
Nouvelle valorisation des données au sein du réseau de l'Association Futaie Irrégulière

Variabilité des cours du bois, stockage de carbone et changement
climatique



Mémoire de dominante Gestion forestière

MARIE-LAURE MARTIN

Année : 2018-2019

Crédits photographiques : Association Futaie Irrégulière.

Photo de couverture : Dispositif de Métendal, Vosges.

Nouvelle valorisation des données au sein du réseau de l'Association Futaie Irrégulière

**Variabilité des cours du bois, stockage de carbone et changement
climatique**

Mémoire de dominante Gestion forestière

MARIE-LAURE MARTIN

Année : 2018-2019

Fiche signalétique d'un mémoire
rédigé dans le cadre d'études à AgroParisTech

Titre : Nouvelle valorisation des données au sein du réseau de l'Association Futaie Irrégulière
Variabilité des cours du bois, stockage de carbone et changement climatique

Auteur : MARTIN Marie-Laure

Mots clés :

Mercuriale de prix, valeur de consommation, carbone, bois mort, biomasse, AFI, irrégulier, changement climatique, accroissement

Stage assistant ingénieur

Date de fin de rédaction : Vendredi 04 octobre 2019

Dominante d'approfondissement

CEI

Autre

Caractéristiques : 1 volume(s) ; 110 pages ; 50 figures ; 25 tableaux ; 11 annexes ; bibliographie.

Organisme d'accueil : Association Futaie Irrégulière, 24 quai Vauban, 25 000 BESANCON

Nom du maître de stage : Julien TOMASINI

Fonctions dans l'organisme : Président de l'Association Futaie Irrégulière

Nom du référent AgroParisTech : Max BRUCIAMACCHIE

Résumés français et en d'autres langues :

Français:

L'Association Futaie Irrégulière (AFI), depuis sa création en 1991, vise à fournir des données et partager des connaissances aux gestionnaires sur la conduite des peuplements en gestion irrégulière. De manière périodique, l'AFI publie les nouvelles données collectées et apporte un éclairage sur des thématiques d'actualité.

L'AFI souhaite compléter son étude économique des peuplements suivis en mettant en place une double comptabilité afin d'estimer plus justement et dans un contexte actuel le patrimoine forestier des dispositifs qu'elle suit. Pour ce faire, les prix publiés annuellement dans la Forêt Privée par le cabinet d'experts forestiers Chavet ont servi de base pour la création d'une mercuriale de prix variables.

L'AFI a déjà montré les bénéfices d'une gestion irrégulière tant pour optimiser le capital producteur que pour la biodiversité. Elle souhaite aujourd'hui investir la problématique carbone et explorer les nouvelles possibilités offertes par le label Bas-Carbone.

Après analyse, il ressort que les stocks de carbone au sein des dispositifs gérés en irrégulier se révèlent assez stables au cours du temps. Cette analyse permet d'engager une réflexion sur le bénéfice carbone de la gestion irrégulière notamment à travers d'un exemple de comparaison sur la gestion des plantations de douglas.

La diversité de situations aussi bien stationnelles que géographiques et le suivi de l'accroissement des peuplements permet à l'AFI d'étudier la réponse des essences en station aux évolutions climatiques. Une étude statistique utilisant des modèles linéaires mixtes montre, parmi les essences étudiées (ex. chêne sessile, hêtre, douglas, sapin pectiné), des réponses aux facteurs climatiques différentes selon les contextes (bien qu'à l'échelle d'un cycle, des événements extrêmes ou des spécificités annuelles peuvent être masquées).

Anglais:

Since its creation in 1991, the Association Futaie Irrégulière aims at providing managers data and sharing knowledge about the management of irregular stands. Regularly, the AFI publishes new collected data and gives information on current issues.

The AFI wants to improve its economic monitoring of the stands with a dual accounting system in order to estimate, more precisely and in a current context, the forest heritage of the AFI plots. The prices published by the Cabinet of forester experts Chavet in the Forêt Privée provided the basis for the creation of a market variable prices list.

The AFI has already showed the benefits of an irregular management as well to optimise the production capital and to improve biodiversity. It wishes to support the forest carbon and the new opportunities offered by the Low-Carbon label. The analysis shows that the carbon stocks within the plots managed in an irregular manner are relatively steady over time. This analysis allows to initiate a reflection about the carbon benefit of a irregular management especially thanks to an example of comparison about the management of douglas plantation.

The diversity of soil and geographical situations and the growth monitoring of the stands allow the AFI to study the timber species responses to the climate changes. A statistical analysis using linear mixed model shows that, among the studied species (sessile oak, beech, douglas, silver fir), different responses to the climate changes according to the situations (even though considering a cycle, extreme events or annual specifications can be masked).

Résumé - Abstract

Français :

L'Association Futaie Irrégulière (AFI), depuis sa création en 1991, vise à fournir des données et partager des connaissances aux gestionnaires sur la conduite des peuplements en gestion irrégulière. De manière périodique, l'AFI publie les nouvelles données collectées et apporte un éclairage sur des thématiques d'actualité.

L'AFI souhaite compléter son étude économique des peuplements suivis en mettant en place une double comptabilité afin d'estimer plus justement et dans un contexte actuel le patrimoine forestier des dispositifs qu'elle suit. Pour ce faire, les prix publiés annuellement dans la Forêt Privée par le cabinet d'experts forestiers Chavet ont servi de base pour la création d'une mercuriale de prix variables.

L'AFI a déjà montré les bénéfices d'une gestion irrégulière tant pour optimiser le capital producteur que pour la biodiversité. Elle souhaite aujourd'hui investir la problématique carbone et explorer les nouvelles possibilités offertes par le label Bas-Carbone. Après analyse, il ressort que les stocks de carbone au sein des dispositifs gérés en irrégulier se révèlent assez stables au cours du temps. Cette analyse permet d'engager une réflexion sur le bénéfice carbone de la gestion irrégulière notamment à travers un exemple de comparaison sur la gestion des plantations de douglas.

La diversité de situations aussi bien stationnelles que géographiques et le suivi de l'accroissement des peuplements permettent à l'AFI d'étudier la réponse des essences en station aux évolutions climatiques. Une étude statistique utilisant des modèles linéaires mixtes montre, parmi les essences étudiées (ex. chêne sessile, hêtre, douglas, sapin pectiné), des réponses aux facteurs climatiques différentes selon les contextes (bien qu'à l'échelle d'un cycle, des événements extrêmes ou des spécificités annuelles peuvent être masqués).

