité sont d'étudier les processus de réponses des arbres à leur environnement ainsi que ceux qui composent les services écosystémiques de la forêt, dans le but de favoriser l'adaptation et la restauration des écosystèmes et d'optimiser ainsi la production durable de bois issu des systèmes forestiers. Ces travaux de recherche s'intègrent à l'échelle de la région Grand-Est par un centre d'intérêt commun pour les forêts feuillues semi-naturelles, tout en gardant une échelle géographique plus large sur les systèmes forestiers et agroforestiers tempérés en France et en Europe, ainsi que des études sur les peuplements forestiers tropicaux.

Le Bureau d'Economie Théorique et Appliquée (BETA) s'intéresse lui à de nombreux aspects de l'économie et la branche présente sur le site d'AgroParisTech Nancy travaille ainsi sur l'économie forestière, c'est-à-dire les aspects économiques des fonctionnalités de la forêt, que ce soit en termes de productions que d'aménités.

Le sujet de ce stage accueilli en partie au sein de l'UMR Silva et en collaboration avec le laboratoire BETA s'intègre donc dans cet objectif d'étudier à l'échelle régionale les réponses, ici économiques, des peuplements forestiers au changement climatique.

L'Office National des Forêts (ONF) est le gestionnaire des forêts publiques françaises, domaniales et communales. Cet organisme assure la gestion durable et multifonctionnelle des systèmes forestiers à toutes les échelles géographiques et est un acteur majeur de la filière forêt-bois française. Face aux dépérissements marqués dus aux sécheresses de ces dernières années, l'Office s'interroge sur l'avenir des peuplements et entreprend des projets de recherche afin de mettre à jour ses directives de gestion en fonction de l'évolution du climat.

La Direction Territoriale (DT) Grand-Est, représente un quart des effectifs de l'Office à elle-seule et coordonne les actions de l'organisme à l'échelle de la région, dont les forêts représentent 33% des forêts françaises et dont 60% sont des forêts publiques. Ainsi, la surface totale de forêt gérée par cette DT est de 1,114 millions d'hectares, avec une production biologique annuelle de 13,7 millions de m³ de bois, ce qui fait de l'ONF un acteur majeur de la filière bois locale. Afin de remplir sa mission de gestion durable et multifonctionnelle, l'organisme met en place des études et des programmes de recherche avec AgroParisTech Nancy notamment, afin entre autres de trouver de nouvelles essences d'arbres plus adaptées aux conditions climatiques futures, avec l'installation par exemple d'îlots d'avenir dans les peuplements publics afin d'observer l'adaptation de nouvelles essences.

Un des objectifs de la DT est également de créer des documents de référence, des guides, afin d'aider les gestionnaires des échelles plus locales à orienter leurs stratégies de manière raisonnée et fondée face aux changements à venir. Ce stage accueilli en partie par l'ONF s'inscrit donc dans une perspective théorique mais visant à élaborer des documents de conseil concrets permettant d'adapter les peuplements aux évolutions du climat.

Ainsi, les recommandations sylvicoles faites à propos du changement climatique ne permettent pas vraiment d'engager des stratégies d'adaptation aux conditions climatiques modélisées actuellement (Landmann et al., 2007), le fondement de cette étude est donc d'essayer de rationaliser économiquement les choix effectués sur ces stratégies. La problématique de ce sujet serait donc d'analyser économiquement différentes méthodes de renouvellement des peuplements dans le cadre d'une adaptation au changement climatique par un changement d'essence, en fonction des évolutions potentielles du climat dans le Grand-Est.

1. Présentation de la démarche, méthodologie

1.1. Questions de recherche

Les questions de recherche de cette étude sont donc : quand doit-on remplacer une essence qui paraît inadaptée au changement climatique par une essence plus adaptée ? Quelles techniques sylvicoles doit-employer et à quelle vitesse ce remplacement doit-il s'opérer ? Quels types d'essences doit-on choisir pour effectuer ce remplacement ? Le mélange est-il plus adapté pour anticiper les conséquences d'un changement climatique progressif ?

1.2. Scénarios de changement climatique

Le changement climatique est un phénomène aux conséquences incertaines et difficiles à anticiper du fait de son ampleur inédite liée aux émissions anthropiques, limitant l'utilisation de références passées. Il est donc nécessaire d'étudier non seulement les évolutions passées des variables climatiques mais également de théoriser leurs évolutions futures sous forme de scénarios.

Le rôle du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) est ainsi de regrouper les résultats des différentes études menées à ce sujet afin d'aboutir à des scénarios globaux d'évolution du climat permettant de se projeter dans l'avenir. Cette synthèse a proposé notamment quatre niveaux théoriques d'émissions et de concentrations de gaz à effet de serre, d'ozone et d'aérosols, ainsi que d'occupation des sols, que l'on appelle RCP pour Representative Concentration Pathways. Ces trajectoires potentielles présentées en Figure 1 sont associées à une modification du bilan entre le rayonnement solaire reçu et réémis, exprimé en W/m^2 , et donc à une évolution des conditions climatiques, et vont du plus optimiste (RCP 2.6) au plus pessimiste (RCP 8.5) (MétéoFrance, 2020). Le scénario RCP2.6 reste cependant le moins plausible des scénarios proposés car supposant la diminution rapide et efficace des émissions anthropiques de gaz à effet de serre (Lefèvre et al., 2011).

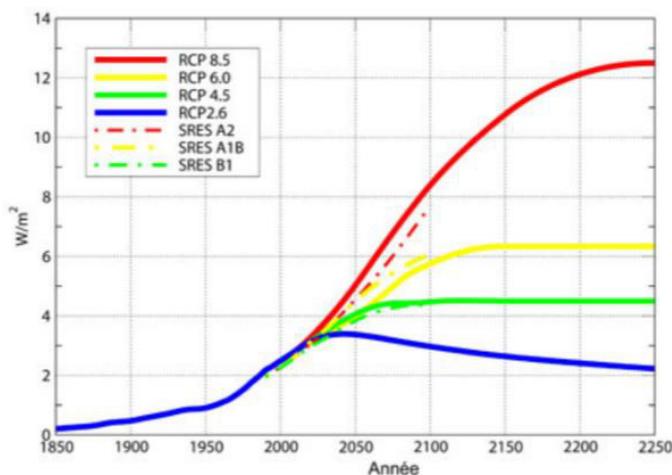


Figure 1: Evolution du bilan radiatif de la terre ou "forçage radiatif" en W/m^2 sur la période 1850-2250 selon les différents scénarios (MétéoFrance, 2020)

Le constat principal de ces rapports au niveau des paramètres passés est que le climat mondial varie naturellement mais que la tendance observée depuis 1850 tend vers une accélération du réchauffement, confirmé par les valeurs de température de la décennie 2002-2011 qui est la période de dix années consécutives la plus

chaude depuis le commencement des mesures en 1850. La valeur de ce réchauffement est de 0,17°C par décennie en moyenne depuis 1970 (MétéoFrance, 2020).

A l'échelle française, depuis 1950, le nombre de jours de gel en hiver a diminué ; à l'inverse, le nombre de jours où la température dépasse 25°C en été a augmenté. L'écart de précipitations entre hiver et été augmenté avec une baisse des précipitations estivales entraînant des sécheresses plus longues (MétéoFrance, 2020).

Du côté des projections, les rapports prévoient que pour les scénarios les plus pessimistes (RCP6.0 et RCP8.5), l'augmentation de la température terrestre dépassera probablement 2°C. Le contraste de précipitations entre les régions humides et les régions sèches, ainsi qu'entre les saisons, sera probablement intensifié de manière globale. La fréquence des extrêmes chauds dans les températures augmentera tandis que celle des extrêmes froids diminuera, avec l'apparition de vagues de chaleur longues plus nombreuses. Les constats effectués précédemment pour l'avenir du climat mondial sont tous considérés comme probables par les rapports du GIEC, malgré les incertitudes dans l'évolution des scénarios (MétéoFrance, 2020).

En France, pour un horizon proche c'est-à-dire avant 2050, les scénarios annoncent une hausse des températures moyennes située entre 0,6 et 1,3°C, accentuée en période estivale dans le Sud-Est, ainsi qu'une augmentation du nombre de jours de chaleur en été et une diminution de jours anormalement froids en hiver, notamment dans le Nord-Est du pays. Pour la période 2071-2100, les projections vont vers une forte hausse des températures moyennes, allant de 0,9°C à 1,3°C pour RCP2.6 (scénario le plus optimiste) et de 2,6 à 5,3°C pour RCP8.5 (scénario le plus pessimiste). Les tendances prévues pour la première moitié du siècle sur les extrêmes chauds et froids se poursuivront (MétéoFrance, 2020).

Pour la région Grand-Est étudiée ici, les évolutions des températures sont présentées dans les Figures 2, 3 et 4. On observe pour les prévisions futures dans le scénario RCP8.5 une augmentation des températures dans les trois régions concernées avec une inflexion généralement en 2050, alors que celles pour le scénario RCP5.5, plus optimiste, restent proches de la référence. Pour les précipitations, aucune évolution notable de leur quantité moyenne annuelle n'est prévue mais les projections vont dans le sens d'une intensification du contraste entre les précipitations estivales qui vont diminuer et les précipitations hivernales qui vont augmenter (MétéoFrance, 2020), ce qui va dans le sens de l'augmentation de la fréquence des sécheresses estivales annoncée à l'échelle nationale.

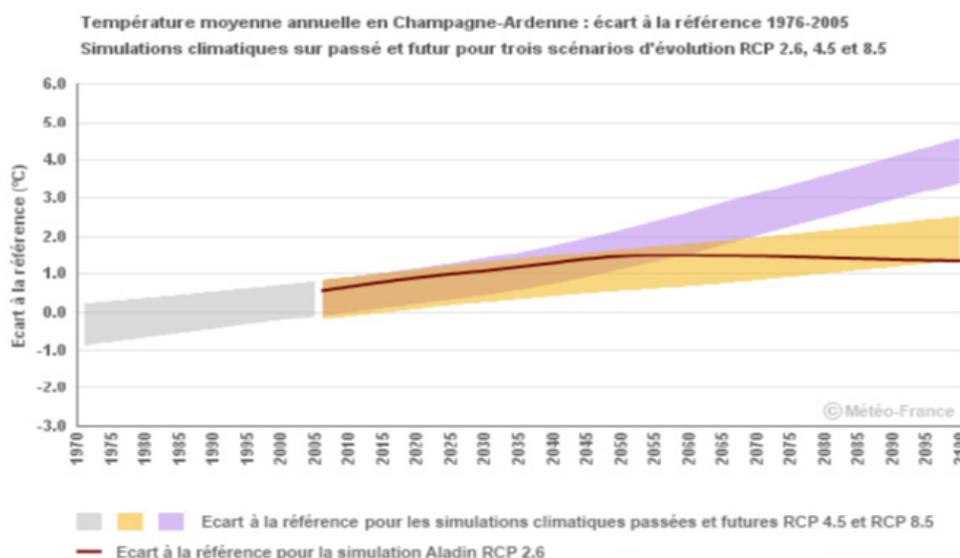


Figure 2: Simulation de la température moyenne annuelle en Champagne-Ardenne par rapport aux scénarios d'évolution du GIEC (MétéoFrance, 2020)

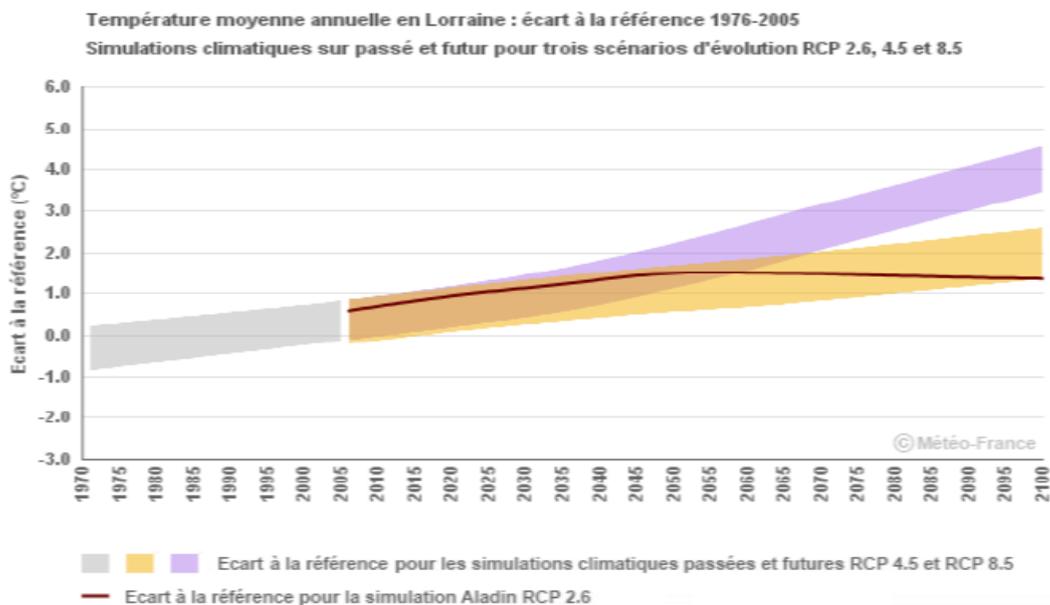


Figure 3: Simulation de la température moyenne annuelle en Lorraine par rapport aux scénarios d'évolution du GIEC (MétéoFrance, 2020)

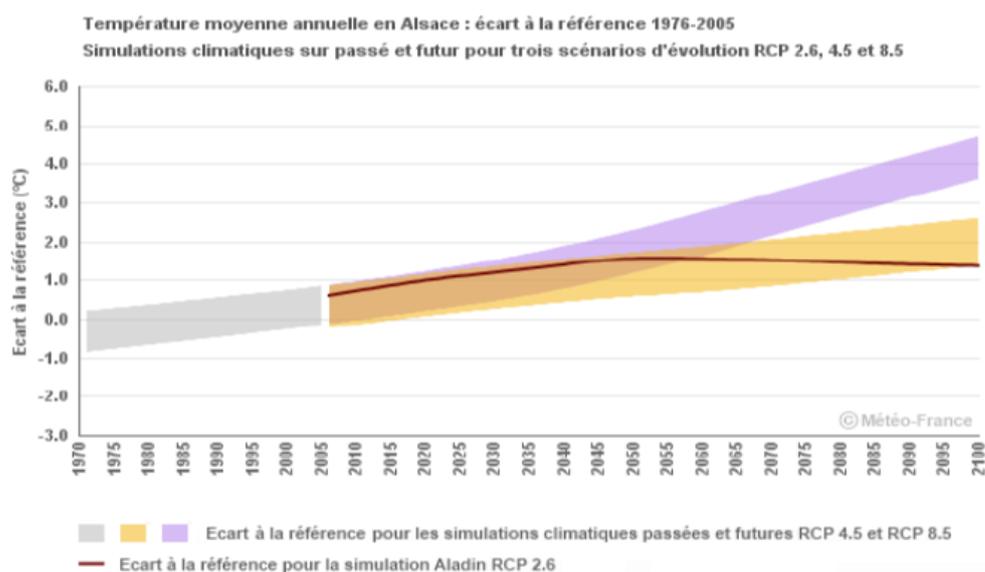


Figure 4: Simulation de la température moyenne annuelle en Alsace par rapport aux scénarios d'évolution du GIEC (MétéoFrance, 2020)

1.3. Conséquences générales du changement climatique en forêt

Les tendances prévues des variables climatiques au niveau français vont avoir des conséquences sur les peuplements forestiers car elles modifient les écosystèmes qui y sont liés. Sont prévues avec l'augmentation de la fréquence des sécheresses estivales une augmentation des risques d'incendie (Lefèvre et al., 2011) pouvant augmenter l'érosion des sols, réduire la régénération des plantes et accélérer la désertification des zones sèches (Kolström, 2011) ; mais aussi une réduction de la croissance et de la productivité primaire des arbres ainsi que de leur recrutement du fait du manque d'eau et du stress hydrique (Legay et Mortier, 2006 et Kolström, 2011) même si un allongement de la saison de végétation des arbres en montagnes et dans le Nord-Est est envisagé avec l'augmentation des précipitations printanières dans ces zones (Lefèvre et al., 2011 et Badeau, 2012). L'augmentation de la fréquence des tempêtes est controversée (Lefèvre et al., 2011) bien que souvent envisagée

(Kolström, 2011). Les extrêmes climatiques comme les canicules, les sécheresses et les grands froids vont certainement entraîner des dépérissements plus nombreux et plus intenses, dus par exemple à de fortes températures (coup de chaud) ou des insolation, ou à un déséquilibre entre ressource disponible en eau et consommation (Corvol, 2012).

Afin d'anticiper la distribution future des essences forestières, des outils de modélisation ont été élaborés en identifiant les facteurs écologiques explicatifs les plus pertinents. Ainsi, la gamme de valeurs favorables pour chaque essence a été déterminée afin d'évaluer la probabilité de présence de l'essence en fonction des conditions futures du milieu. Des cartes de distribution potentielle des essences ont ainsi été créées. Tous ces modèles vont dans le sens d'une régression de l'aire des espèces avec une migration globale vers les hautes latitudes et les altitudes élevés (Piedallu et al., 2009 et Badeau, 2012), les groupes méditerranéens et atlantiques progressant vers le Nord (Legay et Mortier, 2006).

Les conditions climatiques vont probablement modifier également les aires de répartition des agents pathogènes des arbres. Pour certains, comme celui de l'encre du chêne et du châtaignier, cette aire est très dépendante de la température et l'augmentation moyenne de celle-ci les favorisera. Pour d'autres, les modifications potentielles du climat peuvent favoriser leur cycle biologique (Legay et Mortier, 2006) et donc multiplier les attaques, comme cela a été observé pour le scolyte ou la maladie des bandes rouges sur le pin Laricio (Marçais, 2018). Certains pathogènes seront au contraire défavorisés par l'évolution des conditions climatiques car dépendants de températures plus fraîches (Marçais, 2018). La sensibilité des arbres sera en outre plus importante du fait des sécheresses prévues pouvant les affaiblir, c'est ce qui a été observé avec la crise scolyte sur l'épicéa notamment (Kolström, 2011 et Badeau, 2012).

L'augmentation de la fréquence des tempêtes étant remise en question et les événements comme les incendies et les ravageurs étant difficiles à modéliser en plus des autres paramètres du fait du nombre de situations à envisager, cette étude portera sur un facteur global de perte de croissance et de mortalité pouvant s'apparenter à l'effet de la sécheresse sur les essences.

1.4. Conséquences du changement climatique sur le hêtre

Le hêtre est une essence avec une grande amplitude écologique (montagnes, plaines, sol acide ou calcaire, etc.) mais avec de fortes exigences sur l'humidité atmosphérique, donc a priori particulièrement sensible à la modification des bilans hydriques dues au changement climatique. C'est également une essence très présente dans le Grand-Est (351 milliers d'hectares de surface occupée, en forêt publique et privée, dont 268 milliers d'hectares en forêt publique, pour une surface terrière moyenne de 21,6 m²/ha ; données IGN 2014-2018), composant une grande partie des peuplements, avec une dynamique de croissance et de renouvellement efficace, aussi bien adapté en gestion régulière qu'irrégulière, mais demandant un effort important pour le changement d'essence du fait de sa dynamique de régénération importante qui lui donne l'avantage en compétitivité par rapport aux autres essences. En outre sa présence actuelle est massivement issue de régénération naturelle, contrairement à certaines essences plus majoritairement introduites comme l'épicéa. Cette situation évite ainsi des questions périphériques en lien avec l'inadéquation d'une essence à son milieu qui serait à l'origine des pertes de production et de mortalité, questions qui se posent pour l'Épicéa.

Il a donc été choisi d'étudier ici le renouvellement dans la hêtraie pure, régulière ou irrégulière, de nombreux enjeux étant concentrés sur cette essence. La synthèse suivante permet de faire le point sur la sensibilité du Hêtre au changement climatique.

Les principales faiblesses de l'essence sont donc sa forte sensibilité au manque d'eau (sécheresse), malgré sa récupération rapide et très importante, c'est-à-dire le retour à un état de vitalité généralement identique à l'état avant la sécheresse l'année suivante, et les anomalies thermiques comme les canicules (« coup de chaud ») qu'il est difficile de mettre de côté dans l'étude de l'effet du changement climatique sur le hêtre (Landmann et al., 2007). Il est d'autant plus sensible à la sécheresse que la xéricité locale augmente et que le sol est superficiel (réserve utile maximale inférieure à 100 mm) ou que le régime pluviométrique est faible (précipitations annuelles inférieures à 700 mm) (Lebourgeois et Mérian, 2011). Une autre interrogation sur l'avenir de l'essence porte sur la possibilité d'émergence de pathogènes ou d'insectes ravageurs encore inconnus ou absents en France suite à l'évolution vers un climat plus chaud et plus sec ((Landmann et al., 2007).

La période clé pour le hêtre est le printemps : en effet, la vitalité de l'essence est sensible à ce qui affecte le démarrage de la croissance. Le bilan hydrique du début d'été (juin essentiellement) joue également un rôle central dans les variations interannuelles de croissance (Lebourgeois et Mérian, 2011). Le niveau de stress hydrique détermine le potentiel de croissance radiale (Landmann et al., 2007) et celle-ci est corrélée négativement au déficit hydrique (Lebourgeois, 2005). Le changement climatique va donc certainement induire une diminution de l'accroissement au long terme tout en occasionnant une augmentation de sa variabilité, ce qui va plutôt à l'inverse de ce qui a été observé dans le passé récent, avec l'augmentation (Lebourgeois et al., 2020). Ces effets sont plus marqués à basse altitude. On observe également l'augmentation de la fréquence des années caractéristiques négatives (où la croissance est très faible pour la majorité des arbres), surtout à partir de la fin des années 80. Cela pourrait s'expliquer par deux variables corrélées avec l'accroissement qui sont l'accumulation des températures élevées en été de l'année précédente en augmentation et la somme des précipitations au printemps de l'année en cours en diminution. (Latte et al., 2017).

L'hypothèse que l'on peut conserver pour faire évoluer la croissance du hêtre avec le changement climatique est que les variables de températures et de précipitation vont subir des modifications, mais que les autres variables vont être considérées comme constantes par simplification. La productivité serait donc composée d'un terme constant, tiré de références argumentés, multiplié par un terme de variation, par exemple une perte de production en pourcentage. Or, les différentes études au sujet de l'évolution de la productivité de l'essence ont du mal à converger vers une méthode commune d'estimation de cette perte, car elles étudient des accroissements dans des unités différentes (surface terrière, volume, radial, etc.) mais aussi car les modélisations sont souvent basées sur des évolutions passées qu'il est peu pertinent d'étendre à des projections futures (Charru et al., 2017).

En ce qui concerne la mortalité de l'essence, l'évolution de la température estivale est la première variable climatique explicative de la mortalité de 43 espèces étudiées en 2019 par Taccoen et al., et l'évolution des précipitations la deuxième, après les facteurs de sylviculture et de peuplements, qu'il sera nécessaire de considérer constants dans l'étude. La thèse de 2019 d'A. Taccoen dont les résultats sont présentés dans l'article précédent montre que la variation du taux de mortalité de fond pour +1°C de réchauffement n'est pas significative pour la population complète mais qu'elle est de +1,82% pour les arbres dominés.