English :

Since its creation in 1991, the Association Futaie Irrégulière aims at providing managers data and sharing knowledge about the management of irregular stands. Regularly, the AFI publishes new collected data and gives information on current issues.

The AFI wants to improve its economic monitoring of the stands with a dual accounting system in order to estimate, more precisely and in a current context, the forest heritage of the AFI plots. The prices published by the Cabinet of forester experts Chavet in the Forêt Privée provided the basis for the creation of a market variable prices list.

The AFI has already showed the benefits of an irregular management as well to optimise the production capital and to improve biodiversity. It wishes to support the forest carbon and the new opportunities offered by the Low-Carbon label. The analysis shows that the carbon stocks within the plots managed in an irregular manner are relatively steady over time. This analysis allows to initiate a reflection about the carbon benefit of a irregular management especially thanks to an example of comparison about the management of douglas plantation.

The diversity of soil and geographical situations and the growth monitoring of the stands allow the AFI to study the timber species responses to the climate changes. A statistical analysis using linear mixed model shows that, among the studied species (sessile oak, beech, douglas, silver fir), different responses to the climate changes according to the situations (even though considering a cycle, extreme events or annual specifications can be masked).

Engagement de non-plagiat

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.

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 l'intéressant 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.

Sanctions

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

Engagement

Je soussigné (e) Martin Marie-Laure,

reconnais avoir lu et m'engage à respecter l'engagement de non-plagiat.

À Beaumont le 02/09/19.

Signature :



Remerciements

Je tiens ici à remercier toutes les personnes qui de près ou de loin m'ont aidée dans mon travail.

En premier lieu, je remercie l'Association Futaie Irrégulière de m'avoir offert l'opportunité de faire ce stage et de m'avoir fait découvrir toute la technicité relative à la gestion des peuplements en irrégulier. Ce stage m'aura permis de développer autant mes connaissances forestières que d'ordre informatiques et statistiques. A tous ses membres qui m'ont transmis un peu de leurs connaissances lors des remesures réalisées sur le terrain.

Merci à Max Bruciamacchie, mon enseignant tuteur et directeur scientifique de l'AFI pour m'avoir encadrée et pour m'avoir soutenue dans mon travail. Il a su prendre de son temps pour répondre à mes questionnements et me faire partager ses connaissances aussi bien sur le logiciel R qu'en matière forestière.

Je remercie aussi mon maître de stage, Julien Tomasini, expert forestier et président de l'AFI pour son accueil au sein de ForestAllia (ex-cabinet Leforestier Ltd.) et le temps consacré à mon encadrement dans une période mouvementée.

Je suis reconnaissante envers toutes les personnes ressources qui m'auront conseillée tout au long de l'élaboration de mon rapport notamment pour des données fournies, des conseils bibliographiques ou simplement des discussions sur mes thématiques.

Table des matières

Index des sigles utilisés	8
Introduction	9
1 Intégration de la variabilité des cours du bois dans le suivi économique des dispositifs du réseau AFI	11
1.1 Introduction	11
1.2 Choix de la mercuriale de prix et mise en place d'une double comptabilité	11
1.2.1 Choix de la mercuriale de prix	11
1.2.2 Construction de deux mercuriales de prix	13
1.3 Redéfinition des indicateurs économiques	17
1.3.1 Définition des variables économiques actuelles	17
1.3.2 Définition de nouvelles variables économiques	18
1.3.3 Apport des nouvelles variables économiques pour l'évaluation des recettes issues des dispositifs	21
1.4 Valorisation de la double comptabilité : synthèse des résultats par dispositif	22
1.4.1 Dispositif 5	22
1.4.1.1 Résultats	22
1.4.1.2 Analyse	23
1.4.1.3 Comparaison avec le dispositif 15	24
1.4.2 Dispositif 6	25
1.4.2.1 Résultats	26
1.4.2.2 Analyse	27
1.4.3 Dispositif 44	27
1.4.3.1 Résultats	28
1.4.3.2 Analyse	30
1.5 Discussion	31

2	Quantification et évolution du stock carbone au sein des dispositifs du réseau AFI	32
2.1	Introduction	32
2.2	Estimation du stock carbone au sein des écosystèmes forestiers	34
2.2.1	Le carbone dans la biomasse aérienne	34
2.2.2	Le carbone dans la biomasse racinaire	35
2.2.3	Le carbone dans le sol et le bois mort	35
2.3	Etude sur le stock carbone au sein du réseau AFI	36
2.3.1	Stock de carbone dans la biomasse vivante	36
2.3.2	Stock de carbone dans la biomasse morte	37
2.4	Résultats et analyses thématiques	40
2.4.1	Stockage de carbone dans des peuplements de châtaignier	40
2.4.2	Stockage de carbone dans des peuplements de chêne	42
2.4.3	Stockage de carbone dans des peuplements de hêtre	45
2.4.4	Stockage de carbone dans des peuplements de résineux	48
2.4.5	Stockage carbone dans un dispositif géré et une réserve naturelle non gérée	50
2.5	Pistes de réflexion pour l'élaboration de méthodes forestières dans le cadre du label Bas-Carbone	51
2.5.1	Pistes de réflexion	51
2.5.2	Exemple d'une méthode : Alternative à la gestion régulière des plantations de douglas	52
2.6	Discussion	54
3	Influence des conditions climatiques sur l'accroissement en diamètres de plusieurs essences	56
3.1	Introduction	56
3.2	Présentation des données arbres et des données climatiques	57
3.2.1	Choix et mise en forme des jeux de données arbres	57
3.2.2	Choix et mise en forme des jeux de données climatiques	60
3.2.2.1	Données Météo-France	60
3.2.2.2	Données issues du programme MODIS	61
3.2.2.3	Choix des variables climatiques	61
3.3	Analyse statistique des données d'accroissement en lien avec les variables climatiques	63
3.3.1	Analyse exploratoire des données	63
3.3.2	Modèle statistique proposé et choix de la méthode	66
3.3.3	Comparaison et sélection de modèles	67
3.3.3.1	Cas 1 : Peuplements mélangés sur sols calcaires	67
3.3.3.2	Cas 2 : Chênaies sur sols hydromorphes	69
3.3.3.3	Cas 3 : Douglasaies sur sols acides	71
3.3.3.4	Cas 4 : Hêtraies sur sols calcaires ou sableux	73
3.4	Discussion	74

Conclusion	77
Bibliographie	81
Liste des contacts	82
Liste des Annexes	83

Liste des tableaux

1.1	Détail du contenu de la base de données Forêt Privée	13
1.2	Détail du contenu de la base de données Forêt Privée	14
1.3	Résumé des hypothèses sur les prix unitaires résineux de la base Forêt Privée	15
1.4	Hypothèses sur les prix unitaires du pin sylvestre	15
1.5	Hypothèses des prix unitaires pour les essences manquantes	15
1.6	Evaluation des recettes de coupes bois d'oeuvre du dispositif 5	23
1.7	Evaluation des recettes de coupes bois d'oeuvre du dispositif 6	27
1.8	Evaluation des recettes de coupes bois d'oeuvre du dispositif 44	29
1.9	Evaluation du prix moyen de la recette de la coupe de bois d'oeuvre de 2006 ventilée par essence du dispositif 44	30
2.1	Répartition du carbone dans les compartiments forestiers	34
2.2	Clé de détermination du stade de décomposition d'une pièce de bois mort retenue par l'AFI	37
2.3	Correspondance entre la classification américaine et celle de l'AFI	38
2.4	Volume et surface terrière du peuplement du dispositif 16 en 1997	52
2.5	Résultats du gain carbone entre les deux scénarios	54
3.1	Caractéristiques stationnelles des dispositifs étudiés	58
3.2	Principales caractéristiques des peuplements étudiés	59
3.3	Postes Météo-France associés aux dispositifs étudiés	60
3.4	Définition des covariables climatiques	62
3.5	Effets des variables sur l'accroissement pour le cas 1	67
3.6	Effets des variables climatiques sur l'accroissement pour le cas 2	69
3.7	Effets des variables climatiques sur l'accroissement des douglas	71
3.8	Effets des variables climatiques sur l'accroissement des hêtres	73
E.1	Clé de détermination de la classe de décomposition pour une pièce de bois mort sur pied	93
E.2	Clé de détermination de la classe de décomposition pour une pièce de bois mort sur sol	94
I.1	Temps de demi-vie des produits bois selon leur utilisation	104

Table des figures

1.1	Comparaison des deux mercuriales pour le chêne	16
1.2	Variation relative des cours du chêne	18
1.3	Variation relative des cours du hêtre	19
1.4	Variation relative des cours du douglas	20
1.5	Evolution de la valeur de consommation suivant les deux mercuriales pour le dispositif 5	22
1.6	Evolution des stocks, en volume et valeur, avec la mercuriale AFI et évolution du marché pour le dispositif 5	23
1.7	Evolution de la valeur de consommation du dispositif 15 suivant les deux mercuriales	24
1.8	Evolution de la valeur de consommation suivant les deux mercuriales pour le dispositif 6	26
1.9	Evolution des stocks, en volume et valeur, avec la mercuriale AFI et évolution du marché pour le dispositif 6	26
1.10	Evolution de la valeur de consommation suivant les deux mercuriales pour le dispositif 44	28
1.11	Evolution de la valeur de consommation pour les essences principales	29
2.1	Fonction de la durée de vie et paramètres associés	37
2.2	Stock de carbone des dispositifs 81 et 82	41
2.4	Durée de vie des produits des dispositifs 81 et 82	41
2.3	Evolution du volume par qualité des dispositifs 81 et 82	42
2.5	Stock de carbone des dispositifs 11, 15, 52 et 54	43
2.6	Evolution du volume par qualité des dispositifs 11, 15, 52 et 54	43
2.7	Durée de vie des produits des dispositifs 11, 15, 52 et 54	44
2.8	Flux des durées de vie des produits des dispositifs 15 et 52	45
2.9	Stock de carbone des dispositifs 6 et 10	46
2.10	Evolution du volume par qualité des dispositifs 6 et 10	46
2.11	Durée de vie des dispositifs 6 et 10	47
2.12	Flux des durées de vie des produits des dispositifs 6 et 10	47
2.13	Stock de carbone des dispositifs 48 et 49	48
2.14	Evolution du volume par qualité des dispositifs 48 et 49	49
2.15	Durée de vie des produits des dispositifs 48 et 49	50
2.16	Comparaison des stocks de carbone du dispositif 32 du réseau AFI et de la réserve naturelle du Grand Ventron	51

3.1	Evolutions climatique et de l'accroissement pour deux dispositifs du cas n°1	63
3.2	Analyse exploratoire pour le cas n°1	65
3.3	Cas 1 - ajustement du modèle	68
3.4	Cas 2 - ajustement du modèle	70
3.5	Cas 3 - ajustement du modèle	72
3.6	Cas 4 - ajustement du modèle	74
B.1	Equations allométriques par essence pour calculer la biomasse racinaire	87
C.1	Taux de carbone contenu dans le bois (Données issues de Thomas et Martin (2012)).	88
F.1	Stocks de carbone de quelques dispositifs sur calcisols	95
F.2	Stocks de carbone de quelques dispositifs sur sols sableux	96
F.3	Stocks de carbone de quelques dispositifs sur sols hydromorphes	97
F.4	Stocks de carbone de quelques dispositifs sur sols limono-argileux	97
F.5	Flux du stock de carbone dans le bois vivant au sein des dispositifs du réseau AFI	98
F.6	Quantité de carbone moyenne des peuplements feuillus et résineux du réseau AFI	99
G.1	Exemple d'itinéraire de sylviculture classique du Douglas avec un allongement de la production (tableau issu de Borde (2016)).	100
G.2	Volume du peuplement de référence	101
H.1	Itinéraire irrégulier pour le peuplement de Folin à partir des données d'inventaire de l'AFI	102
J.1	Répartition du volume des coupes en fonction de l'usage potentiel	105
K.1	Evolutions climatique et de l'accroissement pour le cas n°2	106
K.2	Analyse exploratoire pour le cas n°2	107
K.3	Evolutions climatique et de l'accroissement pour le dispositif 16 du cas n°3	108
K.4	Analyse exploratoire pour le cas n°3	109
K.5	Analyse exploratoire pour le cas n°4	110