L'hypothèse majoritaire sur l'évolution de l'aire de distribution du hêtre est une migration vers des altitudes plus fraîches et plus arrosées. La seule variable de la quantité des déficits pluviométriques cumulés de juin et juillet permet de reproduire la carte de présence actuelle du hêtre sur la totalité du territoire français, excepté pour la zone méditerranéenne, car la présence de cette essence est fortement corrélée négativement avec cette variable. Les températures maximales d'octobre permettent d'intégrer l'effet thermique et affiner encore le modèle de répartition, ce qui permet d'arriver à une prédiction de 80% des points où l'essence est réellement présente (Badeau et al., 2005). Dans le futur, l'aire de présence potentielle du hêtre en 2100 serait vraisemblablement en forte régression et restreinte au quart Nord-Est et aux zones montagneuses (Landmann et al. 2007).

Cependant, de nombreuses incertitudes demeurent quant à la rapidité et l'intensité du phénomène (Persuy, 2005). De plus, selon les modèles climatiques utilisés, les résultats cartographiques sont extrêmement différents, ils ne peuvent donc pas être utilisés directement dans l'étude mais peuvent seulement servir à orienter les hypothèses (Cheaib et al., 2012) (Figure 5).

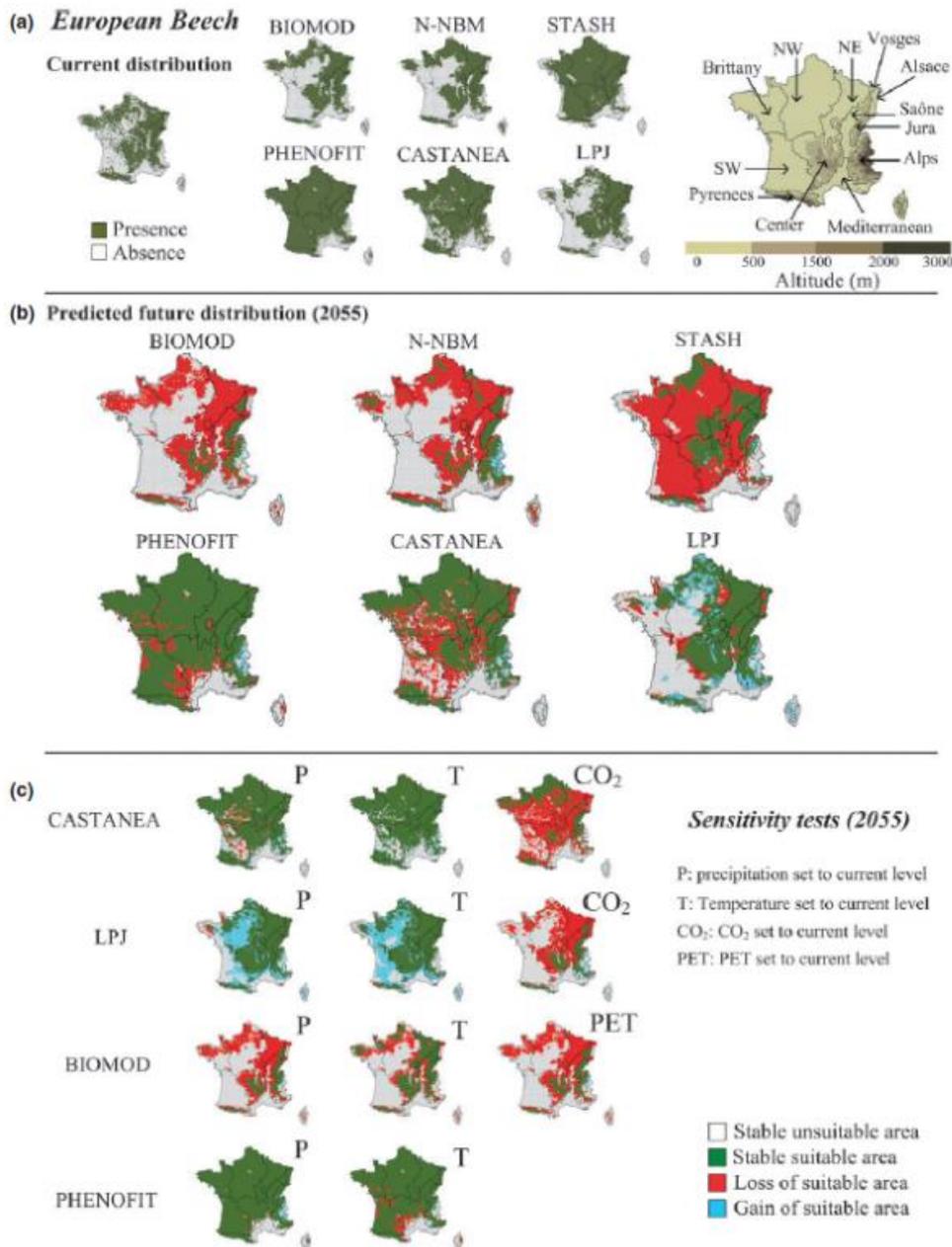


Figure 5: Cartographie prédictive de la distribution future du hêtre à partir de plusieurs modèles différents (Cheaib et al., 2012)

1.5. Choix des essences de remplacement

Deux profils ont été élaborés en complément pour changer partiellement ou totalement d'essence selon les itinéraires afin d'anticiper les conséquences du changement climatique. Les profils d'essence permettent de ne pas prendre une essence en particulier, puisqu'aucune certitude n'existe à propos des espèces à recommander dans le cadre de l'adaptation des peuplements, mais de déterminer des types d'essences plus ou moins résistantes et productives face au changement climatique.

Le premier profil a été construit sur l’hypothèse d’une essence plus résistante que le hêtre à la sécheresse mais avec une aire de répartition en régression en cas de forte évolution des variables climatiques, donc une résistance modérée tout de même, afin de garder des niveaux de productivité correspondants aux attentes actuelles.

En effet, la productivité et la résistance à la sécheresse sont des traits antagonistes, il faut donc faire des compromis entre les deux (Corvol, 2012). L’essence modèle de ce profil nommé P1 est le chêne sessile (*Quercus petraea*) : en effet, la diminution des surfaces favorables à cette espèce semble moins importante dans la plupart des scénarios que pour le hêtre, le sapin pectiné ou encore l’épicéa commun (Piedallu et al., 2009). L’espèce semble moins sensible à la sécheresse du fait d’un enracinement profond (Grossiord et al., 2015). La productivité est cependant inférieure à celle du hêtre. L’inconvénient avec cette essence est sa sensibilité au gibier et la nécessité de protection qui y est liée au vu de l’importante pression exercée dans la région Grand-Est.

Le deuxième profil appelé P2 a plutôt été établi sur des a priori, en cherchant à obtenir un type d’essence très résistant au changement climatique, avec en contrepartie une productivité faible à moyenne. Le chêne pubescent (*Quercus pubescens*) a été pris comme modèle car il s’agit d’une essence méditerranéenne supportant bien la sécheresse, avec peu de débouchés pour l’instant en dehors du bois de chauffage, donc avec des prix très faibles. Cependant, en cas de changement climatique remettant en question la viabilité du chêne sessile, il est possible que le marché du chêne pubescent évolue vers des débouchés bois d’œuvre et que sa grille de prix approche celle du sessile, ce qui le rend intéressant à long terme et en tant qu’essence « assurance » face au réchauffement climatique malgré sa croissance inférieure.

1.6. Etats du monde retenus

Dans cette étude, l’état du monde correspond à un scénario d’évolution du changement climatique déterminant les conséquences qu’auront les décisions du gestionnaire, c’est-à-dire l’itinéraire sylvicole choisi, sur le peuplement étudié.

A partir des scénarios du GIEC et des profils d’essence retenus, cinq états du monde, E1 à E6 (E5 omis, cf. plus bas) décrivant la réponse de ces profils à l’évolution des variables climatiques ont été élaborés. Ces états du monde tentent de retranscrire la résistance ou la résilience des différentes espèces, principes expliqués par la Figure 6. Chacun de ces états du monde se matérialise par une réponse caractéristique en termes de productivité et de mortalité pour les 3 essences, (ou profil d’essences) considérés.

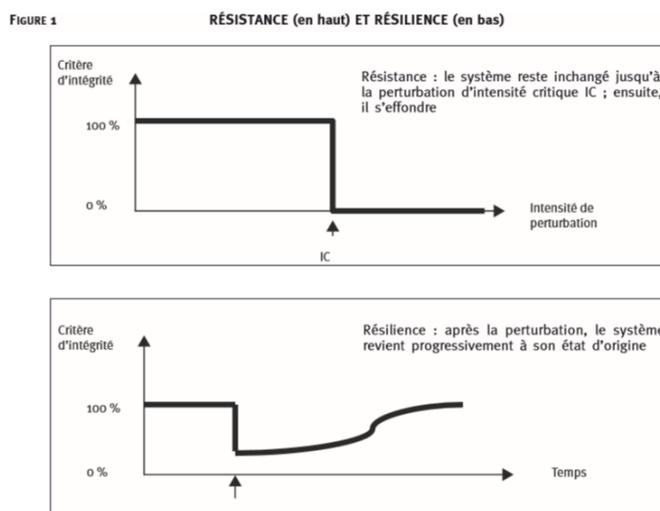


Figure 6: Définition de résistance et résilience des peuplements (Lefèvre et al., 2011)

L'état du monde E1 est le plus optimiste de tous : on y fait l'hypothèse que le changement climatique sera trop faible dans le futur pour avoir un effet sur les trois essences étudiées. Il correspond plutôt au scénario RCP2.6, considéré comme peu probable par les experts du GIEC mais où les émissions de gaz à effet de serre resteraient constantes voire diminueraient, et se base aussi sur des hypothèses de plasticité et forte résistance des essences présentes actuellement en Grand-Est comme le hêtre. Prendre en compte un tel scénario a pour but d'explorer les situations extrêmes malgré la faible probabilité d'occurrence d'une telle projection.

Des scénarios intermédiaires ont été établis : c'est le cas pour les états du monde E2 et E3 qui présentent tous les deux des pertes de productivité dues au manque d'eau. Cette perte d'accroissement évolue de 0 % en 2020, qui est l'année de référence, jusqu'à un seuil en 2100. L'objectif était d'explorer deux niveaux de pertes de productivité différents. Comme vu dans la partie précédente, il est difficile de prévoir et quantifier ces pertes, que ce soit pour le hêtre ou pour l'essence P1, mais d'après les hypothèses de création du profil P1, on considère que cette essence sera légèrement plus résistante à la sécheresse que le hêtre, la perte de production sera donc légèrement inférieure. Les pertes de production liées aux états du monde E2 et E3 sont présentées dans les Figures 7 et 8.

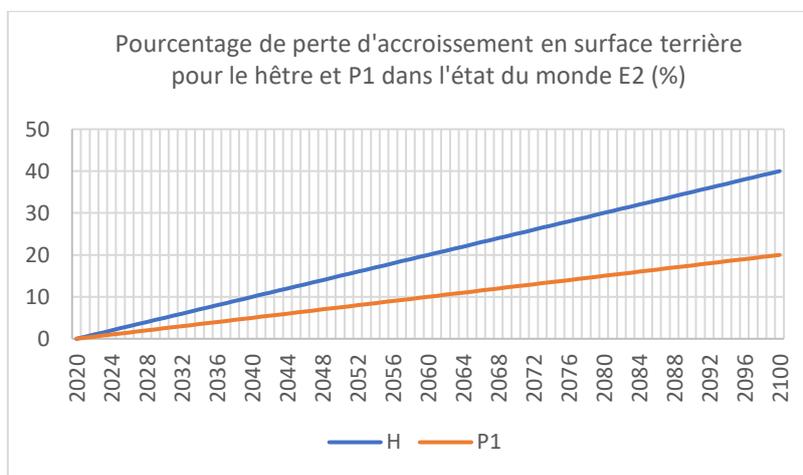


Figure 7: Pourcentage de perte d'accroissement en surface terrière pour le hêtre et P1 dans l'état du monde E2 en fonction du temps

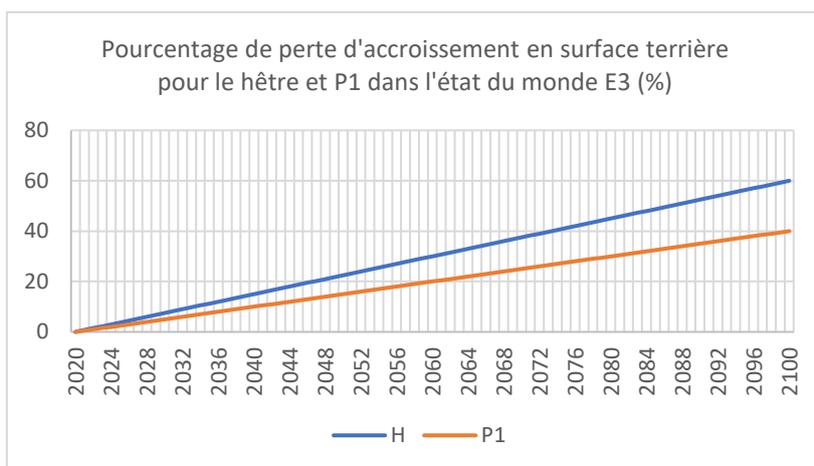


Figure 8: Pourcentage de perte d'accroissement en surface terrière pour le hêtre et P1 dans l'état du monde E3 en fonction du temps

L'essence P2 est supposée être une essence méditerranéenne adaptée à la sécheresse, sa croissance n'est donc pas affectée dans ces états intermédiaires.

Les deux derniers états du monde envisagés correspondent au scénario le plus pessimiste : dans cette projection, les essences hêtre et P1 n'auront plus leur place dans la région Grand-Est étudiée et seront vouées à disparaître. Ce sont les conséquences envisagées par la plupart des modélisations de répartition des aires en cas de changement climatique important. Ces modèles sont basés sur des observations passées ou actuelles et ne peuvent donc pas anticiper avec certitude les conditions climatiques futures, cependant, au vu des connaissances et prédictions actuelles, il est nécessaire d'explorer les hypothèses extrêmes, qu'elles soient optimistes ou pessimistes.

En supposant que les essences vont disparaître, il est nécessaire de poser des hypothèses fortes sur l'apparition et l'évolution de la mortalité des essences. De nombreux « chemins » sont possibles pour arriver à cet état inadapte de l'espèce, trois sous-scénarios ont donc été envisagés dont deux ont été retenus, E4 et E6, l'état E5 étant trop similaire à E4 sur l'évolution de la mortalité.

L'état E4 (Figure 9) correspond à une évolution linéaire de la mortalité du Hêtre de 0% en 2020 jusqu'à 100 % en 2060 où l'essence n'est pas à sa place et ne parvient plus à se régénérer. Pour P1, comme l'espèce est supposée par construction plus résistante que le hêtre au changement climatique mais non adaptée à un changement climatique important, on fait l'hypothèse que sa mortalité suivra la même évolution à dix ans de décalage. A 10% de mortalité, pour les deux essences, on perd le couvert continu des peuplements et la perte de production monte à 60 %, puis à 80 % à 40 % de mortalité, et enfin on perd 100 % de la production à 50 % de mortalité.

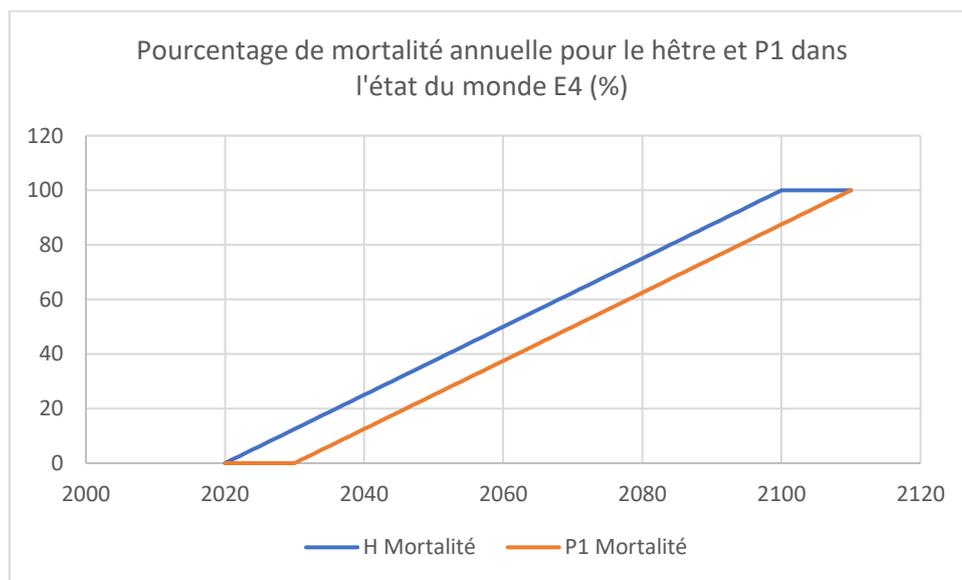


Figure 9: Pourcentage de mortalité annuelle pour le hêtre et P1 dans l'état du monde E4 en fonction du temps

Pour E6 (Figure 10), l'idée était plutôt de se baser sur l'hypothèse que les arbres résisteront à la sécheresse jusqu'à un certain point puis que leur seuil de résistance biologique sera dépassé à une certaine date. Cette date est choisie en fonction des prévisions du GIEC pour la Grand-Est : en effet, une inflexion dans l'augmentation des températures apparaît en 2050. On suppose donc que la mortalité du hêtre évoluera linéairement jusqu'à 10% en 2050, restant relativement modérée, puis qu'elle passera à 100 % cette année-là, entraînant la disparition brutale des peuplements. La perte de productivité atteint 100 % et on ne peut pas renouveler l'essence. P1 suit cette même évolution avec dix ans de retard donc en 2060.

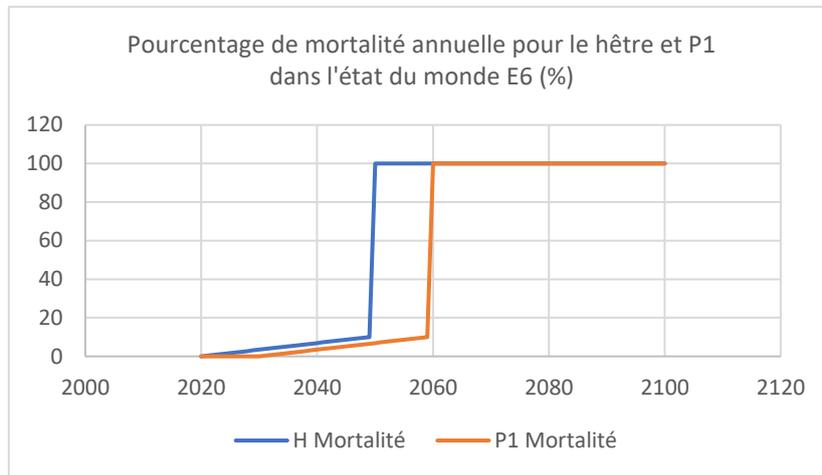


Figure 10 : Pourcentage de mortalité annuelle pour le hêtre et P1 dans l'état du monde E6 en fonction du temps

Dans ces deux états, le changement climatique est supposé tel qu'il affecte l'essence P2 en diminuant son accroissement linéairement jusqu'à une perte de 10 % en 2100 pour E4 (Figure 11) et 20 % en 2100 pour E6 (Figure 12).

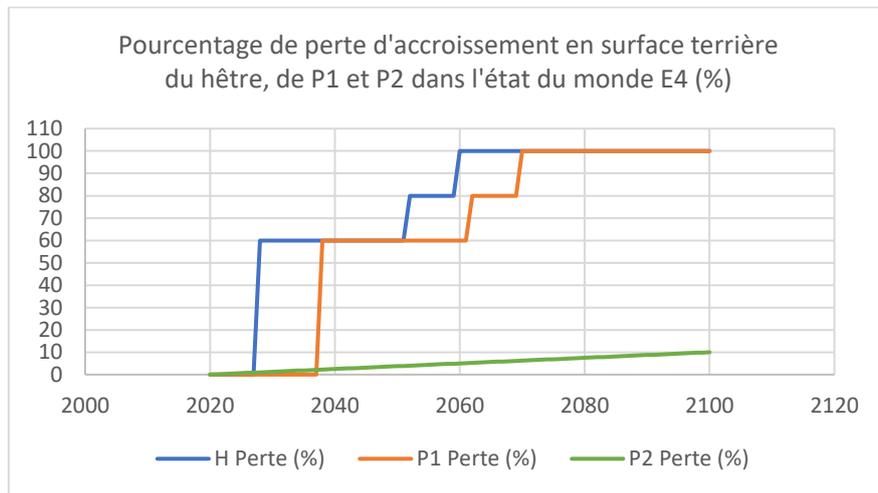


Figure 11: Pourcentage de perte d'accroissement en surface terrière pour le hêtre, P1 et P2 dans l'état du monde E4 en fonction du temps

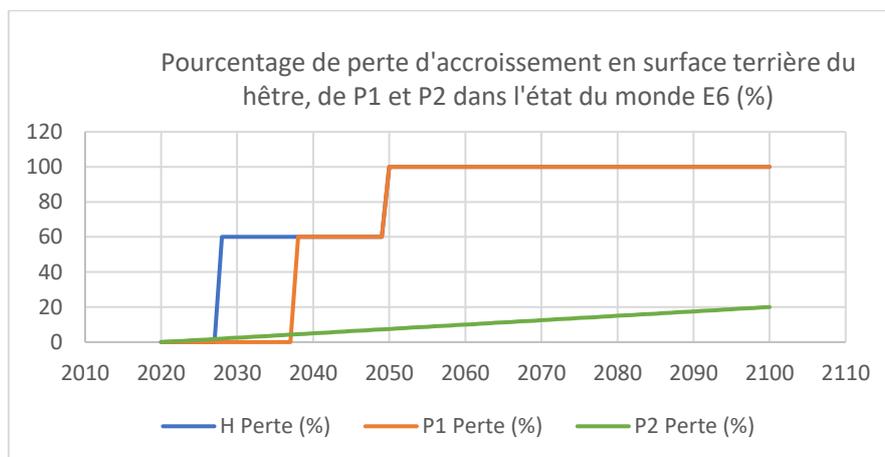


Figure 12: Pourcentage de perte d'accroissement en surface terrière pour le hêtre, P1 et P2 dans l'état du monde E6 en fonction du temps

Au-delà de 2100, les niveaux de productivité et de mortalité restent constants et donc égaux à leur valeur cette année-là en fonction de l'état du monde considéré.

1.7. Peuplements de départ, types et localisation

Les conditions climatiques déterminées en fixant les états du monde étudiés n'auront pas les mêmes conséquences économiques en fonction de la structure du peuplement de départ. Cette structure oriente également les stratégies que l'on peut appliquer pour le renouvellement du hêtre, l'essence présente au départ.

Il a été proposé de retenir trois points de départ pour les études, à partir des inventaires effectués au niveau du massif vosgien alsacien par la Direction Territoriale Grand-Est. Ce sont les types du Guide Massif Vosgien (Asael, 1999) les plus rencontrés sur le territoire étudié, en régulier et irrégulier. D'abord a été choisi un peuplement de type 21, « Peuplement à bois moyens avec petits bois » ; c'est un type de peuplement régulier où la question de la régénération ne se pose pas en conditions actuelles, l'idée est d'explorer l'intérêt d'entamer une régénération très anticipée. Son âge moyen est fixé à 50 ans. Ensuite on a retenu l'étude d'un peuplement de type 23, « Peuplement à bois moyens avec gros bois » ; ici, anticiper la régénération n'amène pas au même sacrifice d'exploitabilité que dans le type 21, car le peuplement comporte des Gros Bois. Son âge moyen est fixé à 80 ans. Enfin, afin d'explorer les possibilités pour les peuplements gérés en irrégulier, on retient un peuplement de type 53, « Peuplement irrégulier à gros bois », correspondant à un type irrégulier sans réel besoin de rééquilibrage.