Index des sigles utilisés

AIC : Aikake Information Criterion

AFI : Association Futaie Irrégulière

BIC : Bayesian Information Criterion

CNPF : Centre National de la Propriété Forestière

COD : Carbone organique dissous

GES : Gaz à effet de serre

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

IGN : Institut Géographique National

INRA : Institut National de Recherche Agronomique

I4EC : Institut de l'Economie pour le climat

REA : Réductions d'émissions anticipées

REE : Réductions d'émissions de l'empreinte

RUM : Réserve utile maximale

SNBC : Stratégie Nationale Bas Carbone

SRGS : Schéma Régional de Gestion Sylvicole

USDA : United States Department of Agriculture

Introduction

L'Association Futaie Irrégulière (AFI) est une association loi de 1901 et a été enregistrée en 1991 à la Préfecture du Doubs. Elle a été créée à l'initiative d'experts forestiers afin de mettre en avant la gestion des peuplements en irrégulier, la raison d'être de l'AFI étant de promouvoir les méthodes de gestion et les techniques sylvicoles pratiquées en futaie irrégulière. Afin de répondre à ses objectifs, l'AFI a, dès sa création, mis en place un réseau de placettes permanentes destinées à servir de référence. Le réseau compte aujourd'hui plus d'une centaine de dispositifs comprenant chacun neuf ou dix placettes permanentes. Les dispositifs couvrent un ensemble diversifié de contextes climatiques et stationnels en France et en Europe, qui permet de démontrer que le traitement irrégulier est applicable dans des situations très variées. Ces dispositifs sont mesurés tous les cinq ans afin de quantifier de manière rigoureuse la gestion en traitement irrégulier du point de vue économique, écologique et dendrométrique.

Les objectifs poursuivis sont multiples :

- Caractériser dans toutes ses composantes la gestion pratiquée en traitement irrégulier en évitant au maximum de l'influencer
- Vérifier que l'utilisation de la dynamique végétale apporte des réductions de coûts de production et d'exploitation tout en permettant l'amélioration du niveau des recettes et celui du capital producteur
- Contribuer à l'amélioration des connaissances ainsi qu'à la circulation de l'information sur les solutions proposées ou sur les questions en suspend.

Ce dernier point est très important et l'AFI travaille en lien avec de nombreux partenaires pour assurer le partage de l'information (Centre National de la Propriété Forestière, Régions et départements, Ministères, propriétaires forestiers...).

Au cours des années, le protocole d'inventaire des placettes permanentes de l'AFI a été amélioré pour répondre à de nouveaux besoins (suivi économique, bois mort au sol et sur pied, note écologique...). L'AFI a déjà publié de nombreux ouvrages pour valoriser les données et pour communiquer sur la gestion en irrégulier. D'autres stagiaires d'AgroParisTech m'ont également précédée pour mettre à jour les données de l'AFI et valoriser les données accumulées.

Aujourd'hui, beaucoup de données ont déjà été récoltées, certains dispositifs ayant été mesurés jusqu'à six fois. Des interrogations se posent sur l'avenir du réseau. D'une part sur la meilleure manière d'optimiser l'apport de nouveaux dispositifs tout en pérennisant les anciens et d'autre part, sur la manière d'utiliser ce réseau pour progresser sur les questionnements actuels. A titre d'exemple, la gestion des peuplements de frêne touchés par la chalarose, la place des nouvelles technologies dans la gestion forestière, l'engouement des politiques actuelles sur le rôle des forêts dans le stockage de carbone et l'adaptation au changement climatique des forêts françaises. Devant la diversité des sujets dont souhaite traiter l'AFI, des discussions au préalable avec les différents experts membres ont permis d'affiner les thèmes principaux sur lesquels il m'était demandé de travailler en priorité.

Le présent rapport vient compléter les études déjà réalisées et s'inscrit dans les préoccupations actuelles de l'AFI notamment en termes de suivi économique, de stockage de carbone des forêts gérées en irrégulier et de réaction des essences face au changement climatique. Il s'articule donc autour de ces trois axes d'études qui font chacun l'objet d'un chapitre.

Le premier chapitre porte sur la mise en place d'une double comptabilité au sein du réseau AFI. Elle viendra compléter le suivi économique de l'AFI déjà en place, qui s'appuie sur une mercuriale de prix fixes établie en 1995. La création d'une mercuriale de prix variables permettra de prendre en compte les variations annuelles du marché du bois et d'évaluer de manière plus fiable le patrimoine forestier.

Le deuxième chapitre traite du stockage de carbone des peuplements irréguliers suivis par l'AFI. Une précédente étude de Minotte (2012) avait déjà permis d'étudier le bilan et les flux de carbone au sein des dispositifs du réseau AFI. Il s'agira ici, d'actualiser et compléter les analyses réalisées notamment concernant le calcul du stock de carbone au sein du bois mort.

Le troisième chapitre aborde la question du changement climatique et plus particulièrement la réponse des essences en termes d'accroissement en diamètre en fonction des conditions climatiques. Les analyses des données d'accroissement réalisées par l'AFI permettent de mettre en évidence des différences entre les phases d'inventaire mais aucune quantification de l'effet lié aux conditions climatiques n'avait encore été faite. Mon travail consiste notamment à réaliser cette étude statistique à l'échelle de quelques essences (chêne sessile, hêtre, douglas) et contextes d'intérêt.

Chapitre 1

Intégration de la variabilité des cours du bois dans le suivi économique des dispositifs du réseau AFI

1.1 Introduction

Pour les besoins de son suivi économique et en particulier afin de suivre l'évolution du capital en valeur, l'AFI a établi en 1995 une mercuriale fixe des prix du bois ventilée par essence, grosseur et qualité. Ces prix ont été fixés par consensus entre les experts membres de l'association, en considérant des prix moyens du marché de l'année 1995 qui depuis sert de référence. Les variables économiques telles que la valeur de consommation ou la valeur potentielle sont nécessaires pour suivre le patrimoine financier du propriétaire, mais ce sont également d'excellentes variables pour évaluer la sylviculture pratiquée à condition de les rendre indépendantes des variations du marché. En effet, lors des remesures il est important de distinguer dans l'évolution de la valeur financière la part liée aux variations du marché et celle résultant de la concentration de l'accroissement sur les tiges ayant le meilleur potentiel. Depuis 1995, la mercuriale de prix fixes retenue est la seule à avoir été utilisée. Un précédent rapport de stage (Etienne, 2007) a démontré que l'utilisation de la mercuriale fixe de l'AFI pouvait produire des écarts significatifs sur l'estimation de la valeur d'une forêt. Elle a également comme inconvénient de mal estimer les recettes issues de la gestion. Le besoin d'une mercuriale de prix fixes reste d'actualité afin d'évaluer la sylviculture. Faut-il construire des mercuriales de prix fixes utilisables par période de 5 à 10 ans suivant un fort changement du marché comme par exemple la baisse des cours du hêtre suite à la tempête de 1999? Peut-on conserver celle de 1995 ce qui aurait le mérite de ne pas créer des ruptures lors des changements de mercuriales?