1.8. Choix des itinéraires sylvicoles

1.8.1. Recommandations générales

Face aux changements climatiques qui s'annoncent, les gestionnaires forestiers s'interrogent sur les stratégies sylvicoles à mettre en place afin de pérenniser et sauvegarder les forêts françaises, en tentant au mieux de conserver les niveaux de production actuels, au pire en minimisant les pertes économiques voire dans certains cas en tentant simplement de maintenir l'état boisé à un stade arboré.

Les projections sont marquées par de fortes incertitudes sur la nature et l'ampleur des phénomènes, comme évoqué précédemment, ainsi que sur les réponses des systèmes sylvicoles actuels à ces événements. Les interrogations actuelles dépassent donc celles uniquement liées aux questions sur le raccourcissement des révolutions et la dynamisation de la sylviculture (Corvol, 2012). Parmi elles, une interrogation principale est bien-sûr celle de l'introduction d'essence (cf. 1.1 Essences étudiées et conséquences du changement climatique).

Les recommandations générales en matière de sylviculture vont dans le sens d'une plus grande diversité d'essences afin de diminuer l'abondance ou les dégâts des ravageurs, en défavorisant les monophages et en étalant les pressions exercées (Grégoire, 2010) mais aussi d'augmenter la résistance et la résilience des peuplements. Les éclaircies et travaux sont ainsi des moyens de doser le mélange d'essences et de choisir la composition future du peuplement. Il sera évidemment nécessaire d'ajuster les éclaircies ainsi que la sylviculture appliquée aux modifications de productivité des forêts et d'adapter les références de croissance (Kolström, 2011 et Legay et Mortier, 2006), tout en sélectionnant des essences et des provenances adaptées lors de la régénération et des travaux (Kolström, 2011), en favorisant les déplacements volontaires d'espèces avec la migration naturelle ou assistée des aires de répartition. Il est très probable qu'on ne puisse de toute façon pas se passer de la régénération artificielle pour adapter les peuplements (Legay et Mortier, 2006). Certaines techniques d'introduction permettent de réduire le stress hydrique qui peut être important dans le cadre de coupes définitives de gestion régulières,

rases ou autre perturbantes, comme les coupes suivies de plantation par trouées, abris ou bandes étroites, voire avec des paillages les premières années pour protéger le sol (Bastien et al., 2000).

En termes de renouvellement, les grands principes appliqués en gestion forestière sont de préparer les peuplements au bon moment pour éviter les sacrifices d'exploitabilité ou de mener les peuplements au-delà de leur optimum économique ou biologique, et d'effectuer un diagnostic stationnel complet permettant de sélectionner l'essence réputée la plus adaptée au milieu compte tenu des connaissances actuelles. C'est un point essentiel à ne surtout pas négliger dans le cadre du changement climatique. Un autre point clé est d'évaluer l'équilibre sylvocynégétique et donc la pression exercée par le gibier sur le renouvellement, qui peut amener à un échec de la régénération ou obliger à mettre en place des coûts de protection importants (Abt, 2015).

La question de l'introduction d'espèces en forêt est assurément centrale dans les interrogations autour de la gestion du changement climatique. En effet, au vu des projections sur l'évolution des aires naturelles des essences, il est probable que le changement climatique soit trop rapide pour compter essentiellement sur la migration naturelle pour assurer la continuité des forêts françaises. Il faut donc envisager d'introduire par plantation des essences exotiques en visant leur naturalisation au fil du temps ou des essences de provenance située plus au Sud qu'habituellement, en comptant sur l'adaptation de ces individus. Sont recherchées des essences rustiques et faciles à propager comme les pins, voire des espèces adaptées à des climats plus chauds et plus secs comme les résineux et feuillus du bassin méditerranéen : cèdres, sapins de Céphalonie, de Bornmuller, pin d'Alep, de Brucie ou pin noir de Salzmann, chênes méditerranéens, etc. (Corvol, 2012).

1.8.2.Scénarios retenus

En suivant ces recommandations générales, des itinéraires sylvicoles répondant au besoin de renouvellement du hêtre dans les peuplements étudiés ont été élaborés. Les résultats économiques recherchés par cette étude sont évidemment très sensibles aux caractéristiques techniques retenues pour chaque scénario sylvicole (coûts, fréquence des interventions, récoltes effectuées) et on a donc cherché à rationaliser le plus possible les choix effectués.

Trois questions majeures se sont posées lors de l'élaboration de ces itinéraires, qui correspondent globalement aux questions de recherche de l'étude.

La première est de choisir à quel moment le gestionnaire commence à régénérer le peuplement. Dans le cadre d'une gestion régulière, cela peut être : à l'optimum, c'est-à-dire à l'âge d'exploitabilité (donc le calcul est explicité au 1.8.2.5 Calcul et application de l'âge d'exploitabilité) si le taux de mortalité observé dans le peuplement n'est pas alarmant et qu'on mène l'essence jusqu'à son terme d'exploitabilité, sinon à l'âge où le taux de mortalité seuil pour déclarer l'essence non viable est atteint ; ou bien dès maintenant, dans le but d'anticiper une telle situation, sachant que cette précaution permet de réduire le risque mais entraîne, notamment pour le peuplement de type 21, un sacrifice d'exploitabilité plus important. En effet, l'âge d'exploitabilité correspond à l'optimum économique du peuplement, c'est un âge pivot : si on coupe le peuplement avant, il n'a pas atteint son plein potentiel économique ; si on le coupe après, le coût d'utilisation du sol n'optimise pas les retours économiques possible si on répète indéfiniment le cycle considéré.

Habituellement, on estime que le gestionnaire (ici, l'ONF) décide de changer d'essence à partir d'un taux de mortalité d'environ 10 % du peuplement par an, répétée chaque année, on a donc choisi ce seuil comme limite à la conduite d'une essence. S'il est atteint, il faut compter cinq ans de délai pour laisser le temps au gestionnaire de réagir et de remplacer l'essence. En gestion irrégulière, la question du « quand » est moins intéressante car le changement d'essence peut être effectué à n'importe quel moment, on a donc fixé arbitrairement qu'il se ferait

dès maintenant et que la surface exploitée à chaque coupe serait régénérée avec l'essence choisie selon le scénario.

Une deuxième question importante est celle de la vitesse de régénération en gestion régulière. Une vitesse classique envisagée est celle de la régénération régulière « rapide », en plusieurs coupes, sur une vingtaine d'années. On peut également choisir une régénération régulière allongée, sur une quarantaine d'années, permettant de limiter par exemple les sacrifices d'exploitabilité en particulier pour un peuplement de type 21. Une irrégularisation du peuplement peut également être envisagée. Cette question de la vitesse n'a pas été traitée dans la suite de l'étude faute de temps.

Enfin, la dernière problématique est celle de l'essence par laquelle on remplace celle que l'on régénère, et elle a été traitée au 1.4 Choix des essences de remplacement.

En gestion régulière, garder le hêtre en essence objectif signifie le renouveler naturellement par installation des semis dans les zones laissées par les coupes de régénération successives. Afin de changer d'essence et d'installer P1, il faut faire ces coupes de régénération tout en plantant les zones laissées en essence P1. Au vu de la dynamique du hêtre très concurrentielle, le peuplement sera un mélange de hêtre et de P1. On installe l'essence P2 de la même manière que P1.

En gestion irrégulière menée à partir de peuplements contenant des Gros Bois (diamètre supérieur à 47,5 cm), l'objectif consiste à récolter les Gros Bois arrivés à maturité en laissant les arbres de plus petits diamètres prendre leur place. Ainsi, à chaque coupe dans la hêtraie irrégulière, on laisse une trouée où des semis de hêtre pourront s'installer et permettant ainsi de s'appuyer sur une régénération naturelle. Pour installer P1 ou P2, à chaque coupe, il faudra effectuer une plantation en placeaux dans les trouées laissées par les Gros Bois enlevés.

Les itinéraires envisagés pour les peuplements réguliers (21 et 23) sont résumés dans le Tableau 1.

| | Nom | Description |
|---|--------|---|
| Itinéraire de référence | Réf | On régénère le hêtre naturellement si possible à son âge d'exploitabilité. Si le hêtre atteint le seuil de mortalité de 10 % avant l'âge d'exploitabilité, on coupe le hêtre et on plante l'essence P1, qu'on tente de mener jusqu'à son âge d'exploitabilité pour la renouveler naturellement. Si P1 atteint le seuil de mortalité de 10 % avant l'âge d'exploitabilité, on coupe P1 et on plante l'essence P2 qu'on mène jusqu'à son âge d'exploitabilité avant de la régénérer naturellement. |
| Changement à la première mise en régénération | P1 | On régénère le hêtre artificiellement avec P1 si possible à son âge d'exploitabilité. Si le hêtre atteint le seuil de mortalité de 10 % avant l'âge d'exploitabilité, on coupe le hêtre et on plante l'essence P1, qu'on tente de mener jusqu'à son âge d'exploitabilité pour la renouveler naturellement. Si P1 atteint le seuil de mortalité de 10 % avant l'âge d'exploitabilité, on coupe P1 et on plante l'essence P2 qu'on mène jusqu'à son âge d'exploitabilité avant de la régénérer naturellement. |
| | P2 | On régénère le hêtre artificiellement avec P2 si possible à son âge d'exploitabilité. Si le hêtre atteint le seuil de mortalité de 10 % avant l'âge d'exploitabilité, on coupe le hêtre et on plante l'essence P2, qu'on mène jusqu'à son âge d'exploitabilité avant de la régénérer naturellement. |
| | P1P2 | On régénère le hêtre artificiellement avec P1 et P2 si possible à son âge d'exploitabilité. Si le hêtre atteint le seuil de mortalité de 10 % avant l'âge d'exploitabilité, on coupe le hêtre et on plante un mélange des essences P1 et P2, qu'on tente de mener jusqu'à leurs âges d'exploitabilité pour les renouveler naturellement. Si P1 atteint le seuil de mortalité de 10 % avant l'âge d'exploitabilité, on coupe P1 et on plante l'essence P2 qu'on mène jusqu'à son âge d'exploitabilité avant de la régénérer naturellement. |
| Changement immédiat | ImP1 | On régénère le hêtre artificiellement avec P1 dès maintenant, et on tente de mener P1 jusqu'à son âge d'exploitabilité. Si P1 atteint le seuil de mortalité de 10 % avant l'âge d'exploitabilité, on régénère P1 artificiellement avec l'essence P2 qu'on mène jusqu'à son âge d'exploitabilité. |
| | ImP2 | On régénère le hêtre artificiellement avec P2 dès maintenant, essence qu'on mène jusqu'à son âge d'exploitabilité. |
| | ImP1P2 | On régénère le hêtre artificiellement avec P1 et P2, dès maintenant, et on tente de mener les deux essences jusqu'à leur âge d'exploitabilité. Si P1 atteint le seuil de mortalité de 10 % avant l'âge d'exploitabilité, on régénère P1 artificiellement avec l'essence P2 qu'on mène jusqu'à son âge d'exploitabilité. |

Tableau 1: Itinéraires pour les peuplements réguliers (21 et 23)

Les itinéraires envisagés pour le peuplement irrégulier (53) sont résumés dans le Tableau 2.

| | Nom | Description |
|-------------------------|------|---|
| Itinéraire de référence | Réf | On régénère le hêtre si possible naturellement, donc avec du Hêtre, à chaque coupe. Si le hêtre atteint le seuil de mortalité de 10 %, on coupe le Hêtre et on plante l'essence P1 (retour à une gestion régulière). Si P1 atteint le seuil de mortalité de 10 % avant l'âge d'exploitabilité, on coupe P1 et on plante l'essence P2 qu'on mène jusqu'à son âge d'exploitabilité avant de la régénérer naturellement. |
| Changement d'essence | P1 | On régénère le hêtre artificiellement avec P1 à chaque coupe. Si P1 atteint le seuil de mortalité de 10 % avant l'âge d'exploitabilité, on coupe P1 et on plante l'essence P2 (retour à une gestion régulière). |
| | P2 | On régénère le hêtre artificiellement avec P2 à chaque coupe. |
| | P1P2 | On régénère le hêtre artificiellement avec P1 et P2 à chaque coupe. Si P1 atteint le seuil de mortalité de 10 % avant l'âge d'exploitabilité, on coupe P1 et on plante l'essence P2. |

Tableau 2: Itinéraires pour le peuplement irrégulier (53)

1.9. Arbres de décisions

Le croisement de ces itinéraires avec les états du monde établis précédemment donne pour le gestionnaire les arbres de décisions présentés ci-après.

La Figure 13 est la légende des trois arbres suivants en traitement régulier (Figures 14, 15 et 16).

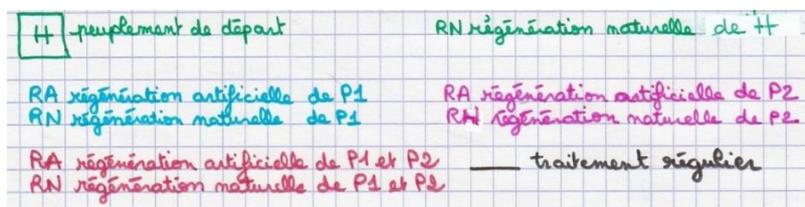


Figure 13: Légende des arbres de décision pour les peuplements réguliers

Pour des points de départ en peuplements réguliers (21 et 23) de type Hêtraie pure, les itinéraires possibles lors des états du monde E1, E2 et E3 sont présentés en Figure 14.

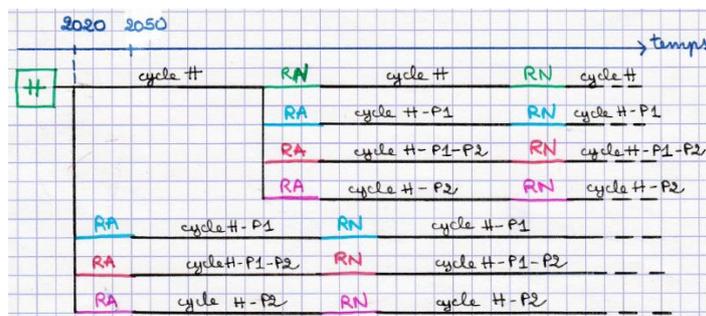


Figure 14: Arbre de décision pour les peuplements de type 21 et 23 et les états du monde E1, E2 et E3

De 0 à 30 ans, le peuplement est dans une phase dite « de renouvellement » où l'on engage les coûts de préparation, de plantation, de protection, d'installation et d'entretien des cloisonnements et des travaux de dosage des essences et des qualités. Les coupes effectuées ne rapportent rien car le diamètre des arbres exploités n'est pas suffisant.

En suivant l'itinéraire de référence (première branche de l'arbre), on conduit le hêtre jusqu'à son âge d'exploitabilité, puis on le renouvelle naturellement. L'âge d'exploitabilité sera probablement inférieur dans les états du monde où la productivité du hêtre est affectée, E2 et E3. A la fin du deuxième cycle de hêtre, plus long dans les états E2 et E3, on peut à nouveau renouveler l'essence naturellement et ainsi de suite à l'infini.

Si on choisit de remplacer le hêtre par P1 à la première mise en régénération (deuxième branche de l'arbre), on engage une régénération artificielle de P1 à l'âge d'exploitabilité du hêtre, puis un cycle de production sur un peuplement mélangé hêtre-P1, que l'on peut régénérer naturellement à la fin, réduisant ainsi les coûts d'installation de P1 pour les cycles suivants.57484285874

Dans un itinéraire remplaçant le hêtre par P2 à la première mise en régénération (quatrième branche de l'arbre), on plante P2 à l'âge d'exploitabilité du hêtre, puis un cycle de production sur un peuplement mélangé hêtre-P2, que l'on peut régénérer naturellement ensuite pour réduire les coûts d'installation sur tous les cycles suivants. C'est la même chose pour remplacer par un mélange de P1 et P2 (troisième branche de l'arbre).

Si on décide de changer l'essence dès maintenant, on coupe le peuplement tout de suite et on engage la régénération artificielle avec la ou les essence(s) choisie(s) (P1, P2 ou les deux), que l'on renouvellera naturellement dans les cycles suivants (cinquième, sixième et septième branches de l'arbre).

La durée des cycles se stabilise dans les états du monde E2 et E3 lorsqu'ils commencent après 2100 car, par construction des états du monde, la productivité n'évolue plus à partir de cette année (cf. 2.7. Etats du monde retenus) ; ainsi, les âges d'exploitabilité, dépendant en partie de la productivité des essences, seront toujours les mêmes car calculés avec des paramètres constants et donc les durées des cycles aussi.

La Figure 15 montre les itinéraires possibles dans un état du monde E4.

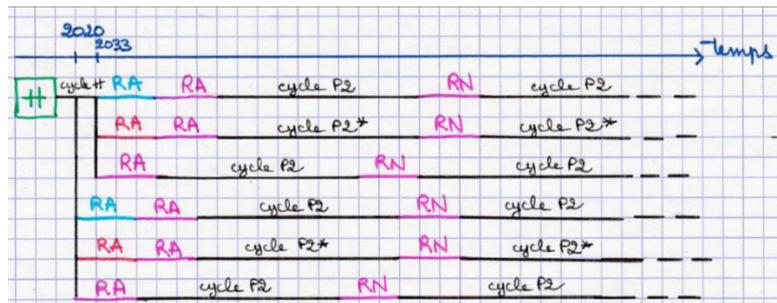


Figure 15: Arbre de décision pour les peuplements de type 21 et 23 et l'état du monde E4

En suivant l'itinéraire de référence (première branche de l'arbre), le gestionnaire continue le traitement régulier de la hêtraie pure jusqu'en 2028 où il observe une mortalité de 10 % de la surface terrière par an. En comptant cinq ans de délai pour qu'il puisse confirmer ces observations et réagir en conséquence, on commence une régénération artificielle de P1 en 2033. En 2063, une fois la phase de renouvellement achevée, la mortalité constatée dans le peuplement de P1 âgé de 30 ans est supérieure à 10 %. Or, si ce niveau de mortalité peut être acceptable et normal dans les stades jeunes des plantations (technique de plantation non adaptée, fragilité des plants, etc.), à 30 ans, ce même niveau est inquiétant et traduit une inadaptation de l'essence au milieu. Le gestionnaire est donc contraint de couper le peuplement de P1 bien avant sa maturité et de le remplacer par régénération artificielle par l'essence P2 qui elle ne subit pas de mortalité mais une perte d'accroissement. Les cycles suivants concernent des peuplements purs de P2 renouvelés naturellement. L'itinéraire consistant à renouveler le hêtre à la première mise en régénération par l'essence P1 suit la même branche de l'arbre.

Si l'on décide de remplacer le hêtre à la première mise en régénération donc sous la contrainte en 2033 par un mélange de P1 et de P2 planté (deuxième branche de l'arbre), une fois que le peuplement mélangé a atteint 30 ans, la mortalité constatée empêche de continuer le cycle mélangé et oblige à couper la partie du peuplement constituée de l'essence P1, cette partie étant remplacée par plantation de l'essence P2. On mène ensuite un peuplement composé de deux sous-peuplements de P2 d'âges différents, pouvant chacun être mené jusqu'à exploitabilité puis renouvelés naturellement, ce qui conduit à un enchaînement de cycles de traitement régulier de peuplements purs de P2, régénérés naturellement.

En remplaçant le hêtre en 2033 par P2 (troisième branche de l'arbre), l'essence ne subissant pas de mortalité mais seulement une perte de productivité, on peut continuer sur un cycle de P2 pur renouvelé naturellement à l'infini.

En remplaçant maintenant par P1 ou P1 et P2 (quatrième et cinquième branches de l'arbre), on rencontre les mêmes problématiques qu'en engageant le renouvellement en 2033 car en 2050, lorsque le peuplement arrive à 30 ans, la mortalité de P1 est supérieure à 10 %, ce qui oblige le gestionnaire à remplacer l'essence par P2, avec les mêmes conséquences que pour les branches précédentes. En remplaçant directement par P2 (sixième branche

de l'arbre), on évite ce cycle « inutile » ne contenant que les coûts d'installation et non les retours sur investissements par éclaircie du peuplement de P1, de la même manière qu'en 2033 lorsque la mortalité du hêtre l'impose.

La Figure 16 montre les itinéraires possibles dans un état du monde E6.

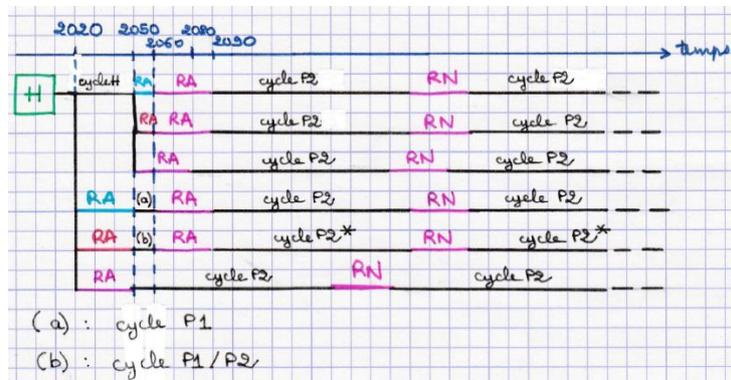


Figure 16: Arbres de décision pour les peuplements de type 21 et 23 et l'état du monde E6

La première branche de l'arbre montre l'itinéraire de référence et celui où on remplace le hêtre par P1 à la première mise en régénération. En effet, le gestionnaire peut mener le hêtre jusqu'en 2050 car le pourcentage de mortalité annuelle reste inférieur à 10 %. A cette date, cette mortalité passe à 100 %, ce qui entraîne la disparition du peuplement. On doit alors installer artificiellement P1, qui disparaît à son tour en 2060, ce qui contraint à planter P2, mené ensuite en cycles renouvelés naturellement.

Si l'on remplace en 2050 le hêtre par un mélange de P1 et P2 planté, la partie du peuplement constituée par P1 disparaît en 2060 et il faut alors la remplacer par une plantation de P2. On mène alors un peuplement composé de deux sous-peuplements de P2 d'âges différents, à l'infini par régénération naturelle. Planter directement P2 à la disparition du hêtre en 2060 (troisième branche de l'arbre) permet de s'épargner les coûts d'installation de P1 et d'arriver directement sur la succession de cycles de l'essence P2 par régénération naturelle.

En décidant de remplacer dès maintenant le hêtre par P1 (quatrième branche de l'arbre), le gestionnaire peut mener son peuplement jusqu'en 2060, à l'âge de 40 ans, où P1 disparaît. Il faut donc planter P2 en remplacement. Si l'on met en place un mélange de P1 et P2 (cinquième branche), en 2060, il faudra remplacer la partie concernée de P1 par régénération artificielle avec l'essence P2, ce qu'on s'épargne en plantant directement P2 (sixième branche).

La Figure 17 est la légende pour les deux arbres en traitement irrégulier (Figures 18 et 19).