1.2 Choix de la mercuriale de prix et mise en place d'une double comptabilité

1.2.1 Choix de la mercuriale de prix

En France, plusieurs systèmes de suivi des prix des bois existent. Les principaux acteurs organisant des ventes de bois ont mis en place leur propre référentiel de suivi. Il n'y a donc pas d'unicité nationale et chacune des sources publiques ou privées ont leurs propres spécificités (Niedzwiedz et Bruciamacchie, 2016).

Afin de pouvoir comparer deux comptabilités au sein du réseau, l'une fixe et l'autre annuelle, l'idéal est de disposer d'informations sur les prix unitaires par essence, grosseur et qualité dès 1993, année d'installation et de suivi des premiers dispositifs. En effet, la mercuriale fixe de l'AFI donne des prix unitaires par essence,

qualité (A, B, C et D) et classe de diamètre.

La seule base de données répondant à ces critères est celle publiée dans la revue Forêt Privée par le cabinet d'experts forestiers Chavet. Les données de prix unitaires de la Forêt Privée ont l'avantage d'être détaillées par essence, qualité et grosseur. De plus, c'est l'une des bases les plus complètes puisqu'elle couvre la période de 1958 à nos jours. Les données retenues sont les prix publiés en novembre-décembre de chaque année disponible pour des ventes de bois sur pied.

Les prix unitaires sont détaillés en sept classes de circonférence depuis 1973 : 60 à 85 cm, 90 à 115 cm, 120 à 145 cm, 150 à 175 cm, 180 à 195 cm, 200 à 245 cm et, 250 et plus. Ces classes correspondent respectivement à des classes de diamètre de 25, 30, 40, 50, 60, 70 et, 80 et plus.

Un choix de système de qualité de type global a été choisi dès 1959 présentant l'avantage d'une certaine neutralité par rapport aux modes passagères du marché (Chavet, 2008). Ainsi pour certaines essences, une distinction par qualité est possible. Pour les feuillus, c'est le cas du chêne, classé en choix 1, choix 2, choix 3, du hêtre et du frêne, classés en choix 1 et choix 2. Pour les résineux, les qualités sont distinguées par les termes "fût propre ou peu noueux" pour les meilleures qualités et "branchus et mal élagués" pour les moins bonnes qualités. Cette différenciation est disponible pour le douglas, le sapin, l'épicéa, le mélèze, les pins et le peuplier.

Depuis 1958, la base de données du cabinet Chavet a subi des évolutions. Par exemple, certaines essences ont pu être regroupées ou au contraire dissociées telles que les pins maritime et noir. Cela entraîne des discontinuités dans la période temporelle 1958-2018. De plus, suite à la tempête de 1999 qui a fortement impacté les cours du bois, certaines données sont manquantes. C'est le cas du chêne pour lequel certaines années 2000 n'ont pas fait l'objet de cotation de prix pour la totalité des classes de circonférence, soit les classes 25 et 30 (Chavet, 2008). Le tableau ci-dessous récapitule les données disponibles par essence, et le cas échéant par qualité, sur la période 1993-2018. Les périodes en gras signifient que toutes les circonférences ne sont pas disponibles sur la période et qu'elles peuvent manquer ponctuellement.

TABLE 1.1 – Détail du contenu de la base de données Forêt Privée

Essence	Années disponibles
Aulne, Bouleau	1993-2018
Charme, Erable C	1993-2018
Châtaignier	1993-2018
Chêne, choix 1	1993-2018
Chêne, choix 2	1993-2018
Chêne, choix 3	1993-2018
Erable S et P	1993-2009 ; 2011 ; 2013-2018
Frêne, choix 1	1993-2017
Frêne, choix 2	1993-2017
Hêtre, choix 1	1993-2018
Hêtre, choix 2	1993-2018
Merisier	1993-2018
Peuplier mal élagué, branchu	1993-2018
Peuplier, fût propre et droit	1993-2018
Tilleul, Orme, Platane	1993-2018
Tremble	1993-2008 ; 2010-2018
Douglas et Mélèzes, fût propre ou peu nouveaux	2013-2018
Douglas, fût propre	1993-2012
Douglas, mal élagués et branchus	1993-1997
Epicéa, sapin fût propre	1993-2008
Epicéa, sapin branchus	1993-2000
Epicéa, sapin, fût propre ou peu nouveaux	2013-2017
Mélèze fût propre	1993-2008
Mélèze mal élagués et branchus	1993-1997
Pin laricio, branchu	1993-2000
Pin laricio, fût propre et droit	1993-2011 ; 2013-2018
Pin maritime (autres régions)	1993-2009
Pin maritime (Forêt de Gascogne)	1993-2009
Pin maritime et Pin noir	2012-2018
Pin noir, fût propre et droit	1993-2008
Pin sylvestre, branchu	1993-2018
Pin sylvestre, fût propre et droit	1993-2018

Les prix unitaires sont donnés par intervalle pour chaque essence, c'est-à-dire un prix minimum et un prix maximum. Cette base de données est la plus pertinente compte tenu du but poursuivi par le réseau AFI. Cependant, la base de données a dû être harmonisée pour correspondre aux attentes de l'AFI et pour installer une mercuriale variable de prix. Les hypothèses de travail sur la base seront détaillées au paragraphe suivant qui explique la méthodologie adoptée.

1.2.2 Construction de deux mercuriales de prix

Tous les choix développés ci-après ont été traduits sous forme d'un script R. Cette solution permet d'éventuellement modifier certains d'entre eux, mais aussi d'assurer la cohérence au cours du temps entre la mercuriale de prix fixes de l'AFI et la base de prix de la Forêt Privée.

Afin de pouvoir comparer les suivis économiques des dispositifs AFI suivant une mercuriale de prix fixes et une mercuriale de prix variables, une harmonisation de la base de données de la Forêt Privée sur le modèle de la mercuriale de prix fixes déjà en place, était nécessaire. La mercuriale de prix de l'AFI est détaillée pour 42

essences résineuses et feuillues, 24 classes de diamètre, de 10 à 120 avec un pas de 5 cm et 4 qualités : A, B, C et D. Pour chaque combinaison, la mercuriale de l'AFI fournit une seule valeur, alors que la base de données de la Forêt Privée fournit une plage. Dans un premier temps, les qualités qui étaient détaillées pour quelques essences ont été rapprochées d'une qualité selon la notation AFI. Ce rapprochement s'est basé, à dire d'expert, sur la plage de prix unitaire donnée. Ensuite, chaque essence et éventuellement qualité présentes dans la base de données de la Forêt Privée ont été associées, à dire d'expert, à un prix unitaire extrait de la fourchette de prix. Ce peut être la moyenne, le minimum, le maximum ou bien une fraction de ces deux valeurs, permettant de faire converger le nombre de qualité dans les deux bases.