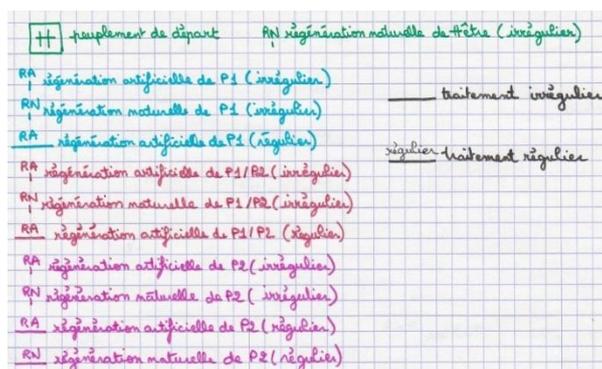


Figure 17 : Légende pour les arbres de décision pour le peuplement de type 53

La Figure 18 montre les itinéraires possibles en traitement irrégulier pour les états du monde E1, E2 et E3.

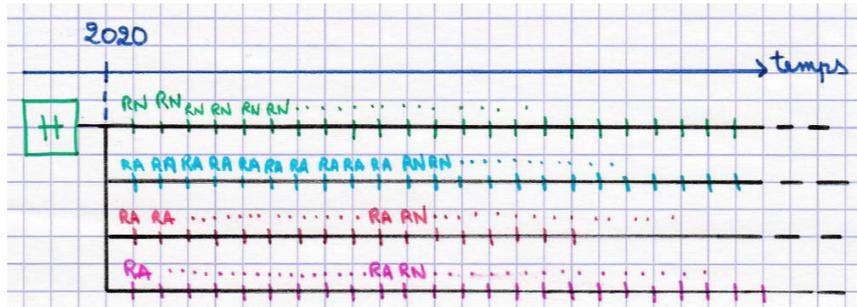


Figure 18: Arbres de décision pour le peuplement de type 53 dans les états du monde E1, E2 et E3

La première branche de l'arbre correspond à l'itinéraire de référence où on gère la hêtraie pure en irrégulier type à l'infini car la présence de l'essence n'est pas remise en question. A chaque coupe dans le peuplement, on renouvelle naturellement le peuplement par installation de semis de hêtre dans les trouées ainsi créées, et ainsi de suite à l'infini. Si on décide de remplacer progressivement une partie du hêtre par P1 (deuxième branche de l'arbre), on plante cette essence à chaque coupe dans les zones laissées libres en complément des semis naturels de hêtre. Au bout d'un certain nombre de rotation, l'essence P1 se régénère naturellement et on n'a plus besoin de planter pour remplacer les individus coupés. C'est la même chose pour un remplacement par un mélange de P1 et P2 (troisième branche de l'arbre) et par P2 (quatrième branche de l'arbre).

La Figure 19 montre les itinéraires possibles pour un état du monde E6.

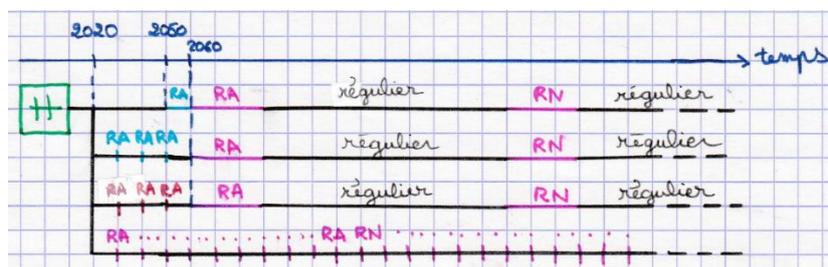


Figure 19 : Arbres de décision pour le peuplement de type 53 dans l'état du monde E6

Si le gestionnaire suit le scénario de référence (première branche de l'arbre), en 2050, le hêtre n'est plus à sa place et disparaît brutalement car son pourcentage de mortalité annuelle passe à 100 %. On est alors obligé de repasser à une gestion régulière en plantant P1 pour remplacer le peuplement. Or, cette essence disparaît à son tour en 2060, et le gestionnaire doit donc mettre en place une régénération régulière artificielle de P2, enchaînant ensuite les cycles sur un peuplement pur de P2 (qui subit une perte d'accroissement) avec régénération naturelle de l'essence. Cela correspond à l'itinéraire régulier présenté précédemment. Il est possible d'irrégulariser ensuite les cycles pour revenir à une gestion en futaie irrégulière, mais cela n'a pas été envisagé dans l'étude par simplification.

La deuxième branche correspond à un début d'installation progressive de P1 à chaque coupe jusqu'à ce que l'essence ne soit plus adaptée, en 2060, date à laquelle on installe donc P2 par plantation après la coupe du peuplement de P1 et de hêtre qui dépérit. La suite est identique à l'itinéraire de référence. Pour le mélange de P1 et P2 (troisième branche de l'arbre), le peuplement sera difficile à modéliser car il sera constitué de plusieurs compartiments d'âge et de proportions différentes, donnant ainsi un peuplement irrégulier non équilibré nécessitant une période de transition pour arriver à un irrégulier type.

Si l'on remplace progressivement le hêtre par P2 à chaque rotation (quatrième branche de l'arbre), on peut continuer à planter cette essence au fur et à mesure afin d'obtenir un peuplement irrégulier en P2 pur, que l'on pourra renouveler naturellement ensuite à chaque rotation.

Faute de temps, l'étude de l'état du monde E4 et du remplacement par un mélange P1/P2 en traitement irrégulier ont été abandonnés pour ce stage.

1.10. Modélisation des peuplements

1.10.1. Choix de l'outil de modélisation

Afin de calculer les conséquences économiques de chaque itinéraire dans chaque état du monde et dans chaque type de peuplement, il est nécessaire de simuler le peuplement forestier ainsi que les interventions qui y seront pratiquées.

Cet outil doit pouvoir simuler une hêtraie pure, un peuplement régulier mélangé hêtre – P1 (sur le modèle du Chêne sessile), hêtre-P2 (sur le modèle du Chêne pubescent), hêtre-P1-P2, et un peuplement pur de P2. De plus, il faut pouvoir modéliser avec une finesse relative les interventions sylvicoles pratiquées car les itinéraires élaborés constituent le cœur de l'étude, que ce soit en gestion en futaie régulière ou irrégulière. L'outil doit enfin intégrer les effets du changement climatique sur la croissance des essences ainsi que sur leur mortalité.

Différents modèles existants ont été envisagés afin de simuler les peuplements de cette étude et leur gestion.

Le modèle Samsara est un modèle dynamique de peuplement irrégulier, individu centré, qui n'a pas été conçu pour intégrer les effets du climat : c'est une perspective en cours de travail. Cependant, il permet de faire varier les paramètres démographiques des peuplements étudiés, comme le renouvellement, la croissance et la mortalité, ce qui peut permettre d'intégrer les effets théorisés dans les parties précédentes, mais les incertitudes sur ces effets rendent l'utilisation d'un modèle d'une telle précision trop chronophage pour la qualité des résultats obtenus. En effet, pour utiliser cet outil, il faut créer une placette complète d'étude, et paramétrer les caractéristiques des essences autres que le hêtre ainsi que pour les mélanges.

Mathilde est également un modèle individu centré avec une approche statistique utilisant les données de l'Inventaire Forestier National et permettant de simuler des peuplements réguliers ou irréguliers, mixtes ou purs, de feuillus. Il intègre un module de coupe avec intégration des prix du bois qui permet d'automatiser les coupes et donc de simuler les itinéraires sylvicoles envisagés. Cependant, il n'intègre pas les effets du changement climatique (Fortin, Manso, 2016).

Les modèles dendrométriques comme Fagacées (hêtre et chêne) ne sont pas basés sur les mêmes mécanismes prennent pas en compte les variations du climat mais on peut y régler la fertilité. Cependant, le changement de fertilité ne peut intervenir au cours du cycle et impose donc de coller deux cycles différents, ce qui peut amener des discontinuités dans les variables dendrométriques et fausser les calculs économiques.

Enfin, les approches fonctionnelles des modèles écophysiologiques (Castanea par exemple), seraient plus aptes à prendre en compte l'évolution du climat, mais ces modèles intègrent relativement mal la sylviculture, problématique qui est centrale à l'étude.

Au final, la diversité des essences et des traitements étudiés ainsi que l'intégration des effets du changement climatique sur la croissance et la mortalité de ces essences, ou encore la question centrale des itinéraires sylvicoles amènent à la conclusion qu'il faudrait pouvoir combiner plusieurs modèles, ce qui amènerait à une incohérence des méthodes utilisées et donc des difficultés dans la comparaison des résultats. De plus, les nombreuses

incertitudes sur les effets du changement climatique sur les trois profils d'essences étudiés ne permettent pas de tirer parti de la précision des modèles quant à la croissance des peuplements.

Il a donc été choisi de simuler les peuplements « manuellement », sous forme d'un tableau de données Excel résumant pour chaque année les caractéristiques du peuplement et des interventions sylvicoles pratiquées, en se basant sur un certain nombre d'hypothèses qui sont présentées dans la suite du rapport.

1.10.2. Traitement pour les peuplements réguliers

1.10.2.1. Croissance des essences

1.10.2.1.1. Hêtre et profil P1

Les tables des caractéristiques dendrométriques du hêtre (Annexe 1) et de P1 (Annexe 2) (sur le modèle du chêne sessile) ont été élaborées à partir de travaux d'élèves utilisant le modèle Fagacées sur Capsis (2012-2018 ; encadrement Vinkler I., Wernsdörfer H., Lacombe E. ; AgroParisTech, non publiés). Ont été calculés ou directement extraits à chaque âge du peuplement : l'accroissement annuel en surface terrière ($m^2/ha/an$) ; le diamètre moyen D_g du peuplement ; le coefficient de cubage moyen du peuplement, permettant de passer d'une récolte en surface terrière (m^2/ha) à une récolte en volume (m^3/ha), en intégrant à la fois la hauteur et le coefficient de forme des individus. Cette table est en adéquation avec les valeurs de référence données par le Guide Hêtre Lorrain (Bock et al., 2005), qui est utilisé comme référence pour l'élaboration technique des itinéraires sylvicoles. C'est ce qui était attendu car ce guide a été construit à l'aide des données du modèle Fagacées.

1.10.2.1.2. Profil P2

Il n'existe pas de modèles ou de tables d'accroissement concernant le chêne pubescent, essence prise comme modèle dendrométrique du profil P2, au-delà de la gestion en taillis préconisée dans la zone méditerranéenne. Le Guide Chêne Pubescent (Santelli, 1997) donne des accroissements en volume indicatifs selon l'âge du peuplement : $3 m^3/ha/an$ entre 50 et 70 ans, $2 m^3/ha/an$ entre 70 et 90 ans, et $1,5 m^3/ha/an$ au-delà de 90 ; ainsi que la hauteur dominante du peuplement en fonction de l'âge : 17 m à 50 ans, 20 m à 70 ans, 22,5 m à 90 ans, 25 m à 120 ans et 26 m à 150 ans. En considérant que les caractéristiques dendrométriques du chêne pubescent ressemblent à celles du chêne sessile en dehors des valeurs d'accroissement qui sont inférieures, on peut construire la même table pour P2 que pour le hêtre et P1, en Annexe 3. Le Tableau 3 résume les calculs et valeurs de référence utilisés pour construire cette table, avec $Acct$ l'accroissement (en volume ou en surface terrière), H_0 la hauteur dominante du peuplement c'est-à-dire la moyenne des hauteurs des cent plus grands arbres du peuplement, H_g la hauteur moyenne quadratique c'est-à-dire la hauteur de l'arbre de surface terrière moyenne du peuplement, D_g le diamètre moyen quadratique c'est-à-dire le diamètre à 1,30m de l'arbre de surface terrière moyenne du peuplement et FH le coefficient de cubage en volume.

| Âge | De 30 à 50 ans | Plus de 50 ans |
|------------------------------|--|--|
| Acct (m ³ /ha/an) | 3 m ³ /ha/an | Valeur pour P2 tirée du guide |
| Facteur de forme | 0,5 | 0,5 |
| H ₀ | Valeur pour P1 | Valeur pour P2 tirée du guide |
| Rapport Hg/H ₀ | Rapport pour P1 | Rapport pour P1 |
| Hg | H ₀ x Rapport Hg / H ₀ | H ₀ x Rapport Hg / H ₀ |
| FH | Facteur de forme x Hg | Facteur de forme x Hg |
| Acct (m ² /ha/an) | Acct en volume / FH | Acct en volume / FH |
| Rapport Dg/Hg | Valeur pour P1 | Valeur pour P1 |
| Dg | Hg x Rapport Dg / Hg | Hg x Rapport Dg / Hg |

Tableau 3: Calculs utilisés pour la construction de la table dendrologique de P2

1.10.2.2. Modélisation du peuplement et application des itinéraires sylvicoles

Le peuplement est simulé à partir d'un tableau Excel présentant et calculant pour chaque année les caractéristiques du peuplement nécessaires aux calculs économiques visés, dont un exemple est disponible en Annexe 4.

On a choisi de gérer le mélange en divisant le peuplement en sous-peuplements, avec un sous-peuplement par essence et par âge. Chaque sous-peuplement représente un certain pourcentage de la surface du peuplement total et donc de l'accroissement total. Le pourcentage représenté par le sous-peuplement est recalculé chaque année car les écarts d'accroissement entre les essences entraînent des évolutions dans la composition du peuplement.

On cherche à connaître pour chaque année et chaque sous-peuplement : le volume, le diamètre moyen et donc le prix applicable à la coupe rase de ce sous-peuplement ; le volume éclairci (si éclaircie il y a) et le diamètre moyen de l'éclaircie. Les volumes sont calculés en multipliant les surfaces terrières concernées par le facteur de cubage de l'essence à l'âge considéré.

Lorsqu'une éclaircie est réalisée, la composition de l'éclaircie en surface terrière est égale en pourcentages à la composition du peuplement sur pied total en surface terrière. En prenant les caractéristiques de l'essence à l'âge considérée, on obtient le volume prélevé pour chaque essence ainsi que le diamètre moyen de l'éclaircie pour chaque essence, qui correspond au diamètre moyen du sous-peuplement.

En suivant les recommandations du Guide Hêtre Lorrain (Bock et al., 2005) et du Guide Chênaie Continentale (Sardin, 2008), on fixe la surface terrière avant éclaircie limite à 24 m²/ha ainsi que la surface terrière à prélever à 5 m²/ha. Les itinéraires basés sur ces guides et appliqués ensuite en termes de rotations (temps entre deux éclaircies) dépendent donc de l'accroissement, si celui-ci diminue, la durée de rotation augmentera. Lorsque les accroissements sont vraiment trop bas pour prélever 5 m²/ha en éclaircie et que les rotations sont déjà très longues (12 à 15 ans), on diminuera la surface prélevée à 3 m²/ha (c'est le cas notamment pour des peuplements de P2 subissant une perte d'accroissement du fait du changement climatique).

1.10.2.3. Intégration du changement climatique

Pour l'année n, l'accroissement en surface terrière du sous-peuplement est égal à l'accroissement de référence pour l'âge considéré de l'essence, issu de la table des caractéristiques dendrométriques, moins le pourcentage de perte d'accroissement de l'essence à l'année n, tiré de l'état du monde considéré.

La croissance de l'essence en surface terrière étant modifiée, il faut vraisemblablement considérer une modification du coefficient de cubage : une perte de fertilité entraînera une diminution de la croissance en hauteur également, selon le calcul suivant.

$$FH_n = FH_{n-1} + (FH_n - FH_{n-1}) \times (100 - P_n)$$

Avec FH le coefficient de cubage, n l'année considérée, P la perte de productivité.

Il faut également considérer une diminution du diamètre moyen. Sachant que la surface terrière d'un arbre est égale à son diamètre divisé par deux puis monté au carré et multiplié par π , on a :

$$Dg_n = Dg_{n-1} + (Dg_n - Dg_{n-1}) \times \sqrt{(100 - P_n)}$$

En cas de mortalité de l'essence, le pourcentage de surface occupé par le sous-peuplement diminue chaque année du pourcentage de mortalité correspondant à l'année considérée.

1.10.2.4. Grille de prix des essences

Le choix de la grille de prix de vente sur pied (coût d'exploitation déjà déduit) de chaque essence (en €/m³) est une hypothèse très forte qui va grandement influencer les résultats économiques de l'étude. Les grilles de prix choisies sont en Annexes 5 et 6.

L'hypothèse faite est de prendre la grille des prix moyens actuels pour le hêtre et P1 pour tous les états du monde et pour toutes les années, d'après l'outil de suivi de vente de bois de l'ONF Grand-Est, en décomposant par catégorie de diamètre et non par qualité car cette variable n'est pas modélisée dans le traitement du peuplement, afin de correspondre au mieux à la ressource rencontrée en Grand-Est. On fait donc la supposition, qui peut être discutée, que le marché du bois n'évoluera pas pour ces deux essences.

Pour P2, qui prend comme modèle le chêne pubescent, le marché actuel correspond à du bois de chauffage issu de taillis. On peut supposer que tant que la présence du chêne sessile (P1) n'est pas remise en question dans le Grand-Est, c'est ce chêne qui sera utilisé en bois d'œuvre et le marché de P2 restera donc tel qu'il est actuellement. La grille élaborée pour les états du monde E1, E2 et E3 et donc proche de celle du hêtre. Mais si la ressource en essence P1 commence à diminuer du fait de la mortalité due au changement climatique, l'essence P2 va peut-être prendre sa place sur le marché du bois, la grille construite pour les états du monde E4 et E6 est donc identique à celle de l'essence P1.

1.10.2.5. Calcul et application de l'âge d'exploitabilité

En traitement régulier, les arbres d'un même peuplement ont à peu près tous le même âge. Il faut donc déterminer le moment où l'on désire couper le peuplement pour en installer un nouveau, et ce moment correspond à l'âge d'exploitabilité du peuplement, calculé selon sa valeur économique. En effet, on recherche l'instant où si l'on coupe les arbres avant cet âge, on perd un bénéfice potentiel car leur valeur peut encore augmenter et si l'on coupe après, la valeur des arbres diminue à cause de l'immobilisation du sol. On tient à la fois compte de la valeur selon le volume et le prix de vente mais aussi du fait que le sol a une vocation forestière et qu'on peut optimiser le bénéfice économique en enchaînant des cycles de longueur moindre afin d'en réaliser plus dans un même laps de temps. Ainsi, pour trouver l'âge d'exploitabilité, on raisonne à l'infini et on va donc utiliser le Bénéfice Actualisé en Séquence Infini (BASI).

En économie, lorsqu'on réalise un bénéfice au bout d'un temps n, il faut prendre en compte le fait que tout individu à un rapport plus ou moins fort à l'immédiateté des revenus. En effet, les individus et notamment les propriétaires forestiers accordent plus de valeur à un revenu intervenant dans dix qu'à un revenu intervenant dans

cent ans, et de même pour les dépenses. Il est donc nécessaire de tenir compte de cette immédiateté en actualisant les revenus et les dépenses au temps n, en le multipliant par un coefficient d'actualisation, de la manière suivante :

$$R(n) = \frac{R}{(1+r)^n}$$

Avec : R(n) le revenu actualisé de l'année n ; R le revenu réalisé à l'année n ; r le taux d'actualisation ; n l'année. La même formule s'applique aux dépenses. Comme il est au dénominateur, plus le taux d'actualisation augmente, plus il va minimiser les revenus et les dépenses, donc plus le propriétaire est « impatient » et accorde un coût à l'attente. Dans cette étude, ont été pris comme valeurs du taux d'actualisation 2, 3 et 4 %/

Pour trouver l'âge d'exploitabilité, on calcule pour chaque année du cycle sylvicole considéré et donc pour chaque âge du peuplement son Bénéfice Actualisé (BA), c'est-à-dire : la somme des dépenses actualisées des travaux sylvicoles effectués ; la somme des revenus actualisés des éclaircies effectuées jusqu'à maintenant, obtenus pour chaque éclaircie en multipliant le volume coupé par le prix au m³ de l'arbre moyen de la coupe, obtenu à l'aide du diamètre moyen de l'éclaircie ; la valeur de la coupe rase du peuplement pour cette année, obtenu en multipliant le volume du peuplement par le prix au m³ de l'arbre moyen, obtenu à l'aide du diamètre moyen de l'éclaircie. Pour simuler la multiplication des cycles à l'infini, il faut multiplier le BA par un coefficient fonction du taux d'actualisation (approximation de la somme des termes d'une série géométrique).

$$BASI(n) = BA(n) \times \frac{(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$$

Avec : n l'âge considéré ; BA(n) le bénéfice actualisé de l'année n ; r le taux d'actualisation.

L'âge d'exploitabilité est donc l'âge auquel le BASI est maximal. Pour simplifier les calculs, on considère que l'on coupe tout le peuplement à son âge d'exploitabilité, sachant que dans la réalité, cela se fait plutôt par plusieurs coupes successives en fin de cycle qui font descendre progressivement la surface terrière. Si on ne trouve pas d'âge d'exploitabilité (quand le BASI est toujours négatif par exemple et qu'il est « maximal » pour la dernière année simulée), on coupe le peuplement à un diamètre et un âge correspondant à du bois de chauffage (50 ans).

1.10.2.6. Renouvellement des peuplements et travaux sylvicoles

Une fois le peuplement coupé, les essences P1 et P2 devront forcément être introduites par plantation, et les peuplements dans les jeunes stades nécessitent d'intervenir pour doser le mélange d'essence et la qualité des tiges. Lorsque l'on plante uniquement P1 ou P2, on considère que la surface régénérée dans cette essence pourra atteindre 60 % du fait de la concurrence du Hêtre qui continuera d'occuper 40 % de la surface. Lorsque les deux essences sont plantées en mélange, le hêtre représente 40 % de la surface et P1 et P2 30% chacune. Les coûts des travaux envisagés dans ces itinéraires sont tirés des références itinéraires techniques (ITTS) de la DT de l'ONF Grand-Est (Tableau 4).

| Essence | Travail | Âges d'intervention | Coût |
|----------|-----------------------------|-------------------------------------|------|
| Hêtre | Cloisonnement | 4 ans (3 ans en mélange) | 60 |
| | Dégagement | 4 ans (3 ans en mélange) | 330 |
| | Entretien du cloisonnement | 7 et 11 ans (6 et 9 ans en mélange) | 60 |
| | Travaux à 15 ans | 15 ans (en moyenne) | 600 |
| P1 et P2 | Préparation | 1 an | 1000 |
| | Plantation | 1 an | 870 |
| | Engrillagement | 1 an | 4500 |
| | Dégagement | 3, 6 et 9 ans | 520 |
| | Cloisonnements et entretien | 6, 9 et 13 ans | 300 |
| | Travaux à 15 ans | 15 ans (en moyenne) | 1000 |

Tableau 4: Coûts des travaux sylvicoles

On considère que les coûts en travaux sont identiques pour P1 et P2 car ces deux essences nécessitent préparation du sol, plantation et protection, et que leur besoin en travaux de dégagement est le même car ces profils correspondent tous les deux à des essences de lumière nécessitant des interventions fortes et relativement fréquentes.

Les coûts de protection face au gibier (engrillagement) sont très élevés et risquent de plomber les itinéraires choisissant de remplacer le hêtre par ces essences ; cependant au vu de la situation actuelle en Grand-Est où l'équilibre sylvocynégétique n'est pas du tout respecté, on peut difficilement se passer de cette protection. Seront donc réalisés des calculs avec et sans engrillagement afin d'évaluer l'impact de tels coûts sur le choix d'itinéraire du gestionnaire.