Le tableau ci-dessous récapitule les hypothèses sur les feuillus pour harmoniser la base de données :

TABLE 1.2 – Détail du contenu de la base de données Forêt Privée

Essence	Qualité Forêt Privée	Qualité AFI	Calcul du prix unitaire (PU)
Aulne, Bouleau	-	AB	$PU = PU_{max}$
Aulne, Bouleau	-	C	$PU = PU_{min}$
Aulne, Bouleau	-	D	$PU = \frac{PU_{min}^2}{2}$
Chêne	choix 1	A	$PU = \frac{PU_{min} + PU_{max}}{2}$
Chêne	choix 2	B	$PU = \frac{PU_{min} + PU_{max}}{2}$
Chêne	choix 3	C	$PU = \frac{PU_{min} + PU_{max}}{2}$
Chêne	-	D	$PU = \frac{PU_C}{2}$
Frêne	choix 1	A	$PU = PU_{max}$
Frêne	choix 1	B	$PU = PU_{min}$
Frêne	choix 2	C	$PU = \frac{PU_{min} + PU_{max}}{2}$
Frêne	-	D	$PU = \frac{PU_C}{2}$
Hêtre	choix 1	A	$PU = PU_{max}$
Hêtre	choix 1	B	$PU = PU_{min}$
Hêtre	choix 2	C	$PU = \frac{PU_{min} + PU_{max}}{2}$
Hêtre	-	D	$PU = \frac{PU_C}{2}$
Peuplier	fût propre et droit	AB	$PU = PU_{max}$
Peuplier	fût propre et droit	C	$PU = PU_{min}$
Peuplier	mal élagué, branchu	D	$PU = \frac{PU_{min} + PU_{max}}{2}$
Autres Feuillus	-	A	$PU = PU_{max}$
Autres Feuillus	-	B	$PU = PU_{min}$
Autres Feuillus	-	C	$PU = \frac{PU_{min}}{2}$
Autres Feuillus	-	D	$PU = \frac{PU_{min}^2}{4}$

Autres feuillus désignent les essences suivantes : charme, érable champêtre, érable sycomore, érable plane, merisier, tremble, tilleul, orme, platane et châtaignier.

Les résineux ayant fait l'objet de regroupements variables au cours du temps, les prix unitaires des meilleures qualités ont été privilégiés pour faire des hypothèses. Lorsque cela était possible, les prix par essence individualisées étaient préférés. Les prix unitaires pour les essences telles que le douglas, le mélèze, le pin laricio, le pin maritime (Forêt de Gascogne) et le pin noir ont été estimés d'après les qualités, fût propre ou peu nouveau, fût propre et droit ou fût propre, comme suit :

TABLE 1.3 – Résumé des hypothèses sur les prix unitaires résineux de la base Forêt Privée

Qualité AFI	Calcul du prix unitaire (PU)
AB	$PU = PU_{max}$
C	$PU = PU_{min}$
D	$PU = \frac{PU_{min}}{2}$

Pour l'épicéa et le sapin, de même que pour les essences résineuses citées précédemment, les prix se basent sur les meilleures qualités. Bien que regroupées ensemble dans la base de la Forêt Privée, une décôte de 10 % pour le sapin a été appliquée sur les prix estimés de la base. Pour définir un prix unitaire de la qualité D, une décôte de 60 % est appliquée au prix unitaire de la qualité C.

Pour le pin sylvestre :

TABLE 1.4 – Hypothèses sur les prix unitaires du pin sylvestre

Qualité Forêt Privée	Qualité AFI	Calcul du PU
Pin sylvestre, fût propre et droit	A	$PU = PU_{max}$
Pin sylvestre, fût propre et droit	B	$PU = PU_{min}$
Pin sylvestre, branchu	C	$PU = PU_{max}$
Pin sylvestre, branchu	D	$PU = PU_{min}$

Après les hypothèses sur les données existantes, la base de données de la Forêt Privée a été enrichie avec les essences manquantes mais présentes dans la base AFI. En effet, pour pouvoir correctement évaluer les dispositifs, des hypothèses sur les prix unitaires annuels de ces essences ont dues être avancées. Le tableau suivant liste les essences ajoutées et les hypothèses sur le calcul des prix unitaires.

TABLE 1.5 – Hypothèses des prix unitaires pour les essences manquantes

Essence	Prix unitaire annuel
Alisier torminal	prix unitaire du tilleul avec une surcôte de 20 %
Alisier blanc	prix unitaire aulne, bouleau
Chêne chevelu	prix du chêne avec une décôte de 30 %
Chêne pubescent	prix unitaire du chêne avec une décôte de 30 %
Chêne rouge	prix unitaire du chêne avec une décôte de 30 %
Cormier	prix unitaire tilleul, orme et platane
Epicéa de Sitka	prix unitaire de l'épicéa commun avec une décôte de 20 %
Erable de Montpellier	prix unitaire de l'érable champêtre
Mélèze du Japon	prix unitaire du mélèze
Noyer	prix unitaire du frêne
Pin de Weymouth	prix unitaire du pin sylvestre avec une décôte de 20 %
Robinier	prix unitaire de l'érable sycomore et plane
Sapin grandis	prix unitaire du sapin pectiné avec une décôte de 30 %
Cèdre	-

Comme écrit au paragraphe 1.2.1, certaines années sont manquantes. Si les prix unitaires manquent pour certaines classes de diamètre à une année donnée, ou pour toutes les classes de diamètre sur une année complète, les prix unitaires sont estimés avec les prix de l'année précédente. Hormis l'année 2000, étant particulière, pour laquelle les prix ont été rapprochés de ceux de l'année 2001. Dans certains cas, rares, les données de prix pouvaient manquer consécutivement sur plusieurs années. Pour ceux-là, les prix de la base de l'AFI ont été utilisés.

Pour bien correspondre à la mercuriale fixe de l'AFI, les classes de diamètre ont également été complétées. Pour traiter les classes de diamètre supérieures à la classe 80, les prix de celle-ci ont été généralisés aux classes supérieures. Ces dernières ne représentant pas un gros volume, ces hypothèses impactent peu les calculs de suivi économique. Pour les perches et petit bois (classes de diamètre inférieures à 25), qui ne représentent pas un gros enjeu sur le suivi économique, les prix de la base AFI ont été utilisés pour combler les vides. Les classes de diamètre 35, 45, 55, 65, 75 absentes de la base de données de la Forêt Privée ont été estimées par la moyenne des prix unitaires des classes inférieure et supérieure.

Ces différentes hypothèses ont peu d'impact sur les calculs économiques car le raisonnement se base sur une variation de prix par rapport à une référence, comme expliqué dans le paragraphe suivant.

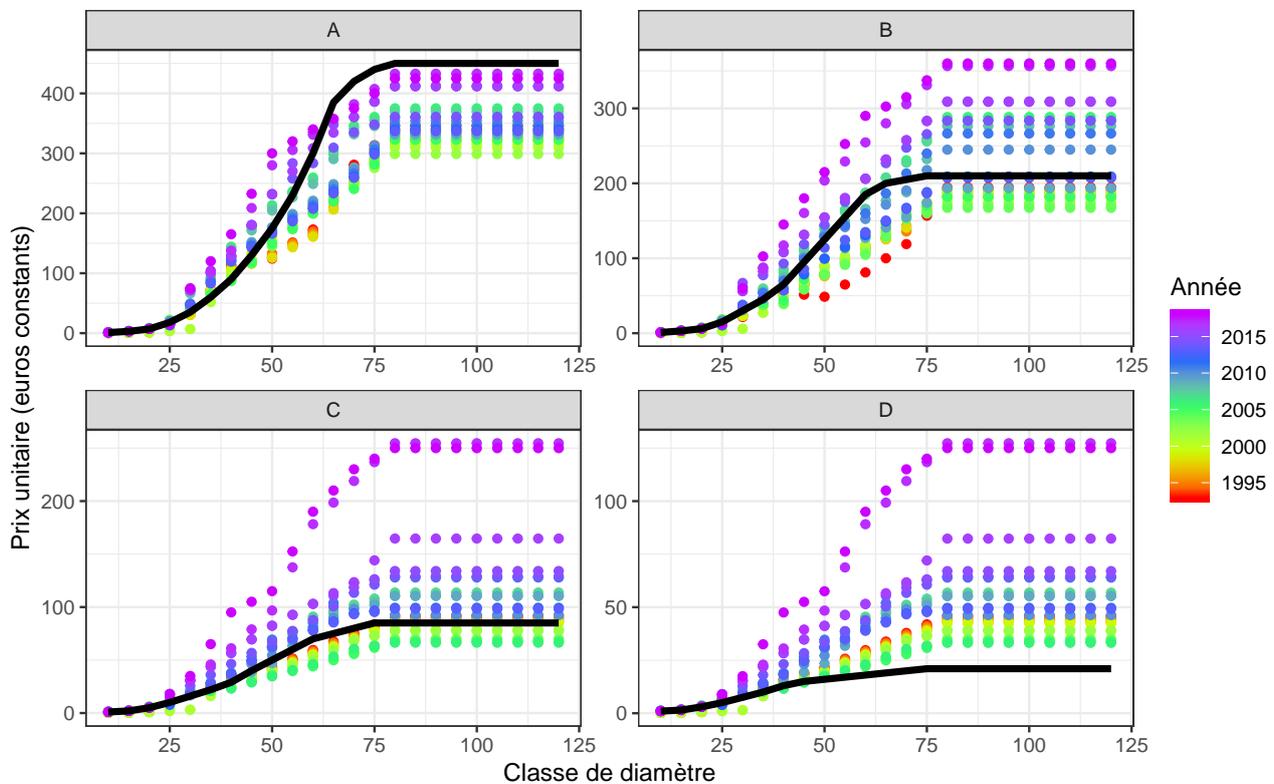


FIGURE 1.1 – Comparaison des deux mercuriales pour le chêne

La figure 1.1 montre la correspondance des prix unitaires des deux mercuriales pour le chêne. Le trait plein correspond à la mercuriale fixe de l'AFI. La mercuriale de prix fixes pour la qualité D est largement en dessous des prix estimés de la Forêt Privée. Les prix pour cette qualité ont beaucoup fluctué. Pour les qualités C et B, la mercuriale de prix fixes se situe dans la moyenne des prix unitaires de la mercuriale de prix variables. Pour la qualité A, les prix de l'AFI sont au-dessus pour les classes de diamètre supérieures à 60 cm.

1.3 Redéfinition des indicateurs économiques

Les variables définies pour l'estimation forestière par l'AFI doivent être remaniées pour tenir compte de la mercuriale de prix variables.

1.3.1 Définition des variables économiques actuelles

Les définitions et les formules des variables de suivi économique du patrimoine forestier des dispositifs sont ici rappelées.

Le suivi économique de l'AFI porte, entre autres, sur le suivi de l'évolution du capital sur pied. L'évolution du capital sur pied est suivie par l'intermédiaire de la valeur technique. Cette valeur est approchée par deux indicateurs économiques : la valeur de consommation et la valeur potentielle (Association Futaie Irrégulière, 2005). La valeur de consommation est la valeur marchande instantanée. Elle correspond à la recette perçue en cas de vente immédiate du bois. Elle est le produit du volume (m³/ha) par le prix unitaire (PU en €/m³).

$$V_{c_{arbre}} = Volume \times PU_{fixe} \quad (1.1)$$

La valeur de consommation d'un peuplement est la somme des valeurs de consommation à l'hectare des arbres issus de celui-ci.

$$V_{c_{peuplement}} = \sum V_{c_{arbre}} \quad (1.2)$$

La valeur de consommation est cependant insuffisante pour estimer la valeur future d'un jeune arbre ou d'un jeune peuplement. Ceux-ci sont estimés en valeur d'avenir, traditionnellement calculée en futaie régulière comme la valeur actuelle des recettes futures. En traitement irrégulier, le calcul est différent et l'on parle de valeur potentielle. Cette valeur intègre les perspectives de recettes futures et est définie comme le rapport entre le gain en valeur d'un arbre sur un taux d'actualisation. Elle correspond à un capital qui placé à un taux, fournit un revenu correspondant à l'accroissement en valeur (Association Futaie Irrégulière, 2018). Le gain annuel d'un arbre représente l'accroissement annuel en valeur d'un arbre. Il intègre son augmentation en volume et l'augmentation du prix unitaire associée lorsque celui-ci franchit une classe de diamètre. Ce calcul se fait à qualité constante. A l'AFI, le taux d'actualisation a été fixé à 4 % et est commun à tous les dispositifs, ce qui permet de pouvoir les comparer.