1.10.3. Traitement pour les peuplements irréguliers

Les grilles de prix utilisées en fonction des classes de diamètre sont les mêmes pour les trois essences et pour les états du monde considéré en irrégulier ainsi qu'en régulier.

1.10.3.1. Taux de fonctionnement

En traitement irrégulier, l'objectif au sein du peuplement est d'obtenir un équilibre entre les classes de diamètre et donc les âges des arbres afin de récolter uniquement les Gros Bois arrivés à maturité, avec l'idée que les arbres des autres classes de diamètre les remplaceront une fois coupés. On ne peut donc pas appliquer un âge d'exploitabilité du peuplement comme pour le traitement régulier mais on doit raisonner à l'échelle de l'arbre, à l'aide du taux de fonctionnement qui cherche cette fois les conditions qui maximisent le BASI de l'arbre et non du peuplement, en termes de classe de diamètre, ce qui va donner le diamètre moyen des arbres coupés à chaque éclaircie, c'est-à-dire la condition de maturité des arbres.

Pour chaque classe de diamètre, on calcule la variation du prix avec le diamètre (terme noté A dans la suite) :

$$A = \frac{p(C_1) - p(C_0)}{p(C_1)} \times \frac{1}{D(C_1) - D(C_0)}$$

Avec C_1 une classe diamètre, C_0 la classe diamètre précédente, $p(C_n)$ le prix correspondant à la classe diamètre n , $D(C_n)$ le diamètre correspondant à la classe de diamètre n .

De même, on calcule la variation du prix avec le volume (terme noté B dans la suite) :

$$B = \frac{V(C_1) - V(C_0)}{V(C_1)} \times \frac{1}{D(C_1) - D(C_0)}$$

Avec $V(C_n)$ le volume correspondant à la classe de diamètre n .

Ainsi, on obtient le taux de fonctionnement T :

$$T = (A + B) \times \Delta D$$

Avec D la variation annuelle de diamètre (croissance annuelle).

Lorsque ce taux de fonctionnement est inférieur au taux d'actualisation choisi, l'augmentation en valeur de l'arbre si on le laisse sur pied ne compense pas le coût d'immobilisation du sol et on choisit donc de couper l'arbre dans la catégorie de diamètre précédente. On obtient ainsi le diamètre des éclaircies dans l'essence considérée lorsque le peuplement irrégulier est à l'équilibre.

1.10.3.2. Croissance des essences

La croissance individuelle des tiges en diamètre en traitement irrégulier ne dépend pas de leur âge, la croissance annuelle en diamètre utilisée pour le calcul du taux de fonctionnement a donc été fixée pour toutes les classes de diamètre, en fonction des connaissances générales sur le hêtre et le chêne sessile (P1) en futaie irrégulière et pour une bonne fertilité, et de manière plus arbitraire pour le chêne pubescent (P2) (Tableau 5).

| Essence | Hêtre | P1 | P2 |
|---------------------------------------|-------|-----|-----|
| Accroissement sur le diamètre (cm/an) | 0,8 | 0,6 | 0,3 |

Tableau 5: Accroissement en diamètre des essences

Cet accroissement est modifié par le changement climatique lorsque celui-ci affecte la productivité de l'essence, de la même manière que le diamètre moyen du peuplement est affecté en futaie régulière.

L'accroissement en surface terrière du peuplement a été approché en prenant l'accroissement moyen du cycle régulier permettant de produire des arbres au diamètre d'exploitabilité indiqué par le taux de fonctionnement.

1.10.3.3. Modélisation du peuplement et application des itinéraires sylvicoles

Le peuplement a été divisé en sous-peuplement, par essence, comme en régulier. Tous les 8 ans, qui est la durée de rotation, on effectue une éclaircie dont la valeur en surface terrière est l'accroissement du peuplement entre deux éclaircies. En prenant le diamètre d'exploitabilité comme représentant 80 % du diamètre moyen de l'éclaircie et les 20 % restants étant le diamètre d'un Bois Moyen (32,5 cm), on multiplie ensuite par le coefficient de cubage correspondant à la classe de diamètre obtenue et on obtient le volume éclairci ainsi que le prix de ces arbres, et ainsi le revenu généré par l'éclaircie. Les travaux sylvicoles ont lieu deux ans après l'éclaircie, à compter d'un quart d'heure de travail par année et par hectare pour le hêtre, et le double pour P1 et P2, avec un coût horaire moyen des ouvriers de 50 €/heure pratiqué par la DT Grand-Est de l'ONF.

A chaque éclaircie, on régénère 10 % de la surface. Si l'on souhaite installer une essence, il faut compter que l'on peut planter 60 % de cette surface à régénérer sous forme de placeaux au moment des travaux sylvicoles, deux ans après l'éclaircie, donc 6 % de la surface totale, le reste étant occupé par la régénération naturelle du hêtre. Le coût de plantation avec protection des collectifs s'élève à 750 €/ha (Sardin, 2008). Chaque sous-peuplement planté représentant 6 % de la surface totale évolue en traitement régulier jusqu'à ce que le sous-peuplement le plus ancien atteigne 80 ans, âge où certains arbres atteignent le stade Bois Moyen voire Gros Bois. On peut alors considérer que les différents sous-peuplements réguliers peuvent être rassemblés en un peuplement

irrégulier où les éclaircies se concentrent sur les Bois Moyens (Dg éclaircie = 32,5 cm), puis sur les Gros Bois à partir de 150 ans.

1.11. Méthode d'évaluation économique

1.11.1. Bénéfice Actualisé Grande Durée

En étudiant des états de transition entre les essences et avec de telles incertitudes sur le changement climatique, il paraissait difficile d'évaluer les résultats économiques des différents itinéraires avec le BASI. Il a donc été choisi de comparer les scénarios à l'aide du Bénéfice Actualisé Grande Durée (BAGD), qui est la somme des BA des cycles simulés jusqu'à 250 ans. La durée sur laquelle est calculée ce BAGD permet d'approcher acceptablement le BASI du fait de l'actualisation qui minimise l'impact des revenus et dépenses situés au-delà de 250 ans. Par exemple, pour l'itinéraire de référence avec engrillagement dans l'état du monde E1, où le BASI est simple à calculer, on estime que pour un taux d'actualisation de 2 %, le BAGD approxime le BASI à 99,94 % ; à 99,96 % pour 3 % ; et à 99,99 % pour 4 %.

1.11.2. Méthode d'analyse

Dans le cadre de l'étude, on a considéré qu'il y avait plusieurs états du monde possibles, mais on ne connaît pas les probabilités d'occurrence de chaque état car ils ont été construits a priori, on se situe donc en situation d'incertitude. Cependant, afin d'aller plus loin dans l'analyse que la simple comparaison des BAGD itinéraire par itinéraire, toute chose égale par ailleurs, quatre scénarios de probabilités d'occurrence des états du monde ont été élaborés.

| Scénario | Description | Calcul |
|----------|---|----------------------------|
| 1 | Changement climatique modéré avec surtout des pertes de productivité pour H et P1 | $0,2 E1 + 0,6 E2 + 0,2 E3$ |
| 2 | Changement climatique modéré avec pertes de productivité et apparition de mortalité pour H et P1 pour certaines conditions défavorables | $0,5 E2 + 0,3 E3 + 0,2 E6$ |
| 3 | Changement climatique plus important avec perte de productivité et importante mortalité pour H et P1 | $0,2 E2 + 0,3 E3 + 0,5 E6$ |
| 4 | Changement climatique catastrophique avec mortalité systématique pour H et P1 et perte de productivité pour P2 | $0,5 E4 + 0,5 E6$ |

Tableau 6: Scénario de probabilités des états du monde

2. Résultats

2.1. Peuplements réguliers de type 21 et 23

| 2% | Essence | E1 | E2 | E3 | E4 | E6 |
|--|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Itinéraire de référence | H (puis P1 puis P2) | 14490 | 11719 | 10718 | -5847 | -3818 |
| Changement première mise en régénération | P1 (puis P2) | 15394 | 12971 | 10844 | -5847 | -3818 |
| | P2 | 12383 | 8445 | 7614 | 1798 | 1087 |
| | P1+P2 (puis P2) | 13600 | 10997 | 9123 | -1989 | -1852 |
| Changement immédiat | P1 (puis P2) | 12114 | 8561 | 6726 | -5874 | -6299 |
| | P2 | -1340 | -2513 | -3074 | 3726 | 2286 |
| | P1+P2 (puis P2) | 5907 | 3780 | 1255 | -1182 | -1949 |
| 3% | Essence | E1 | E2 | E3 | E4 | E6 |
| Itinéraire de référence | H (puis P1 puis P2) | 9506 | 8330 | 7816 | -6249 | -3685 |
| Changement première mise en régénération | P1 (puis P2) | 9096 | 7888 | 7062 | -6249 | -3685 |
| | P2 | 8642 | 6670 | 6176 | -2353 | -966 |
| | P1+P2 (puis P2) | 8838 | 7305 | 5499 | -4307 | -1813 |
| Changement immédiat | P1 (puis P2) | 3610 | 2281 | 1426 | -7926 | -7386 |
| | P2 | -1807 | -2233 | -2501 | -2068 | -2657 |
| | P1+P2 (puis P2) | 1293 | 186 | -772 | -5078 | -4944 |
| 4% | Essence | E1 | E2 | E3 | E4 | E6 |
| Itinéraire de référence | H (puis P1 puis P2) | 6989 | 6395 | 6144 | -5293 | -2558 |
| Changement première mise en régénération | P1 (puis P2) | 6401 | 5245 | 4807 | -5293 | -2558 |
| | P2 | 6743 | 4446 | 4255 | -3026 | -844 |
| | P1+P2 (puis P2) | 6783 | 4844 | 4501 | -4116 | -1600 |
| Changement immédiat | P1 (puis P2) | 738 | 81 | -376 | -7568 | -6830 |
| | P2 | -1824 | -2008 | -2135 | -3760 | -3999 |
| | P1+P2 (puis P2) | -376 | -902 | -1358 | -5614 | -5367 |

Tableau 7: Tableau de résultats bruts pour un peuplement de type 21 et avec obligation d'engrillagement

| 2% | Essence | E1 | E2 | E3 | E4 | E6 |
|--|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Itinéraire de référence | H (puis P1 puis P2) | 14490 | 11719 | 10718 | -332 | 1177 |
| Changement première mise en régénération | P1 (puis P2) | 16306 | 14260 | 12105 | -332 | 1177 |
| | P2 | 12960 | 11516 | 9920 | 5667 | 3764 |
| | P1+P2 (puis P2) | 14833 | 12845 | 10609 | 2679 | 1623 |
| Changement immédiat | P1 (puis P2) | 15081 | 11516 | 9732 | 1266 | 343 |
| | P2 | 3951 | 2616 | 2255 | 8730 | 7212 |
| | P1+P2 (puis P2) | 10817 | 7971 | 4847 | 4887 | 3719 |
| 3% | Essence | E1 | E2 | E3 | E4 | E6 |
| Itinéraire de référence | H (puis P1 puis P2) | 9506 | 8330 | 7816 | -1963 | -427 |
| Changement première mise en régénération | P1 (puis P2) | 9951 | 8712 | 7852 | -1963 | -427 |
| | P2 | 8904 | 8354 | 7301 | 944 | 1008 |
| | P1+P2 (puis P2) | 9069 | 8287 | 6990 | -528 | 24 |
| Changement première mise en régénération | P1 (puis P2) | 6417 | 5071 | 4173 | -1607 | -1559 |
| | P2 | 2074 | 1161 | 1381 | 2725 | 2179 |
| | P1+P2 (puis P2) | 4636 | 3541 | 2315 | 481 | 342 |
| 4% | Essence | E1 | E2 | E3 | E4 | E6 |
| Itinéraire de référence | H (puis P1 puis P2) | 6989 | 6395 | 6134 | -1864 | -291 |
| Changement première mise en régénération | P1 (puis P2) | 6937 | 6280 | 5816 | -1864 | -291 |
| | P2 | 6835 | 5725 | 5475 | -314 | 543 |
| | P1+P2 (puis P2) | 6867 | 5995 | 5581 | -1085 | -19 |
| Changement immédiat | P1 (puis P2) | 3416 | 2741 | 2343 | -1826 | -1570 |
| | P2 | 1429 | 1251 | 1111 | 730 | 503 |
| | P1+P2 (puis P2) | 2584 | 2101 | 1625 | -559 | -501 |

Tableau 8: Tableau de résultats bruts pour un peuplement de type 21 et sans obligation d'engrillagement

| 2% | Essence | E1 | E2 | E3 | E4 | E6 |
|--|---------------------|-------|-------|-------|-------|------|
| Itinéraire de référence | H (puis P1 puis P2) | 17940 | 14635 | 13320 | -3184 | -701 |
| Changement première mise en régénération | P1 (puis P2) | 19803 | 17783 | 14404 | -3184 | -701 |
| | P2 | 12228 | 8269 | 7087 | 4116 | 3875 |
| | P1+P2 (puis P2) | 15830 | 13304 | 10549 | 1882 | 1007 |
| Changement immédiat | P1 (puis P2) | 19383 | 15830 | 13995 | 1395 | 970 |
| | P2 | 5929 | 4756 | 4275 | 10995 | 9555 |
| | P1+P2 (puis P2) | 13176 | 11049 | 8524 | 6087 | 5320 |
| 3% | Essence | E1 | E2 | E3 | E4 | E6 |
| Itinéraire de référence | H (puis P1 puis P2) | 14312 | 11192 | 10777 | -658 | -117 |
| Changement première mise en régénération | P1 (puis P2) | 10879 | 10057 | 6905 | -658 | -117 |
| | P2 | 5249 | 4845 | 4735 | 5201 | 4611 |
| | P1+P2 (puis P2) | 8562 | 7729 | 6510 | 2191 | 2324 |
| Changement immédiat | P1 (puis P2) | 10879 | 10057 | 6905 | -658 | -117 |
| | P2 | 5249 | 4845 | 4735 | 5201 | 4611 |
| | P1+P2 (puis P2) | 8562 | 7729 | 6510 | 2191 | 2324 |
| 4% | Essence | E1 | E2 | E3 | E4 | E6 |
| Itinéraire de référence | H (puis P1 puis P2) | 14105 | 10459 | 10310 | -299 | 438 |
| Changement première mise en régénération | P1 (puis P2) | 8007 | 7548 | 6905 | -299 | 438 |
| | P2 | 5314 | 5131 | 5128 | 3508 | 3270 |
| | P1+P2 (puis P2) | 6892 | 6472 | 5894 | 1655 | 1902 |
| Changement immédiat | P1 (puis P2) | 8007 | 7548 | 6905 | -299 | 438 |
| | P2 | 5314 | 5131 | 5128 | 3508 | 3270 |
| | P1+P2 (puis P2) | 6892 | 6472 | 5894 | 1655 | 1902 |

Tableau 9: Tableau de résultats bruts pour un peuplement de type 23 et avec obligation d'engrillagement

| 2% | Essence | E1 | E2 | E3 | E4 | E6 |
|-------------------------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Itinéraire de référence | H (puis P1 puis P2) | 17940 | 14635 | 13320 | 1986 | 3965 |
| Changement première mise régé | P1 (puis P2) | 21455 | 20154 | 16814 | 1986 | 3965 |
| | P2 | 15414 | 10909 | 10518 | 7985 | 6553 |
| | P1+P2 (puis P2) | 19201 | 16652 | 13492 | 4997 | 4411 |
| Changement immédiat | P1 (puis P2) | 22350 | 18785 | 17000 | 8535 | 7612 |
| | P2 | 11220 | 9071 | 9524 | 15999 | 14481 |
| | P1+P2 (puis P2) | 17378 | 15237 | 12116 | 12156 | 10988 |
| 3% | Essence | E1 | E2 | E3 | E4 | E6 |
| Itinéraire de référence | H (puis P1 puis P2) | 14312 | 11192 | 10777 | 5662 | 5709 |
| Changement première mise régé | P1 (puis P2) | 13686 | 12842 | 11503 | 5662 | 5709 |
| | P2 | 9337 | 8907 | 8994 | 9994 | 9448 |
| | P1+P2 (puis P2) | 11905 | 11044 | 9697 | 7749 | 7611 |
| Changement immédiat | P1 (puis P2) | 13686 | 12842 | 11503 | 5662 | 5709 |
| | P2 | 9337 | 8907 | 8994 | 9994 | 9448 |
| | P1+P2 (puis P2) | 11905 | 11044 | 9697 | 7749 | 7611 |
| 4% | Essence | E1 | E2 | E3 | E4 | E6 |
| Itinéraire de référence | H (puis P1 puis P2) | 14105 | 10459 | 10310 | 5443 | 5699 |
| Changement première mise régé | P1 (puis P2) | 10685 | 10207 | 9625 | 5443 | 5699 |
| | P2 | 8697 | 8496 | 8724 | 7999 | 7772 |
| | P1+P2 (puis P2) | 9866 | 9436 | 8790 | 6709 | 6768 |
| Changement immédiat | P1 (puis P2) | 10685 | 10207 | 9625 | 5443 | 5699 |
| | P2 | 8697 | 8496 | 8724 | 7999 | 7772 |
| | P1+P2 (puis P2) | 9866 | 9436 | 8790 | 6709 | 6768 |

Tableau 10: Tableau de résultats bruts pour un peuplement de type 21 et sans obligation d'engrillagement

Globalement, lorsque le taux d'actualisation augmente, le BAGD diminue, ce qui va dans la logique de l'actualisation qui valorise les revenus arrivants plus tôt dans le temps. Cependant, quelques exceptions ressortent des résultats obtenus. Il semble que dans les états du monde E2 et E3, les BAGDS sont supérieurs mais restent déficitaires pour 3 puis 4 % d'actualisation pour un scénario où on remplace immédiatement le hêtre par l'essence P2 avec engrillagement.

En effet, certains cycles situés plus tard sont négatifs, car les revenus ne compensent plus les coûts engagés, mais leur impact sur le BAGD est amoindri par l'actualisation plus forte (un déficit arrivant tard est moins pénalisant). C'est la même remarque pour le scénario de référence avec engrillagement pour 3 et 4 % pour E4 et E6, l'actualisation plus forte donne moins d'importance à des pertes apparaissant au même moment dans les cycles (disparition brutale du hêtre en 2050 et de P1 en 2060). De manière générale, avec engrillagement et pour des états du monde très pessimistes, le BAGD est supérieur pour des taux d'actualisations supérieurs car on donne moins de valeur aux pertes lointaines. Sans engrillagement, on n'observe pas le même phénomène car les cycles futurs sont globalement rentables du fait des coûts de mise en place plus proche de 2020 des essences P1 et P2 amoindris.

Une autre remarque que l'on peut faire est que l'essence P1 semble plus rentable que le hêtre à la première mise en régénération dans les états du monde E1, E2 et E3 pour un taux d'actualisation de 2 %, mais que ce constat n'est plus vrai à partir de 3%. Cette tendance est induite par la grille de prix de P1 qui est beaucoup plus avantageuse que celle du hêtre à l'instar de ce que l'on observe sur le marché français aujourd'hui, mais qui nécessite pour être récolté que le propriétaire soit patient, expliquant que le bénéfice de P1 par rapport au hêtre ne se constate que pour le taux à 2%. Cela explique également la tendance des propriétaires à privilégier le chêne au hêtre.

Ce constat (bénéfice de P1 par rapport au hêtre) n'est pas non plus valable dans une logique de changement immédiat. Au taux de 2 %, pour les états du monde optimiste, il est donc préférable d'attendre d'avoir récolté le hêtre avant d'installer P1

Une autre observation est que l'état du monde E6, pour un scénario de référence, quels que soient les autres paramètres, a un BAGD supérieur à celui de l'état du monde E4. En effet, l'état du monde E6 n'est pas un état « plus grave », c'est un chemin différent vers la disparition des essences hêtre et P1 : on a le temps de faire des éclaircies rentables avant que le peuplement disparaisse brutalement, alors qu'en E4 la mortalité apparaît dès 2020 et a le temps de dégrader nettement le peuplement avant que le gestionnaire ne réagisse. De plus les coûts engagés pour installer P1 apparaissent en 2033 alors qu'en E6 ils apparaissent vers 2050, ce qui diminue leur effet avec l'actualisation. Lorsqu'on change immédiatement avec l'essence P2, c'est l'état du monde E4 qui donne la meilleure BAGD car la perte de production de P2 est plus importante pour E6 que pour E4.

Pour le peuplement de type 23, les taux d'actualisation 3% et 4% donnent un âge d'exploitabilité du premier cycle (hêtre pur) à 79 ans. Pour ces taux, attendre la fin du cycle ou couper immédiatement revient donc au même. Pour le type 21, en revanche, couper immédiatement génère plus de pertes.

| Itinéraire retenu | E1 | E2 | E3 | E4 | E6 |
|--------------------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| 2% | P1 | P1 | RéfH ou P1 | ImP2 | ImP2 |
| 3% | RéfH | RéfH | RéfH | ImP2 | P2 |
| 4% | Réf H | RéfH | RéfH | P2 | P2 |

Tableau 11: Scénarios maximisant le BAGD ; point de départ de type 21 ; avec engrillagement

Pour un peuplement de type 21 avec obligation de protéger les essences plantées, dès qu'on passe à un taux d'actualisation plus élevé, il vaut mieux continuer avec du hêtre dans des états du monde qui ne touchent qu'à la productivité du peuplement. Cependant, à un taux d'actualisation de 2%, il serait intéressant même sans changement climatique de passer à P1, ce qui s'explique par la grille de prix de l'essence). Dans les états du monde pessimistes, il vaut mieux passer immédiatement à P2. Pour un taux d'actualisation de 4%, les dépenses sont plus tôt dans le cycle si on change immédiatement plutôt que si on attend que le hêtre soit en danger, ce qui privilégie la deuxième option.

Quels que soient les états du monde, il vaut mieux changer d'essence. Pour les états du monde E1 et E2, il vaut mieux attendre la première mise en régénération, tandis que pour E4 et E6, il faut changer tout de suite pour l'essence P2. En E3, il revient à peu près au même de continuer en hêtre ou de changer d'essence pour P1 ou P1 et P2 à la première mise en régénération.

Pour le type 23, il vaut mieux passer à P1 pour E1 ou E2 à la première mise en régénération ou tout de suite, contrairement au type 21 où c'est à pertes. Pour E4 et E6, il vaut mieux changer tout de suite pour P2 avec la même remarque que ce serait à pertes pour le type 21.

L'effet du mélange P1 et P2 est peu marqué mais l'étude ne prend pas en compte l'incertitude qu'a le gestionnaire sur le comportement qu'auront les essences au moment où il les sélectionne.

| Itinéraire retenu | E1 | E2 | E3 | E4 | E6 |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 2% | P1 | P1 | P1 | P2 | P2 |
| 3% | P1 | P1 | P1 ou Réf | ImP2 | ImP2 |
| 4% | Réf | Réf | Réf | ImP2 | P2 |

Tableau 12: Scénarios maximisant le BAGD ; point de départ de type 21 ; sans engrillagement

Sans engrillagement, pour 2 ou 3%, il est rentable et même plus avantageux de changer pour P1 à la fin de la rotation, ce qui paraît logique et cohérent avec la grille de prix de P1 ainsi que ses coûts d'installation (ici réduits).

A noter que le bénéfice qu'on peut espérer en E4 en changeant tout de suite pour P2 sans grillage (type 23 et 2 %) est voisin du bénéfice de l'itinéraire de référence. Il ne faut donc pas baisser les bras et considérer les changements climatiques comme une fatalité irrémédiable. Même en situation très contrainte climatiquement mais à condition de réduire la population de gibier et de faire preuve d'un peu de patience (taux à 2%) on peut retrouver une balance économique proche de l'itinéraire de référence.

| Itinéraire retenu | E1 | E2 | E3 | E4 | E6 |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 2% | P1 | P1 | P1 | ImP2 | ImP2 |
| 3% | Réf | Réf | Réf | P2/ImP2 | P2/ImP2 |
| 4% | Réf | Réf | Réf | P2/ImP2 | P2/ImP2 |

Tableau 13: Scénarios maximisant le BAGD ; point de départ de type 23 ; avec engrillagement

| Itinéraire retenu | E1 | E2 | E3 | E4 | E6 |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 2% | P1 | P1 | P1 | P2 | P2 |
| 3% | Réf | P1 | P1 | P2/ImP2 | P2/ImP2 |
| 4% | Réf | Réf | Réf | P2/ImP2 | P2/ImP2 |

Tableau 14: Scénario maximisant le BAGD ; point de départ de type 23 ; sans engrillagement

Ce qui est observé ici pour les peuplements de type régulier est cohérent avec les profils d'essence : l'essence P2 est la seule adaptée à E4 et E6 et la grille de prix ainsi que les coûts d'installation de P1 sont adaptés aux taux d'actualisation faibles. Globalement, il existe pour tout état du monde un itinéraire qui permet de rester bénéficiaire, ce qui est rassurant du point de vue du gestionnaire.

| Itinéraire retenu | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 | Scénario 4 |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|
| 2% | P1 | P1 | P2 | ImP2 |
| 3% | Réf | P1 ou P2 | P2 | P2 |
| 4% | Réf | Réf | P2 | P2 |

Tableau 15: Itinéraire retenu selon les scénarios de probabilités des états du monde pour un point de départ de type 21 avec engrillagement

| Itinéraire retenu | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 | Scénario 4 |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|
| 2% | P1 | P1 | P2 | ImP2 |
| 3% | P1 | P1 ou P2 | P2 | ImP2 |
| 4% | Réf | Réf | P2 | P2 |

Tableau 16: Itinéraire retenu selon les scénarios de probabilité des états du monde pour un point de départ de type 21 sans engrillagement

| Itinéraire retenu | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 | Scénario 4 |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|
| 2% | P1 | P1 | ImP1 | ImP2 |
| 3% | Réf | Réf | Réf | P2/ImP2 |
| 4% | Réf | Réf | Réf | P2/ImP2 |

Tableau 17: Itinéraire retenu selon les scénarios de probabilité des états du monde pour un point de départ de type 23 avec engrillagement

| Itinéraire retenu | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 | Scénario 4 |
|-------------------|------------|------------|-------------------------|------------|
| 2% | P1 ou ImP1 | P1 ou ImP1 | ImP1 ou ImP1/P2 ou ImP2 | ImP2 |
| 3% | P1/ImP1 | P1/ImP1 | P2/ImP2 | P2/ImP2 |
| 4% | Réf | Réf | P2/ImP2 | P2/ImP2 |

Tableau 18 : Itinéraire retenu selon les scénarios de probabilités des états du monde pour un point de départ de type 23 sans engrillagement

Pour les peuplements de type 21 et 23, si l'on pense que le changement climatique sera relativement modéré (Scénario 1), il est plus intéressant d'attendre la fin du cycle de hêtre en cours avant d'effectuer un changement pour P1 ou non. Selon l'impatience du propriétaire et le coût de P1, on recommande de changer pour P1 à la première mise en régénération ou de rester sur le hêtre. Si on craint une apparition de mortalité avec faible probabilité (Scénario 2), les recommandations sont globalement les mêmes que pour le Scénario 1, avec la possibilité d'implanter P2 à la fin du cycle de hêtre. C'est d'ailleurs ce qui est recommandé lorsque l'on passe au Scénario 3, car la mortalité y est beaucoup plus importante, puis au Scénario 4 où le plus intéressant est de passer directement à cette essence sans attendre la fin du cycle (sauf à 4 %).

2.2. Peuplement irrégulier de type 53

| | | | | | |
|-------------------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| 2% | Essence | E1 | E2 | E3 | E6 |
| Itinéraire de référence | H (puis P1 puis P2) | 22657 | 18106 | 16042 | 4900 |
| Changement immédiat | P1 (puis P2) | 20147 | 14773 | 11215 | -3380 |
| | P2 | 11802 | 10426 | 9160 | 6607 |
| 3% | Essence | E1 | E2 | E3 | E6 |
| Itinéraire de référence | H (puis P1 puis P2) | 16443 | 13753 | 12422 | 4506 |
| Changement immédiat | P1 (puis P2) | 12340 | 9890 | 8373 | -3952 |
| | P2 | 9111 | 8706 | 7814 | 5685 |
| 4% | Essence | E1 | E2 | E3 | E6 |
| Itinéraire de référence | H (puis P1 puis P2) | 10210 | 8928 | 8272 | 3077 |
| Changement immédiat | P1 (puis P2) | 7131 | 5965 | 5308 | -3297 |
| | P2 | 5446 | 5597 | 5135 | 3928 |

Tableau 19: Tableau de résultats bruts pour un peuplement de type 53

En traitement irrégulier, dans tous les cas, le BAGD décroît lorsque le taux d'actualisation augmente. Pour tous les états du monde, il est inférieur lorsqu'on change le hêtre pour P1 et encore moindre lorsqu'on change le hêtre pour P2. Lorsque l'état du monde implique la disparition de ces deux essences, c'est le changement pour l'essence P2 qui maximise le BASI. Ces résultats correspondent bien aux hypothèses de construction des états du monde et des profils d'essence.

| Itinéraire retenu | E1 | E2 | E3 | E6 |
|-------------------|-----|-----|-----|----|
| 2% | Réf | Réf | Réf | P2 |
| 3% | Réf | Réf | Réf | P2 |
| 4% | Réf | Réf | Réf | P2 |

Tableau 11: Scénario maximisant le BAGD ; point de départ de type 53

Pour les trois scénarios de probabilités des états du monde que l'on peut étudier pour le traitement irrégulier (Scénarios 1, 2 et 3), le scénario de référence est à conseiller. Cela s'explique par les coûts de plantation de P1 et P2 qui sont élevés et par le fait que l'on ne peut pas appliquer l'analyse très pessimiste du Scénario 4 au type 53 car l'état du monde E4 n'a pas été étudié par manque de temps. On peut cependant supposer que le changement pour P2 sera conseillé dans le cadre d'un changement climatique brutal et incluant une mortalité importante dans les peuplements de hêtre et ensuite pour l'essence P1.

En irrégulier, il faut donc rester sur le hêtre à moins qu'on redoute un changement climatique violent, auquel cas il faudra se tourner vers le remplacement du hêtre par P2, donc une essence à moindre productivité mais forte résistance.

2.3. Conclusions générales

Le scénario de référence avec le hêtre est globalement plus recommandé pour des taux d'actualisation de 3 et 4%, tandis qu'à 2% il ne faut jamais retenir le hêtre et plutôt choisir P1 si les changements climatiques sont modérés et P2 si les changements sont importants. Dans tous les cas, il faut mettre en place P2 quand on pressent un changement climatique brutal, sinon cela paraît peu intéressant. L'essence P1 est intéressante si ses coûts de mise en place ne sont pas trop élevés.

Lorsque le BAGD d'un cycle est négatif, cela signifie qu'il n'est pas rentable et qu'on ne devrait pas mettre en place la stratégie. Cette absence de rentabilité s'explique par les coûts de mise en place et de protection des essences, ainsi que la production moindre de P2 et sa grille de prix faibles dans les états du monde E1, E2 et E3.

Cependant, les gestionnaires n'auront parfois pas le choix du changement d'essence face aux variations du climat et devront revoir leurs exigences de productivité des peuplements ainsi que leur « impatience » (correspondant au taux d'actualisation). Ils devront peut-être même se résigner à conserver des forêts pour remplir les autres fonctions que celle de production.

3. Discussion

3.1. Limites

De nombreuses incertitudes viennent limiter la validité des résultats de cette étude.

3.1.1. Evolution du climat et effet sur les peuplements forestiers

Ainsi, les évolutions futures du climat sont difficiles à anticiper avec précision et aucune certitude n'existe sur la vitesse et l'intensité du changement climatique. La variété des situations et des contextes envisagés a cependant permis de couvrir une certaine diversité de situations et donc de réduire cette incertitude concernant le contexte climatique prévisible.

En termes de pertes d'accroissements, les valeurs absolues utilisées sont bien sûr discutables mais les proportions et la cohérence appliquées entre les états du monde permettent néanmoins de hiérarchiser les situations étudiées, en complément de la multiplicité des scénarios étudiés. L'évolution linéaire des réaction des essences au changement climatique est également un choix arbitraire discutable destiné à simplifier l'étude.

Il a été choisi au cours de l'étude par simplification de ne pas étudier l'effet du ravageur sur le hêtre afin de ne pas multiplier les états du monde par introduction d'évènements brutaux et car les calculs économiques en seraient complexifiés, or cette essence ressemble à l'épicéa sur la sensibilité aux ravageurs. Elle a pour l'instant été relativement épargnée mais les craintes sont nombreuses et importantes sur l'évolution des pathogènes dans le futur, la question se pose donc de la pertinence d'avoir écarté cette hypothèse.

3.1.2. Réalisme, pertinence et cohérence de la modélisation

L'utilisation d'Excel comme outil de modélisation fait perdre grandement en précision et oblige à prendre des décisions tranchées et à faire beaucoup d'hypothèses sur la modélisation des peuplements, de la croissance des essences, de l'effet des éclaircies sur les dynamiques des peuplements ou encore de la facilité de régénération. La volonté d'intégrer de nombreux facteurs dans l'étude a empêché l'utilisation de modèle.

Les hypothèses de modélisation de la croissance et des réactions du peuplement à la sylviculture ont été volontairement simplifiés, cependant cela peut amener à remettre en cause le réalisme de l'étude et sa mise en place opérationnelle. Ainsi, le profil P2 est clairement optimiste par rapport aux réalités observés sur le chêne pubescent par rapport au chêne sessile car les données dendrométriques sont issues de calculs et d'approximations faites à partir d'un guide plutôt orienté sur le traitement en taillis de cette essence et du profil du chêne sessile. On a donc probablement surestimé la dynamique de croissance de cette essence malgré les précautions.

Les hypothèses de réussite des itinéraires introduisant une nouvelle essence dans une hêtraie pure sont des hypothèses fortes : en effet la dynamique de renouvellement du hêtre étant très importante, la compétition avec les autres essences est souvent très largement en sa faveur, multipliant ainsi les coûts en travaux pour l'installation de P1 et P2 par plantation et limitant la possibilité de régénération naturelle de ces essences dans les proportions envisagées dans cette étude. Il est possible que les itinéraires techniques théoriques envisagés dans cette étude soient très difficiles voire impossibles à mettre en place selon le contexte de dynamisme du hêtre en renouvellement.

Dans les itinéraires considérés, changer immédiatement l'essence en place sans engrillagement ne paraît pas très réaliste au vu de la situation en termes de pression du gibier sur le renouvellement des peuplements en Grand-Est. En effet, aujourd'hui, sans protection, la régénération naturelle ou la réussite de plantation. Il a été choisi de ne pas rajouter d'hypothèses sur cet impact de la faune sauvage sur la régénération, mais cela joue forcément sur les coûts et l'intérêt des changements d'essence.

Il est enfin peu probable que la composition en essence et en diamètres des éclaircies réalisées corresponde exactement à la composition du peuplement sur pied, ainsi que cela a été considéré dans l'étude par simplification.

3.1.3. Aspects économiques

Les marchés des essences ont été considérés comme relativement constants, sauf pour l'essence P2, or il est très probable qu'ils évoluent sans qu'on sache vraiment de quelle manière. Il peut y avoir une évolution positive due à la raréfaction de la ressource et à la demande en augmentation pour remplacer d'autres matériaux de construction ou d'autres sources d'énergie, mais il est aussi possible que les marchés s'effondrent à cause des évènements climatiques. De plus, cette évolution ne serait pas forcément linéaire entre bois d'œuvre, bois d'industrie et bois énergie. Un certain nombre d'hypothèses sont donc possibles pour creuser cette problématique.

Celle qui est envisagée ici considère que la grille de prix de P2 sera exactement celle de P1 en cas de changement climatique fort or c'est assez optimiste car les débouchés du chêne pubescent sont peu nombreux à ce jour et ses caractéristiques technologiques ne sont pas forcément identiques à celles du chêne sessile. De plus, cette hypothèse a forcément influencé les résultats car elle donne un poids économique direct fort au remplacement du hêtre par P2 ; l'essence étant plus résistante au changement climatique que P1, avec toutefois un accroissement moindre, mais tout aussi intéressante économiquement d'après les données choisies, il est logique que les scénarios remplaçant le hêtre par P2 soient plus intéressants sur le plan économique.

Il est difficile d'intégrer la notion d'actualisation des connaissances dans les calculs économiques. Cela pourrait se traduire par un traitement irrégulier où le propriétaire choisit toujours l'essence adaptée à l'évolution du climat car se tenant au courant des avancées en ce sens, donnant ainsi des itinéraires dépendant des états du monde. Ce point de vue privilégierait très certainement l'irrégulier.

Enfin, cette étude ne s'intéresse qu'à l'aspect économique de la forêt, basé sur la production de bois, et ne prend pas en compte la multifonctionnalité qui a une place importante dans sa gestion et influence donc les décisions des propriétaires et gestionnaires, ainsi que sa valeur patrimoniale qui implique de la conserver même lorsque les résultats économiques ne correspondent pas aux attentes des propriétaires. L'analyse des pertes ou gains de valeur écologique (liée par exemple à la présence de Très Gros Bois, de diamètre supérieur à 67,5 cm), pour lesquels le hêtre joue un rôle important, a été mise de côté, ainsi que la prise en compte des aménités qui peuvent être chiffrées, même si pour l'instant aucune perspective de rémunération de celles-ci n'existent en forêt publique française.

3.2. Perspectives

3.2.1. Perspectives opérationnelles

Plusieurs perspectives opérationnelles dans le cadre de la gestion des forêts publiques françaises ressortent de cette étude.

Le premier point important est qu'il va falloir revoir les références de productivité des peuplements dans le cadre du changement climatique qui se profile d'ici 2100. En effet, résistance au changement climatique et vitesse de croissance étant des traits antagonistes, le choix d'essences résistantes se fera au détriment des objectifs de productivité des peuplements. Cela peut se traduire par un allongement des cycles pour récolter les tiges aux diamètres objectifs actuels ou une diminution du diamètre objectif des tiges.

Il faudra donc prendre en compte, et cela peut-être financièrement, la multifonctionnalité de la forêt afin d'assurer la possibilité de continuer la gestion forestière sur le plan économique, par la prise en compte des aménités notamment.

Ces observations amènent à l'idée qu'il faut sans doute considérer la résilience de l'habitat forestier comme un objectif à part entière, en dehors de la fonction de production des forêts françaises, et que les choix d'essences peuvent d'ores et déjà s'orienter dans ce sens.

De manière globale, la place des essences présentes actuellement en forêt française est remise en question.

3.2.2. Perspectives de développement de l'étude

Des perspectives de développement de cette étude sont ainsi envisageables, à commencer par l'intégration d'hypothèses sur les autres impacts du changement climatique sur le hêtre, comme les incendies, les tempêtes, les ravageurs, etc. Il est possible également d'étudier d'autres essences très sensibles à la sécheresse et aux variations du climat, comme le sapin pectiné (*Abies alba*) ou l'épicéa (*Picea abies*), qui ont déjà démontré leur fragilité ces dernières années. Il aurait été possible d'explorer un autre type de profil pour l'essence P1 en sortant du modèle feuillu avec le chêne sessile qui a une croissance moyenne et en étudiant par exemple un profil calqué sur le pin noir possédant une croissance plus rapide avec des prix stabilisés rapidement et donc demandant des cycles moins longs.

D'autres « vitesses » de changement d'essence sont à explorer dans les itinéraires : on pourrait notamment étudier des scénarios d'irrégularisation des peuplements réguliers ou de renouvellement régulier allongé tel qu'il est beaucoup pratiqué en Alsace afin d'allonger la récolte des bois et garder un couvert plus longtemps en installant la nouvelle essence.

Il est également nécessaire de creuser les résultats obtenus en analysant le poids de chaque paramètre. Fixer tous les paramètres en n'en faisant varier qu'un seul et en multipliant les scénarios permettrait ainsi d'identifier les plus influents sur les résultats économiques et donc de pondérer l'effet du changement climatique et de la stratégie sylvicole considérée

L'amélioration de la modélisation des conditions climatiques futures et de la modélisation des peuplements forestiers en fonction de ces évolutions est déjà en cours de travail, par exemple sur le modèle Samsara, objet d'un autre stage. Ces perspectives permettront des études plus précises et des hypothèses plus réalistes sur les gains et pertes économiques dans les peuplements soumis au changement climatique.

Enfin, la prise en compte de la multifonctionnalité des forêts semble être une des perspectives majeures de cette étude, qui s'est contenté d'en étudier l'aspect économique. En effet les évolutions du climat entraîneront très certainement des réductions des bénéfices liés à la production de bois et les gestionnaires et propriétaires devront revoir à la baisse leurs objectifs économiques. Or les aménités seront d'autant plus importantes que les conditions environnementales seront contraignantes, et l'enjeu biodiversité ainsi que la valeur patrimoniale des forêts ne sont pas à négliger. Ces aspects devront donc être étudiés afin de produire des recommandations aux gestionnaires tenant compte de tous les enjeux des forêts françaises.

Conclusion

En conclusion, face aux incertitudes du changement climatique, il est difficile de désigner une ou des stratégies claires de renouvellement des peuplements face au changement climatique, et le choix de celles-ci dépend de l'avis du gestionnaire ou du propriétaire sur les évolutions futures des variables climatiques et des risques qui y sont liés. De manière générale, si l'on pressent une évolution telle que le hêtre ne serait plus adapté dans le contexte du Grand-Est, il faut envisager de changer d'essence à la fin du cycle en cours et en se tournant vers une essence très résistante. Ce temps d'attente que représente la fin du cycle lorsqu'on se situe dans un type 21 par exemple peut permettre de préciser les futures évolutions climatiques.

De manière générale, il ressort de cette étude qu'il ne faudra pas miser sur une seule mais sur plusieurs stratégies d'adaptation des peuplements si l'on veut minimiser les risques liés aux incertitudes du changement climatique. Ainsi, les dépérissements observés aujourd'hui sur les peuplements de hêtre peuvent être l'occasion de replanter à l'aide d'essences a priori très résistantes à la sécheresse afin d'anticiper une aggravation des contraintes hydriques déjà limitantes pour certaines essences. Il ne faut pas non plus se limiter à la stratégie courante qui encouragerait à planter des essences productives sur des stations riches, mais envisager la possibilité que ces stations riches ne deviennent à l'avenir plus favorables à ces essences, et donc planter des essences considérées comme peu productives dans des contextes où elles ne sont pour l'instant pas recommandées.

Les conclusions de ce stage amènent à valider et encourager la mise en place de « tests » en forêt, dans tous les contextes stationnels, sous la forme par exemple d'îlots d'avenir, mais aussi en élargissant l'échelle d'étude afin d'amener les conclusions à un niveau de gestion concrète, celui de la parcelle par exemple. Il paraît de plus évident que la connaissance des stations et de l'évolution des conditions stationnelles sera un atout majeur pour le futur, tout en gardant à l'esprit que les stations déjà limitantes ne seront peut-être pas celles où les conséquences du changement climatique seront les plus importantes.

L'amélioration de la modélisation de ces changements sera certainement une grande avancée dans la désignation des itinéraires favorables. En effet, cette étude a tenté d'élaborer des scénarios probables basés sur des hypothèses, ce qui a forcément orienté les résultats obtenus. Si la multiplication des scénarios est un avantage pour explorer plusieurs possibilités, il est en revanche difficile de hiérarchiser ces scénarios et donc de tirer des conclusions claires sur les stratégies à appliquer face au changement climatique. Des modèles plus fiables et certains permettraient ainsi de préciser les scénarios de probabilisation des états du monde voire les états du monde en eux-mêmes afin de donner au gestionnaire des clés plus évidentes pour l'orientation du renouvellement des peuplements actuels.

Références bibliographiques

- Abt D., 2015. Le renouvellement des peuplements réguliers.
- Asael S., 1999. Typologie des peuplements forestiers du massif vosgien.
- Badeau V., 2012. Regards croisés sur l'avenir des forêts françaises face au changement climatique. *Symbiose* n°4.
- Badeau V., Dupouey J.-L., Cluzeau C., Drapier J., 2005. Aires potentielles de répartition des essences forestières d'ici 2100. *Rendez-vous techniques de l'ONF, Hors-série n°3*, p.62-66.
- Bastien Y., Aussenac G., Frochot H., 2000. Les changements climatiques : conséquences pour la sylviculture. *Revue Forestière Française* (52), p.129-138.
- Bock J., Boisteaux R., Fabbri B., Kiefer E., Seynave I., Vautier F., Vinkler I., 2005. Le hêtre en Lorraine – Guide des sylvicultures. Office National des Forêts, 88p.
- Bréda, N., Brunette, M., 2019. Are 40 years better than 55? An analysis of the reduction of forest rotation to cope with drought events in a Douglas fir stand. *Annals of Forest Science* **76**, 29.
- Brèteau-Amorès S., Brunette M., Davi H., 2019. An economic comparison of adaptation strategies towards a drought-induced risk of forest decline. *Ecological Economics* n°164, 15p.
- Charru M., Seynave I., Hervé J.-C., Bertrand R., Bontemps J.-D., 2017. Recent growth changes in Western European forests are driven by climate warming and structured across tree species climatic habitats. *Annals of Forest Science* n°74, 34p.
- Cheab A., Badeau V., Boe J., Chuine I., Delire C., Dufrêne E., François C., Gritti E., Legay M., Pagé C., Thuiller W., Viovy N., Leadley P., 2012. Climate change impacts on tree ranges : model intercomparison facilitates understanding and quantification of uncertainty. *Ecology Letters* n°15, p.533-544.
- Corvol A., 2012. Changement climatique et modification forestière.
- Fortin M., Manso R., 2016. Le simulateur Mathilde dans CAPSIS.
- Grégoire J.-C., 2010. Résistance et résilience des peuplements mélangés vis-à-vis des stress (a)biotiques. *Forêt Wallonne* (106).
- Grossiord C., Gessler A., Granier A., Bonal D., 2015. Les forêts tempérées face aux conséquences du changement climatique : est-il primordial de favoriser une plus forte diversité d'arbres dans les peuplements forestiers ? *Revue Forestière Française* (67), p.99-110.
- Jactel H., Borckerhoff E., Piou D., 2008. Le risque sanitaire dans les forêts mélangées. *Revue Forestière Française* n°40, p.168-180.
- Kolström M., 2011. *Climate Change Impacts and Adaptation in European Forests*.
- Landmann G., Dupouey J.-L., Badeau V., Lefèvre Y., Bréda N., Nageleisen L.-M., Chuine I., Lebourgeois F., 2007. Le hêtre face au changement climatique. *Rendez-vous techniques de l'ONF, Hors-série n°2*, p.29-38.
- Latte N., Lebourgeois F., Kint V., Drouet T., Claessens H., 2017. Le hêtre face au changement climatique : le cas de la Belgique. *Revue Forestière Française* n°69, p.205-218.
- Lebourgeois F., 2005. Approche dendroécologique de la sensibilité du hêtre (*Fagus sylvatica* L.) au climat en France et en Europe. *Revue Forestière Française* n°57, p.33-50.
- Lebourgeois F., Bréda N., Ulrich E., Granier A., 2005. Climate-tree-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR). *Trees* n°19, p.385-401.
- Lebourgeois F., Mérian P., 2011. La sensibilité au climat des arbres forestiers a-t-elle changé au cours du XXe siècle ? *Revue Forestière Française* n°63, p.17-32.
- Lebourgeois F., Charry M., Dhôte J.-F., Bontemps J.-D., 2020. La croissance des forêts et les changements environnementaux. *Sciences Eaux et territoires* n°33, p.8-11.
- Lefèvre F., Le Bouler H., Roman-Amat B., 2011. Changement climatique attendu et biodiversité en forêt. *Revue Forestière Française* (63), p.559-570.
- Legay M., Mortier F., 2006. La forêt face au changement climatique : adapter la gestion forestière. Synthèse de l'atelier ONF/INRA du 20 octobre 2005.
- Marçais B., 2018. Interactions entre changement climatique et agents pathogènes. *Revue Forestière Française* (70), p.645-652.
- Météo France. Actualités sur la météo et le climat, dossiers, infographies, vidéos [en ligne]. Disponible sur : <http://www.meteofrance.fr/>. Consulté le 3 mars 2020.

- Météo France. Drias, les futurs du climat [en ligne]. Disponible sur : <http://www.drias-climat.fr/>. Consulté le 4 mars 2020.
- Persuy A., 2005. Face au réchauffement climatique, faudra-t-il réhabiliter certains exotiques ? *Revue Forestière Française* n°57, p.551-552
- Piedallu C., Chéret V., Denux J.-P., Perez V., Azcona J.-S., Seynave I., Gégout J.-C., 2019. Soil and climate differently impact NDVI patterns according to the season and the stand type. *Science of the Total Environment* n°651, p.2874-2885.
- Piedallu C., Gégout J.-C., Lebourgeois F., Seynave I., 2016. Soil aeration, water deficit, nitrogen availability, acidity and temperature all contributes to shaping tree species distribution in temperate forests. *Journal of Vegetation Science* n°27, p.387-399.
- Piedallu C., Perez V., Gégout J.-C., Lebourgeois F., Bertrand R., 2009. Impact potentiel du changement climatique sur la distribution de l'Epicéa, du Sapin, du Hêtre et du Chêne sessile en France. *Revue Forestière Française* (61), p.567-593.
- Santelli, M., 1997. Guide de sylviculture du chêne pubescent. Office National des Forêts, Toulon, 28 p.
- Sardin T., Legay M., Bock J., Conrard F., 2008. Hêtraies continentales. Office National des Forêts, 56 p.
- Sardin T., 2008. Chênaies continentales. Office National des Forêts, 456 p.
- Seynave I., Gégout J.-C., Hervé J.-C., Dhôte J.-F., 2008. Is the spatial distribution of European beech (*Fagus sylvatica* L.) limited by its potential height growth ? *Journal of Biogeography* n°35, p. 1851-1862.
- Taccoen A., 2019. Détermination de l'impact potentiel du changement climatique sur la mortalité des principales essences forestières européennes. Thèse AgroParisTech, 325 p.
- Taccoen A., Piedallu C., Seynave I., Perez V., Gégou-Petit A., Nageleisen L.-M., Bontemps J.-D., Gégout J.-C., 2019. Background mortality drivers of European tree species : climate change matters. *Proc. R. Soc. B.*, 10p.
- Travaux d'élèves utilisant le modèle Fagacées sur Capsis, 2012-2018. Encadrement Vinkler I., Wernsdörfer H., Lacombe E.; AgroParisTech, non publiés.
- Wallonie Service Public SPW, 2017. Fichier Ecologique des Essences [en ligne]. Disponible sur : <https://www.fichierecologique.be/#/> . Consulté le 10 mars 2020.

Liste des contacts

Benoît COURBAUD ; Chercheur à l'INRAE, responsable de l'équipe de recherche « Dynamics » dans l'UR LESSEM ; 04.76.76.27.62/06.33.51.59.11 ; benoit.courbaud@inrae.fr

Christian PIEDALLU ; Ingénieur de recherche en écologie forestière spécialiste en géomatique à AgroParisTech Nancy, Equipe "écologie forestière" de l'UMR Silva ; 14 rue Girardet 54000 Nancy ; 03.83.39.68.77 ; christian.piedallu@agroparistech.fr

François LEBOURGEOIS ; Professeur en écologie des arbres forestiers et rédacteur en chef de la Revue Forestière Française à AgroParisTech Nancy, UMR Silva, UFR FAM, Département SIAFEE ; 14 rue Girardet 54000 Nancy ; 03.83.39.68.74 ; francois.lebourgeois@agroparistech.fr

Holger WERNSDÖRFER ; Enseignant chercheur à AgroParisTech Nancy, UMR Silva ; 14 rue Girardet 54000 Nancy ; 06.26.84.54.63 ; holger.wernsdorfer@agroparistech.fr

Mathieu FORTIN ; Chercheur scientifique au Centre Canadien sur la Fibre de Bois, Service Canadien des Forêts ; 580 rue Booth Str, Ottawa, Ontario, Canada ; mathieu.fortin@canada.ca

Pablo ANDRES-DOMENECH ; Enseignant chercheur à AgroParisTech Nancy, laboratoire BETA ; 14 rue Girardet 54000 Nancy ; 03.83.39.68.60 ; pablo.andres-domenech@agroparistech.fr

Philippe DREYFUS ; Chercheur au pôle RDI de la DT ONF Midi-Méditerranée ; ONF 1175, Chemin du Lavarin 84000 Avignon ; 04.90.89.27.84 ; philippe.dreyfus@onf.fr

Yves EHRHART ; Enseignant chercheur à AgroParisTech Nancy, UMR LERFoB, Equipe sylviculture ; 14 rue Girardet 54000 Nancy ; 03.83.39.68.72/06.73.47.81.17 ; yves.ehrhart@agroparistech.fr

ANNEXES

| | |
|---|------------------------------------|
| <u>ANNEXES</u> | Erreur ! Signet non défini. |
| <u>Annexe 1 : Table des caractéristiques dendrométriques du Hêtre (d'après Travaux d'élèves utilisant le modèle Fagacées sur Capsis, 2012-2018)</u> | Erreur ! Signet non défini. |
| <u>Annexe 2 : Table des caractéristiques dendrométriques de P1 (d'après Travaux d'élèves utilisant le modèle Fagacées sur Capsis, 2012-2018)</u> | Erreur ! Signet non défini. |
| <u>Annexe 3 : Table des caractéristiques dendrométriques de P2</u> | Erreur ! Signet non défini. |
| <u>Annexe 4 : Exemple du traitement élaboré pour les peuplements réguliers</u> | Erreur ! Signet non défini. |
| <u>Annexe 5 : Grille de prix des essences selon le diamètre élaborée pour les états du monde E1, E2 et E3</u> | Erreur ! Signet non défini. |
| <u>Annexe 6 : Grille de prix des essences selon le diamètre élaborée pour l'état du monde E6</u> | Erreur ! Signet non défini. |

Annexe 1 : Table des caractéristiques dendrométriques du hêtre (d'après Travaux d'élèves utilisant le modèle Fagacées sur Capsis, 2012-2018)

| Age | Acct (m ² /ha/an) | Dg (cm) | FH |
|-----|------------------------------|---------|-------|
| 30 | 1,20 | 8,14 | 4,08 |
| 31 | 1,20 | 12,50 | 6,46 |
| 32 | 1,20 | 13,04 | 6,77 |
| 33 | 1,20 | 13,58 | 7,09 |
| 34 | 1,18 | 14,05 | 7,36 |
| 35 | 1,17 | 14,51 | 7,63 |
| 36 | 1,16 | 14,98 | 7,90 |
| 37 | 1,15 | 15,40 | 8,14 |
| 38 | 1,13 | 15,81 | 8,39 |
| 39 | 1,12 | 16,23 | 8,63 |
| 40 | 1,11 | 16,60 | 8,86 |
| 41 | 1,10 | 16,98 | 9,08 |
| 42 | 1,09 | 17,35 | 9,31 |
| 43 | 1,07 | 19,24 | 9,77 |
| 44 | 1,05 | 19,67 | 9,99 |
| 45 | 1,04 | 20,10 | 10,20 |
| 46 | 1,02 | 20,49 | 10,40 |
| 47 | 1,01 | 20,87 | 10,60 |
| 48 | 0,99 | 21,26 | 10,80 |
| 49 | 0,98 | 23,49 | 11,23 |
| 50 | 0,96 | 23,94 | 11,42 |
| 51 | 0,95 | 24,38 | 11,62 |
| 52 | 0,93 | 24,78 | 11,80 |
| 53 | 0,92 | 25,19 | 11,98 |
| 54 | 0,90 | 25,59 | 12,16 |
| 55 | 0,89 | 27,40 | 12,49 |
| 56 | 0,88 | 27,84 | 12,67 |
| 57 | 0,86 | 28,29 | 12,84 |
| 58 | 0,85 | 28,70 | 13,01 |
| 59 | 0,84 | 29,10 | 13,18 |
| 60 | 0,83 | 29,51 | 13,35 |
| 61 | 0,82 | 31,50 | 13,67 |
| 62 | 0,80 | 31,96 | 13,83 |
| 63 | 0,79 | 32,42 | 14,00 |
| 64 | 0,78 | 32,85 | 14,15 |
| 65 | 0,77 | 33,27 | 14,31 |
| 66 | 0,76 | 33,70 | 14,46 |
| 67 | 0,75 | 35,78 | 14,77 |
| 68 | 0,74 | 36,27 | 14,92 |
| 69 | 0,73 | 36,75 | 15,08 |
| 70 | 0,72 | 37,20 | 15,22 |
| 71 | 0,71 | 37,65 | 15,37 |
| 72 | 0,70 | 38,10 | 15,52 |
| 73 | 0,69 | 40,19 | 15,80 |

| | | | |
|-----|------|-------|-------|
| 74 | 0,68 | 40,69 | 15,95 |
| 75 | 0,67 | 41,19 | 16,10 |
| 76 | 0,67 | 41,66 | 16,24 |
| 77 | 0,66 | 42,12 | 16,37 |
| 78 | 0,65 | 42,59 | 16,51 |
| 79 | 0,65 | 43,03 | 16,65 |
| 80 | 0,64 | 43,47 | 16,78 |
| 81 | 0,63 | 43,91 | 16,92 |
| 82 | 0,62 | 46,10 | 17,20 |
| 83 | 0,61 | 46,59 | 17,33 |
| 84 | 0,60 | 47,08 | 17,47 |
| 85 | 0,60 | 47,54 | 17,59 |
| 86 | 0,59 | 48,00 | 17,72 |
| 87 | 0,59 | 48,46 | 17,85 |
| 88 | 0,58 | 48,89 | 17,97 |
| 89 | 0,58 | 49,33 | 18,09 |
| 90 | 0,57 | 49,76 | 18,22 |
| 91 | 0,56 | 52,11 | 18,50 |
| 92 | 0,55 | 52,61 | 18,63 |
| 93 | 0,55 | 53,10 | 18,75 |
| 94 | 0,54 | 53,57 | 18,88 |
| 95 | 0,54 | 54,04 | 19,00 |
| 96 | 0,53 | 54,51 | 19,12 |
| 97 | 0,53 | 54,96 | 19,24 |
| 98 | 0,52 | 55,40 | 19,36 |
| 99 | 0,52 | 55,85 | 19,47 |
| 100 | 0,51 | 58,46 | 19,78 |
| 101 | 0,50 | 58,99 | 19,90 |
| 102 | 0,49 | 59,51 | 20,03 |
| 103 | 0,49 | 60,01 | 20,15 |
| 104 | 0,48 | 60,50 | 20,26 |
| 105 | 0,48 | 61,00 | 20,38 |
| 106 | 0,48 | 61,47 | 20,50 |
| 107 | 0,47 | 61,95 | 20,61 |
| 108 | 0,47 | 62,42 | 20,73 |
| 109 | 0,46 | 65,31 | 21,08 |
| 110 | 0,45 | 65,87 | 21,20 |
| 111 | 0,44 | 66,44 | 21,32 |
| 112 | 0,43 | 66,98 | 21,44 |
| 113 | 0,43 | 67,53 | 21,56 |
| 114 | 0,43 | 68,07 | 21,68 |
| 115 | 0,43 | 68,59 | 21,80 |
| 116 | 0,42 | 69,10 | 21,92 |
| 117 | 0,42 | 69,62 | 22,04 |

Annexe 2 : Table des caractéristiques dendrométriques de P1 (d'après Travaux d'élèves utilisant le modèle Fagacées sur Capsis, 2012-2018)

| Age | Acct (m ² /ha/an) | Dg (cm) | FH |
|-----|------------------------------|---------|-------|
| 30 | 1,01 | 7,97 | 3,00 |
| 31 | 1,01 | 7,97 | 3,00 |
| 32 | 1,01 | 8,23 | 3,27 |
| 33 | 1,01 | 8,48 | 3,54 |
| 34 | 1,01 | 8,74 | 3,81 |
| 35 | 1,01 | 8,97 | 4,07 |
| 36 | 1,01 | 9,21 | 4,33 |
| 37 | 1,01 | 9,44 | 4,59 |
| 38 | 0,87 | 13,24 | 5,96 |
| 39 | 0,87 | 13,62 | 6,23 |
| 40 | 0,87 | 14,00 | 6,49 |
| 41 | 0,87 | 14,36 | 6,72 |
| 42 | 0,87 | 14,71 | 6,94 |
| 43 | 0,78 | 16,17 | 7,48 |
| 44 | 0,78 | 16,62 | 7,64 |
| 45 | 0,78 | 17,08 | 7,80 |
| 46 | 0,77 | 17,50 | 7,94 |
| 47 | 0,77 | 17,92 | 8,09 |
| 48 | 0,77 | 18,34 | 8,23 |
| 49 | 0,70 | 19,32 | 8,45 |
| 50 | 0,70 | 19,81 | 8,64 |
| 51 | 0,70 | 20,29 | 8,82 |
| 52 | 0,70 | 20,74 | 9,00 |
| 53 | 0,70 | 21,18 | 9,18 |
| 54 | 0,70 | 21,63 | 9,37 |
| 55 | 0,70 | 22,07 | 9,55 |
| 56 | 0,62 | 23,02 | 9,78 |
| 57 | 0,62 | 23,53 | 9,94 |
| 58 | 0,62 | 24,05 | 10,10 |
| 59 | 0,62 | 24,54 | 10,25 |
| 60 | 0,62 | 25,02 | 10,40 |
| 61 | 0,62 | 25,51 | 10,55 |
| 62 | 0,61 | 25,97 | 10,69 |
| 63 | 0,62 | 26,43 | 10,83 |
| 64 | 0,55 | 26,70 | 10,93 |
| 65 | 0,55 | 27,24 | 11,08 |
| 66 | 0,55 | 27,77 | 11,22 |
| 67 | 0,55 | 28,27 | 11,35 |
| 68 | 0,55 | 28,76 | 11,47 |
| 69 | 0,55 | 29,26 | 11,60 |
| 70 | 0,55 | 29,75 | 11,72 |
| 71 | 0,50 | 30,28 | 11,84 |
| 72 | 0,50 | 30,82 | 11,96 |
| 73 | 0,50 | 31,35 | 12,08 |

| | | | |
|-----|------|-------|-------|
| 74 | 0,50 | 31,86 | 12,19 |
| 75 | 0,50 | 32,37 | 12,30 |
| 76 | 0,50 | 32,88 | 12,41 |
| 77 | 0,50 | 33,37 | 12,50 |
| 78 | 0,50 | 33,86 | 12,60 |
| 79 | 0,47 | 34,59 | 12,72 |
| 80 | 0,47 | 35,13 | 12,82 |
| 81 | 0,47 | 35,67 | 12,91 |
| 82 | 0,47 | 36,19 | 13,00 |
| 83 | 0,47 | 36,70 | 13,08 |
| 84 | 0,47 | 37,22 | 13,17 |
| 85 | 0,47 | 37,73 | 13,26 |
| 86 | 0,43 | 38,42 | 13,35 |
| 87 | 0,43 | 38,97 | 13,43 |
| 88 | 0,43 | 39,52 | 13,51 |
| 89 | 0,44 | 40,05 | 13,58 |
| 90 | 0,44 | 40,58 | 13,65 |
| 91 | 0,44 | 41,11 | 13,72 |
| 92 | 0,43 | 41,62 | 13,79 |
| 93 | 0,43 | 42,14 | 13,86 |
| 94 | 0,43 | 42,65 | 13,93 |
| 95 | 0,44 | 43,15 | 13,99 |
| 96 | 0,43 | 43,64 | 14,06 |
| 97 | 0,40 | 44,36 | 14,13 |
| 98 | 0,40 | 44,93 | 14,19 |
| 99 | 0,40 | 45,49 | 14,25 |
| 100 | 0,40 | 46,03 | 14,30 |
| 101 | 0,40 | 46,58 | 14,36 |
| 102 | 0,40 | 47,12 | 14,41 |
| 103 | 0,40 | 47,65 | 14,47 |
| 104 | 0,40 | 48,17 | 14,52 |
| 105 | 0,40 | 48,70 | 14,58 |
| 106 | 0,41 | 49,22 | 14,63 |
| 107 | 0,40 | 49,73 | 14,68 |
| 108 | 0,38 | 50,44 | 14,72 |
| 109 | 0,38 | 51,01 | 14,77 |
| 110 | 0,38 | 51,58 | 14,82 |
| 111 | 0,38 | 52,14 | 14,86 |
| 112 | 0,38 | 52,69 | 14,91 |
| 113 | 0,38 | 53,25 | 14,95 |
| 114 | 0,39 | 53,79 | 14,99 |
| 115 | 0,39 | 54,33 | 15,03 |
| 116 | 0,39 | 54,87 | 15,07 |
| 117 | 0,39 | 55,40 | 15,11 |
| 118 | 0,39 | 55,93 | 15,15 |

| | | | |
|-----|------|-------|-------|
| 119 | 0,37 | 56,63 | 15,18 |
| 120 | 0,37 | 57,21 | 15,22 |
| 121 | 0,37 | 57,80 | 15,25 |
| 122 | 0,37 | 58,37 | 15,29 |
| 123 | 0,37 | 58,95 | 15,32 |
| 124 | 0,37 | 59,52 | 15,36 |
| 125 | 0,37 | 60,08 | 15,39 |
| 126 | 0,37 | 60,64 | 15,42 |
| 127 | 0,37 | 61,19 | 15,45 |
| 128 | 0,37 | 61,75 | 15,48 |
| 129 | 0,35 | 62,45 | 15,51 |
| 130 | 0,35 | 63,06 | 15,54 |
| 131 | 0,35 | 63,67 | 15,57 |
| 132 | 0,36 | 64,27 | 15,59 |
| 133 | 0,36 | 64,86 | 15,61 |
| 134 | 0,36 | 65,46 | 15,64 |
| 135 | 0,36 | 66,05 | 15,66 |
| 136 | 0,36 | 66,63 | 15,69 |
| 137 | 0,36 | 67,22 | 15,71 |
| 138 | 0,34 | 67,83 | 15,74 |
| 139 | 0,34 | 68,47 | 15,76 |
| 140 | 0,34 | 69,11 | 15,78 |
| 141 | 0,35 | 69,74 | 15,80 |
| 142 | 0,35 | 70,37 | 15,82 |
| 143 | 0,35 | 71,00 | 15,84 |
| 144 | 0,35 | 71,62 | 15,86 |
| 145 | 0,35 | 72,24 | 15,88 |
| 146 | 0,35 | 72,86 | 15,89 |
| 147 | 0,35 | 73,47 | 15,91 |
| 148 | 0,35 | 74,07 | 15,93 |
| 149 | 0,35 | 74,68 | 15,95 |
| 150 | 0,33 | 75,39 | 15,96 |
| 151 | 0,33 | 76,06 | 15,98 |
| 152 | 0,33 | 76,73 | 15,99 |

| | | | |
|-----|------|-------|-------|
| 153 | 0,34 | 77,39 | 16,01 |
| 154 | 0,34 | 78,04 | 16,02 |
| 155 | 0,34 | 78,70 | 16,03 |
| 156 | 0,34 | 79,35 | 16,04 |
| 157 | 0,34 | 80,00 | 16,05 |
| 158 | 0,34 | 80,65 | 16,07 |
| 159 | 0,34 | 81,29 | 16,08 |
| 160 | 0,34 | 81,92 | 16,09 |
| 161 | 0,34 | 82,56 | 16,10 |
| 162 | 0,31 | 83,27 | 16,11 |
| 163 | 0,31 | 83,94 | 16,12 |
| 164 | 0,31 | 84,61 | 16,13 |
| 165 | 0,31 | 85,28 | 16,14 |
| 166 | 0,31 | 85,95 | 16,15 |
| 167 | 0,31 | 86,62 | 16,16 |
| 168 | 0,32 | 87,29 | 16,16 |
| 169 | 0,32 | 87,96 | 16,17 |
| 170 | 0,32 | 88,63 | 16,18 |
| 171 | 0,33 | 89,30 | 16,18 |
| 172 | 0,33 | 89,97 | 16,19 |
| 173 | 0,33 | 90,64 | 16,20 |
| 174 | 0,29 | 91,34 | 16,20 |
| 175 | 0,29 | 92,01 | 16,20 |
| 176 | 0,29 | 92,68 | 16,21 |
| 177 | 0,30 | 93,35 | 16,21 |
| 178 | 0,30 | 94,02 | 16,22 |
| 179 | 0,30 | 94,69 | 16,22 |
| 180 | 0,30 | 95,36 | 16,22 |
| 181 | 0,30 | 96,04 | 16,23 |
| 182 | 0,30 | 96,71 | 16,24 |
| 183 | 0,31 | 97,38 | 16,24 |
| 184 | 0,31 | 98,05 | 16,24 |
| 185 | 0,31 | 98,72 | 16,24 |

Annexe 3 : Table des caractéristiques dendrométriques de P2

| Age | Acct (m ² /ha/an) | Dg (cm) | FH |
|-----|------------------------------|---------|-------|
| 30 | 0,74 | 6,35 | 4,06 |
| 31 | 0,71 | 6,58 | 4,21 |
| 32 | 0,69 | 6,84 | 4,36 |
| 33 | 0,66 | 7,10 | 4,51 |
| 34 | 0,64 | 7,35 | 4,66 |
| 35 | 0,62 | 7,60 | 4,80 |
| 36 | 0,61 | 7,85 | 4,95 |
| 37 | 0,50 | 9,55 | 6,01 |
| 38 | 0,48 | 11,44 | 6,19 |
| 39 | 0,47 | 11,85 | 6,37 |
| 40 | 0,46 | 12,26 | 6,54 |
| 41 | 0,45 | 12,65 | 6,71 |
| 42 | 0,43 | 13,26 | 7,00 |
| 43 | 0,42 | 14,44 | 7,18 |
| 44 | 0,41 | 14,95 | 7,36 |
| 45 | 0,40 | 15,45 | 7,53 |
| 46 | 0,39 | 15,94 | 7,71 |
| 47 | 0,38 | 16,43 | 7,88 |
| 48 | 0,37 | 16,98 | 8,09 |
| 49 | 0,36 | 17,95 | 8,27 |
| 50 | 0,36 | 18,52 | 8,44 |
| 51 | 0,35 | 18,87 | 8,52 |
| 52 | 0,35 | 19,20 | 8,60 |
| 53 | 0,35 | 19,53 | 8,67 |
| 54 | 0,34 | 19,85 | 8,75 |
| 55 | 0,34 | 20,23 | 8,84 |
| 56 | 0,34 | 20,98 | 8,92 |
| 57 | 0,33 | 21,38 | 9,00 |
| 58 | 0,33 | 21,78 | 9,07 |
| 59 | 0,33 | 22,16 | 9,15 |
| 60 | 0,33 | 22,54 | 9,23 |
| 61 | 0,32 | 22,92 | 9,30 |
| 62 | 0,32 | 23,28 | 9,38 |
| 63 | 0,32 | 23,65 | 9,45 |
| 64 | 0,31 | 23,85 | 9,53 |
| 65 | 0,31 | 24,29 | 9,61 |
| 66 | 0,31 | 24,71 | 9,69 |
| 67 | 0,31 | 25,12 | 9,76 |
| 68 | 0,30 | 25,53 | 9,84 |
| 69 | 0,30 | 25,94 | 9,91 |
| 70 | 0,30 | 26,35 | 9,99 |
| 71 | 0,20 | 26,77 | 10,05 |
| 72 | 0,20 | 27,19 | 10,12 |

| | | | |
|-----|------|-------|-------|
| 73 | 0,20 | 27,61 | 10,18 |
| 74 | 0,20 | 28,01 | 10,24 |
| 75 | 0,19 | 28,41 | 10,31 |
| 76 | 0,19 | 28,81 | 10,37 |
| 77 | 0,19 | 29,19 | 10,43 |
| 78 | 0,19 | 29,59 | 10,50 |
| 79 | 0,19 | 30,18 | 10,56 |
| 80 | 0,19 | 30,62 | 10,62 |
| 81 | 0,19 | 31,06 | 10,68 |
| 82 | 0,19 | 31,47 | 10,75 |
| 83 | 0,19 | 31,89 | 10,81 |
| 84 | 0,18 | 32,31 | 10,87 |
| 85 | 0,18 | 32,74 | 10,93 |
| 86 | 0,18 | 33,31 | 11,00 |
| 87 | 0,18 | 33,77 | 11,06 |
| 88 | 0,18 | 34,23 | 11,12 |
| 89 | 0,18 | 34,67 | 11,18 |
| 90 | 0,18 | 35,11 | 11,25 |
| 91 | 0,13 | 35,49 | 11,29 |
| 92 | 0,13 | 35,86 | 11,33 |
| 93 | 0,13 | 36,23 | 11,38 |
| 94 | 0,13 | 36,60 | 11,42 |
| 95 | 0,13 | 36,95 | 11,46 |
| 96 | 0,13 | 37,30 | 11,50 |
| 97 | 0,13 | 37,84 | 11,54 |
| 98 | 0,13 | 38,25 | 11,58 |
| 99 | 0,13 | 38,66 | 11,63 |
| 100 | 0,13 | 39,05 | 11,67 |
| 101 | 0,13 | 39,45 | 11,71 |
| 102 | 0,13 | 39,85 | 11,75 |
| 103 | 0,13 | 40,22 | 11,79 |
| 104 | 0,13 | 40,60 | 11,83 |
| 105 | 0,13 | 40,99 | 11,88 |
| 106 | 0,13 | 41,36 | 11,92 |
| 107 | 0,13 | 41,73 | 11,96 |
| 108 | 0,13 | 42,27 | 12,00 |
| 109 | 0,12 | 42,68 | 12,04 |
| 110 | 0,12 | 43,10 | 12,08 |
| 111 | 0,12 | 43,50 | 12,13 |
| 112 | 0,12 | 43,91 | 12,17 |
| 113 | 0,12 | 44,31 | 12,21 |
| 114 | 0,12 | 44,71 | 12,25 |
| 115 | 0,12 | 45,10 | 12,29 |
| 116 | 0,12 | 45,49 | 12,33 |
| 117 | 0,12 | 45,88 | 12,38 |
| 118 | 0,12 | 46,27 | 12,42 |

| | | | |
|-----|------|-------|-------|
| 119 | 0,12 | 46,78 | 12,46 |
| 120 | 0,12 | 47,21 | 12,50 |
| 121 | 0,12 | 47,55 | 12,52 |
| 122 | 0,12 | 47,87 | 12,53 |
| 123 | 0,12 | 48,20 | 12,55 |
| 124 | 0,12 | 48,53 | 12,57 |
| 125 | 0,12 | 48,83 | 12,59 |
| 126 | 0,12 | 49,14 | 12,60 |
| 127 | 0,12 | 49,45 | 12,62 |
| 128 | 0,12 | 49,75 | 12,64 |
| 129 | 0,12 | 50,16 | 12,65 |
| 130 | 0,12 | 50,50 | 12,67 |
| 131 | 0,12 | 50,85 | 12,68 |
| 132 | 0,12 | 51,18 | 12,70 |
| 133 | 0,12 | 51,51 | 12,72 |
| 134 | 0,12 | 51,84 | 12,73 |
| 135 | 0,12 | 52,15 | 12,75 |
| 136 | 0,12 | 52,47 | 12,77 |
| 137 | 0,12 | 52,78 | 12,78 |
| 138 | 0,12 | 53,12 | 12,80 |
| 139 | 0,12 | 53,47 | 12,82 |
| 140 | 0,12 | 53,83 | 12,83 |
| 141 | 0,12 | 54,18 | 12,85 |
| 142 | 0,12 | 54,53 | 12,87 |
| 143 | 0,12 | 54,87 | 12,88 |
| 144 | 0,12 | 55,20 | 12,90 |
| 145 | 0,12 | 55,53 | 12,92 |
| 146 | 0,12 | 55,86 | 12,93 |
| 147 | 0,12 | 56,18 | 12,95 |
| 148 | 0,12 | 56,50 | 12,97 |
| 149 | 0,12 | 56,82 | 12,98 |
| 150 | 0,12 | 57,21 | 13,00 |
| 151 | 0,12 | 57,58 | 13,02 |
| 152 | 0,12 | 57,94 | 13,03 |
| 153 | 0,11 | 58,29 | 13,05 |
| 154 | 0,11 | 58,64 | 13,07 |
| 155 | 0,11 | 58,99 | 13,08 |
| 156 | 0,11 | 59,33 | 13,10 |
| 157 | 0,11 | 59,67 | 13,12 |
| 158 | 0,11 | 60,01 | 13,13 |
| 159 | 0,11 | 60,34 | 13,15 |
| 160 | 0,11 | 60,67 | 13,17 |
| 161 | 0,11 | 60,98 | 13,18 |
| 162 | 0,11 | 61,35 | 13,20 |
| 163 | 0,11 | 61,70 | 13,21 |
| 164 | 0,11 | 62,05 | 13,23 |
| 165 | 0,11 | 62,40 | 13,25 |
| 166 | 0,11 | 62,74 | 13,27 |

| | | | |
|-----|------|-------|-------|
| 167 | 0,11 | 63,08 | 13,28 |
| 168 | 0,11 | 63,42 | 13,30 |
| 169 | 0,11 | 63,76 | 13,32 |
| 170 | 0,11 | 64,10 | 13,33 |
| 171 | 0,11 | 64,44 | 13,35 |
| 172 | 0,11 | 64,78 | 13,37 |
| 173 | 0,11 | 65,11 | 13,38 |
| 174 | 0,11 | 65,47 | 13,40 |
| 175 | 0,11 | 65,80 | 13,42 |

Annexe 4 : Exemple du traitement élaboré pour les peuplements réguliers

| Année | Eclaircie | HETRE | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|-----------|--------|--------|--------|--------|------|-------|-------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------|--------------|-----------------|--|
| | | Gav | Gap | %Hav | %Hap | ÂgeH | AcctH | GH av | GH ap | GH fictif | FH H | VH fictif | DgH | Prix H coupe | GH éclaircie | VH éclaircie | PrixH éclaircie | |
| 2050 | 0 | 18 | 18 | 40 | 40 | 30 | 1,20 | 7,2 | 7,2 | 7,2 | 4,076044 | 29,347516 | 8,14 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 2051 | 0 | 19,084 | 19,084 | 40,243 | 40,243 | 31 | 1,20 | 7,68 | 7,68 | 7,68 | 6,4601592 | 49,614023 | 12,5 | 10 | 0 | 0 | 10 | |
| 2052 | 0 | 20,168 | 20,168 | 40,474 | 40,474 | 32 | 1,20 | 8,16 | 8,16 | 8,16 | 6,7735443 | 55,291884 | 13,04 | 10 | 0 | 0 | 10 | |
| 2053 | 0 | 21,253 | 21,253 | 40,693 | 40,693 | 33 | 1,20 | 8,65 | 8,65 | 8,6486 | 7,0869293 | 61,292028 | 13,58 | 10 | 0 | 0 | 10 | |
| 2054 | 0 | 22,331 | 22,331 | 40,88 | 40,88 | 34 | 1,18 | 9,13 | 9,13 | 9,1288 | 7,3577303 | 67,167078 | 14,046667 | 10 | 0 | 0 | 10 | |
| 2055 | 1 | 23,404 | 18,404 | 41,049 | 41,049 | 35 | 1,17 | 9,61 | 7,55 | 9,6071 | 7,6285313 | 73,287869 | 14,513333 | 10 | 2,052441 | 15,657108 | 10 | |
| 2056 | 0 | 19,474 | 19,474 | 41,239 | 41,239 | 36 | 1,16 | 8,03 | 8,03 | 10,767 | 7,8993323 | 85,052699 | 14,98 | 10 | 0 | 0 | 10 | |
| 2057 | 0 | 20,539 | 20,539 | 41,408 | 41,408 | 37 | 1,15 | 8,51 | 8,51 | 11,917 | 8,1444519 | 97,05804 | 15,396667 | 10 | 0 | 0 | 10 | |
| 2058 | 0 | 21,519 | 21,519 | 41,698 | 41,698 | 38 | 1,13 | 8,97 | 8,97 | 13,047 | 8,3895716 | 109,45937 | 15,813333 | 10 | 0 | 0 | 10 | |
| 2059 | 0 | 22,495 | 22,495 | 41,964 | 41,964 | 39 | 1,12 | 9,44 | 9,44 | 9,44 | 8,6346912 | 81,511346 | 16,23 | 10 | 0 | 0 | 10 | |
| 2060 | 0 | 23,468 | 23,468 | 42,21 | 42,21 | 40 | 1,11 | 9,91 | 9,91 | 9,9058 | 8,8595654 | 87,760986 | 16,603333 | 10 | 0 | 0 | 10 | |
| 2061 | 1 | 24,435 | 19,435 | 42,44 | 42,44 | 41 | 1,10 | 10,37 | 8,25 | 10,37 | 9,0844397 | 94,206541 | 16,976667 | 10 | 2,121981 | 19,277012 | 10 | |
| 2062 | 0 | 20,398 | 20,398 | 42,703 | 42,703 | 42 | 1,09 | 8,71 | 8,71 | 11,46 | 9,3093139 | 106,68566 | 17,35 | 10 | 0 | 0 | 10 | |
| 2063 | 0 | 21,3 | 21,3 | 43,04 | 43,04 | 43 | 1,07 | 9,17 | 9,17 | 12,53 | 9,7683956 | 122,39897 | 19,24 | 10 | 0 | 0 | 10 | |
| 2064 | 0 | 22,195 | 22,195 | 43,342 | 43,342 | 44 | 1,05 | 9,62 | 9,62 | 13,58 | 9,9853978 | 135,60269 | 19,67 | 10 | 0 | 0 | 10 | |
| 2065 | 0 | 23,085 | 23,085 | 43,622 | 43,622 | 45 | 1,04 | 10,07 | 10,1 | 10,07 | 10,2024 | 102,74133 | 20,1 | 12 | 0 | 0 | 12 | |
| 2066 | 0 | 23,966 | 23,966 | 43,875 | 43,875 | 46 | 1,02 | 10,52 | 10,5 | 10,515 | 10,402959 | 109,38976 | 20,486667 | 12 | 0 | 0 | 12 | |
| 2067 | 1 | 24,843 | 19,843 | 44,11 | 44,11 | 47 | 1,01 | 10,96 | 8,75 | 10,958 | 10,603517 | 116,19752 | 20,873333 | 12 | 2,205489 | 23,385942 | 12 | |
| 2068 | 0 | 20,712 | 20,712 | 44,368 | 44,368 | 48 | 0,99 | 9,19 | 9,19 | 11,948 | 10,804076 | 129,09136 | 21,26 | 12 | 0 | 0 | 12 | |
| 2069 | 0 | 21,537 | 21,537 | 44,689 | 44,689 | 49 | 0,98 | 9,62 | 9,62 | 12,928 | 11,227441 | 145,15279 | 23,493333 | 12 | 0 | 0 | 12 | |
| 2070 | 0 | 22,353 | 22,353 | 44,976 | 44,976 | 50 | 0,96 | 10,05 | 10,1 | 13,888 | 11,421773 | 158,63009 | 23,936667 | 12 | 0 | 0 | 12 | |
| 2071 | 0 | 23,165 | 23,165 | 45,243 | 45,243 | 51 | 0,95 | 10,48 | 10,5 | 10,481 | 11,616105 | 121,74466 | 24,38 | 12 | 0 | 0 | 12 | |
| 2072 | 0 | 23,968 | 23,968 | 45,483 | 45,483 | 52 | 0,93 | 10,90 | 10,9 | 10,901 | 11,798133 | 128,61664 | 24,783333 | 12 | 0 | 0 | 12 | |
| 2073 | 1 | 24,767 | 19,767 | 45,706 | 45,706 | 53 | 0,92 | 11,32 | 9,03 | 11,32 | 11,980161 | 135,61408 | 25,186667 | 15 | 2,285312 | 27,378409 | 15 | |
| 2074 | 0 | 20,557 | 20,557 | 45,951 | 45,951 | 54 | 0,90 | 9,45 | 9,45 | 12,22 | 12,16219 | 148,6206 | 25,59 | 15 | 0 | 0 | 15 | |
| 2075 | 0 | 21,343 | 21,343 | 46,175 | 46,175 | 55 | 0,89 | 9,85 | 9,85 | 13,11 | 12,489636 | 163,73773 | 27,396667 | 15 | 0 | 0 | 15 | |
| 2076 | 0 | 22,081 | 22,081 | 46,471 | 46,471 | 56 | 0,88 | 10,26 | 10,3 | 13,99 | 12,667238 | 177,21324 | 27,843333 | 15 | 0 | 0 | 15 | |
| 2077 | 0 | 22,811 | 22,811 | 46,736 | 46,736 | 57 | 0,86 | 10,66 | 10,7 | 10,661 | 12,84484 | 136,93732 | 28,29 | 15 | 0 | 0 | 15 | |
| 2078 | 0 | 23,536 | 23,536 | 46,983 | 46,983 | 58 | 0,85 | 11,06 | 11,1 | 11,058 | 13,012431 | 143,89331 | 28,696667 | 15 | 0 | 0 | 15 | |
| 2079 | 1 | 24,258 | 19,258 | 47,213 | 47,213 | 59 | 0,84 | 11,45 | 9,09 | 11,453 | 13,180022 | 150,94817 | 29,103333 | 15 | 2,360629 | 31,113144 | 15 | |

| P1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|--------|-------|--------|--------|--------|------------|-----------|------------|-----------|---------------|---------------|---------------|------------------|--|--|--|
| %P1av | %P1ap | ÂgeP1 | AcctP1 | GP1 av | GP1 ap | GP1 fictif | FH P1 | VP1 fictif | DgP1 | Prix P1 coupe | GP1 éclaircie | VP1 éclaircie | PrixP1 éclaircie | | | |
| 60 | 60 | 30 | 1,01 | 10,8 | 10,8 | 10,8 | 2,9973298 | 32,371162 | 7,97 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | |
| 59,757 | 59,757 | 31 | 1,01 | 11,40 | 11,4 | 11,404 | 2,9973298 | 34,181549 | 7,97 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | |
| 59,526 | 59,526 | 32 | 1,01 | 12,01 | 12,01 | 12,006 | 3,2687754 | 39,243455 | 8,2266667 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | |
| 59,307 | 59,307 | 33 | 1,01 | 12,60 | 12,6 | 12,605 | 3,540221 | 44,623722 | 8,4833333 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | |
| 59,12 | 59,12 | 34 | 1,01 | 13,20 | 13,2 | 13,202 | 3,8116667 | 50,320899 | 8,74 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | |
| 58,951 | 58,951 | 35 | 1,01 | 13,80 | 10,85 | 13,797 | 4,0696554 | 56,14883 | 8,9733333 | 0 | 2,9475593 | 11,99555 | 0 | | | |
| 58,761 | 58,761 | 36 | 1,01 | 14,44 | 11,44 | 14,804 | 4,327644 | 64,064782 | 9,2066667 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | |
| 58,592 | 58,592 | 37 | 1,01 | 12,03 | 12,03 | 15,81 | 4,5856327 | 72,500152 | 9,44 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | |
| 58,302 | 58,302 | 38 | 0,87 | 12,55 | 12,55 | 16,684 | 5,961164 | 99,453773 | 13,24 | 15 | 0 | 0 | 15 | | | |
| 58,036 | 58,036 | 39 | 0,87 | 13,06 | 13,06 | 13,055 | 6,2272925 | 81,298723 | 13,62 | 15 | 0 | 0 | 15 | | | |
| 57,79 | 57,79 | 40 | 0,87 | 13,56 | 13,56 | 13,562 | 6,4934211 | 88,064244 | 14 | 15 | 0 | 0 | 15 | | | |
| 57,56 | 57,56 | 41 | 0,87 | 14,06 | 11,19 | 14,065 | 6,7177289 | 94,483815 | 14,355 | 15 | 2,8780186 | 19,333749 | 15 | | | |
| 57,297 | 57,297 | 42 | 0,87 | 11,69 | 11,69 | 14,935 | 6,9420368 | 103,67824 | 14,71 | 15 | 0 | 0 | 15 | | | |
| 56,96 | 56,96 | 43 | 0,78 | 12,13 | 12,13 | 15,712 | 7,4778751 | 117,48872 | 16,166667 | 30 | 0 | 0 | 30 | | | |
| 56,658 | 56,658 | 44 | 0,78 | 12,57 | 12,57 | 16,488 | 7,6382775 | 125,94128 | 16,623333 | 30 | 0 | 0 | 30 | | | |
| 56,378 | 56,378 | 45 | 0,78 | 13,02 | 13,02 | 13,015 | 7,7986799 | 101,50013 | 17,08 | 30 | 0 | 0 | 30 | | | |
| 56,125 | 56,125 | 46 | 0,77 | 13,45 | 13,45 | 13,451 | 7,9421079 | 106,82953 | 17,5 | 30 | 0 | 0 | 30 | | | |
| 55,89 | 55,89 | 47 | 0,77 | 13,89 | 11,09 | 13,885 | 8,0855359 | 112,26816 | 17,92 | 30 | 2,7945109 | 22,595118 | 30 | | | |
| 55,632 | 55,632 | 48 | 0,77 | 11,52 | 11,52 | 14,658 | 8,2289639 | 120,6234 | 18,34 | 30 | 0 | 0 | 30 | | | |
| 55,311 | 55,311 | 49 | 0,70 | 11,91 | 11,91 | 15,358 | 8,451004 | 129,79386 | 19,323333 | 30 | 0 | 0 | 30 | | | |
| 55,024 | 55,024 | 50 | 0,70 | 12,30 | 12,3 | 16,058 | 8,6362046 | 138,68358 | 19,806667 | 30 | 0 | 0 | 30 | | | |
| 54,757 | 54,757 | 51 | 0,70 | 12,68 | 12,68 | 12,685 | 8,8214051 | 111,89548 | 20,29 | 60 | 0 | 0 | 60 | | | |
| 54,517 | 54,517 | 52 | 0,70 | 13,07 | 13,07 | 13,066 | 9,0027076 | 117,63362 | 20,735 | 60 | 0 | 0 | 60 | | | |
| 54,294 | 54,294 | 53 | 0,70 | 13,45 | 10,73 | 13,447 | 9,18401 | 123,49485 | 21,18 | 60 | 2,7146878 | 24,93172 | 60 | | | |
| 54,049 | 54,049 | 54 | 0,70 | 11,11 | 11,11 | 14,144 | 9,3653124 | 132,46507 | 21,625 | 60 | 0 | 0 | 60 | | | |
| 53,825 | 53,825 | 55 | 0,70 | 11,49 | 11,49 | 14,842 | 9,5466149 | 141,68822 | 22,07 | 60 | 0 | 0 | 60 | | | |
| 53,529 | 53,529 | 56 | 0,62 | 11,82 | 11,82 | 15,458 | 9,7769129 | 151,13534 | 23,016667 | 60 | 0 | 0 | 60 | | | |
| 53,264 | 53,264 | 57 | 0,62 | 12,15 | 12,15 | 12,15 | 9,9380851 | 120,74521 | 23,533333 | 60 | 0 | 0 | 60 | | | |
| 53,017 | 53,017 | 58 | 0,62 | 12,48 | 12,48 | 12,478 | 10,099257 | 126,0206 | 24,05 | 60 | 0 | 0 | 60 | | | |
| 52,787 | 52,787 | 59 | 0,62 | 12,81 | 10,17 | 12,805 | 10,249845 | 131,25071 | 24,536667 | 60 | 2,6393708 | 27,053142 | 60 | | | |

Annexe 5 : Grille de prix des essences selon le diamètre élaborée pour les états du monde E1, E2 et E3

| Prix | H | P1 | P2 |
|-------------|----------|-----------|-----------|
| Dg<10 | 0 | 0 | 0 |
| 10<Dg<15 | 10 | 15 | 15 |
| 15<Dg<20 | 10 | 30 | 30 |
| 20<Dg<25 | 12 | 60 | 60 |
| 25<Dg<30 | 15 | 100 | 100 |
| 30<Dg<35 | 19 | 140 | 140 |
| 35<Dg<40 | 23 | 175 | 175 |
| 40<Dg<50 | 27 | 225 | 225 |
| 50<Dg<70 | 31 | 265 | 265 |
| Dg>70 | 35 | 280 | 280 |

Annexe 6 : Grille de prix des essences selon le diamètre élaborée pour l'état du monde E6

| Prix (€/m3) | H | P1 | P2 |
|--------------------|----------|-----------|-----------|
| Dg<10 | 0 | 0 | 0 |
| 10<Dg<15 | 10 | 15 | 10 |
| 15<Dg<20 | 10 | 30 | 10 |
| 20<Dg<25 | 12 | 60 | 15 |
| 25<Dg<30 | 15 | 100 | 15 |
| 30<Dg<35 | 19 | 140 | 20 |
| 35<Dg<40 | 23 | 175 | 20 |
| 40<Dg<50 | 27 | 225 | 30 |
| 50<Dg<70 | 31 | 265 | 30 |
| Dg>70 | 35 | 280 | 30 |