Pour calculer la valeur potentielle, deux approches sont possibles : instantanée ou périodique. La manière instantanée permet de calculer une valeur potentielle, même si l'on ne dispose que d'un seul inventaire contrairement au calcul sur une période qui nécessite au moins deux inventaires.

La valeur potentielle instantanée se calcule comme suit :

$$V_p = \frac{\delta_{arbre}}{r} \quad (1.3)$$

avec :

$$\delta_{arbre} = \left(\frac{\ln \frac{PU_{Sup}}{PU}}{5} + \frac{\ln \frac{Vol_{Sup}}{Vol}}{5} \right) \times AcctD \times V_c \quad (1.4)$$

et r, le taux d'actualisation.

ou de manière périodique :

$$V_p = \frac{\delta_{arbre,t_1 \rightarrow t_2}}{r} \quad (1.5)$$

avec :

$$\delta_{arbre,t_1 \rightarrow t_2} = \frac{PU_{t_2} \times Volume_{t_2} - PU_{t_1} \times Volume_{t_1}}{t_2 - t_1} \quad (1.6)$$

1.3.2 Définition de nouvelles variables économiques

Le suivi économique utilisant une base de prix unitaires annuels repose sur l'étude de la variation entre le prix d'une année donnée et le prix de l'année de référence, 1995. L'année de référence correspond à la création de la base de prix de l'AFL.

Cette variation se définit de la manière suivante :

$$Coe\text{f} = \frac{PU_i}{PU_{1995}} \quad (1.7)$$

Ce coefficient permet également d'apporter des informations sur la variation des cours du bois. Les figures qui suivent, illustrent cette notion sur quelques essences principales.

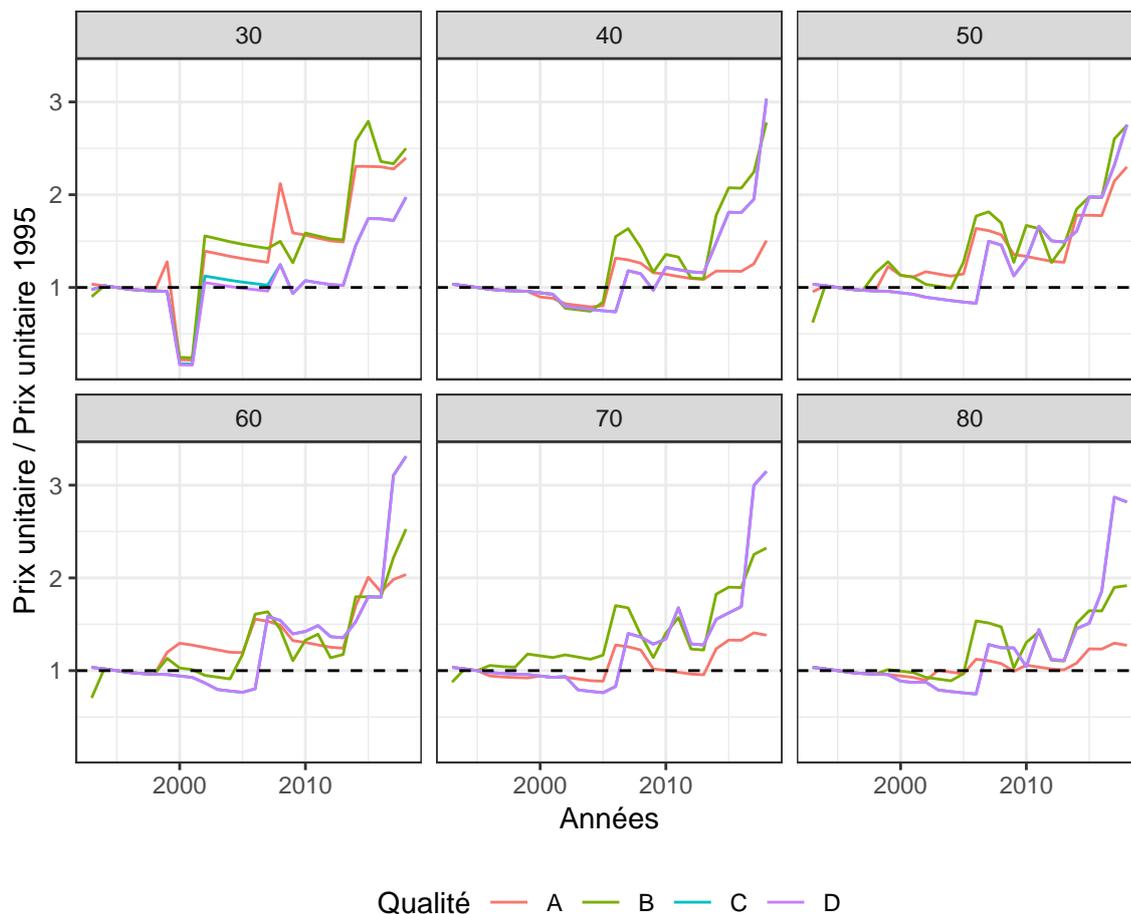


FIGURE 1.2 – Variation relative des cours du chêne

La figure 1.2 montre les variations relatives des cours du chêne par classe de diamètre et qualité. Elle permet de constater que les prix des bois ont fortement diminué suite à la tempête de 1999, mais que depuis le milieu des années 2000, la tendance est à la hausse pour toutes les qualités et dimensions. La hausse relative est d'autant plus forte que les bois sont de mauvaises qualités. Globalement les prix des petits diamètres varient plus que ceux des gros diamètres où les marchés pour les bois de chêne de bonne qualité sont bien installés. Actuellement, le marché des bois de chêne est à la hausse par rapport aux années 1990. Depuis 2013, une hausse s'observe sur les prix des grumes de chêne. L'augmentation de prix est plus forte concernant les plots et merrains, mais il y a également une demande soutenue à l'export de bois de qualité moyenne. En 2013, le secteur des ouvrages de tonnellerie est dans une vague favorable. Les exportations, aussi bien en volume qu'en valeur, augmentent dont les premiers demandeurs sont les Etats-Unis. Cette hausse se poursuit encore aujourd'hui (voir figure 1.2).

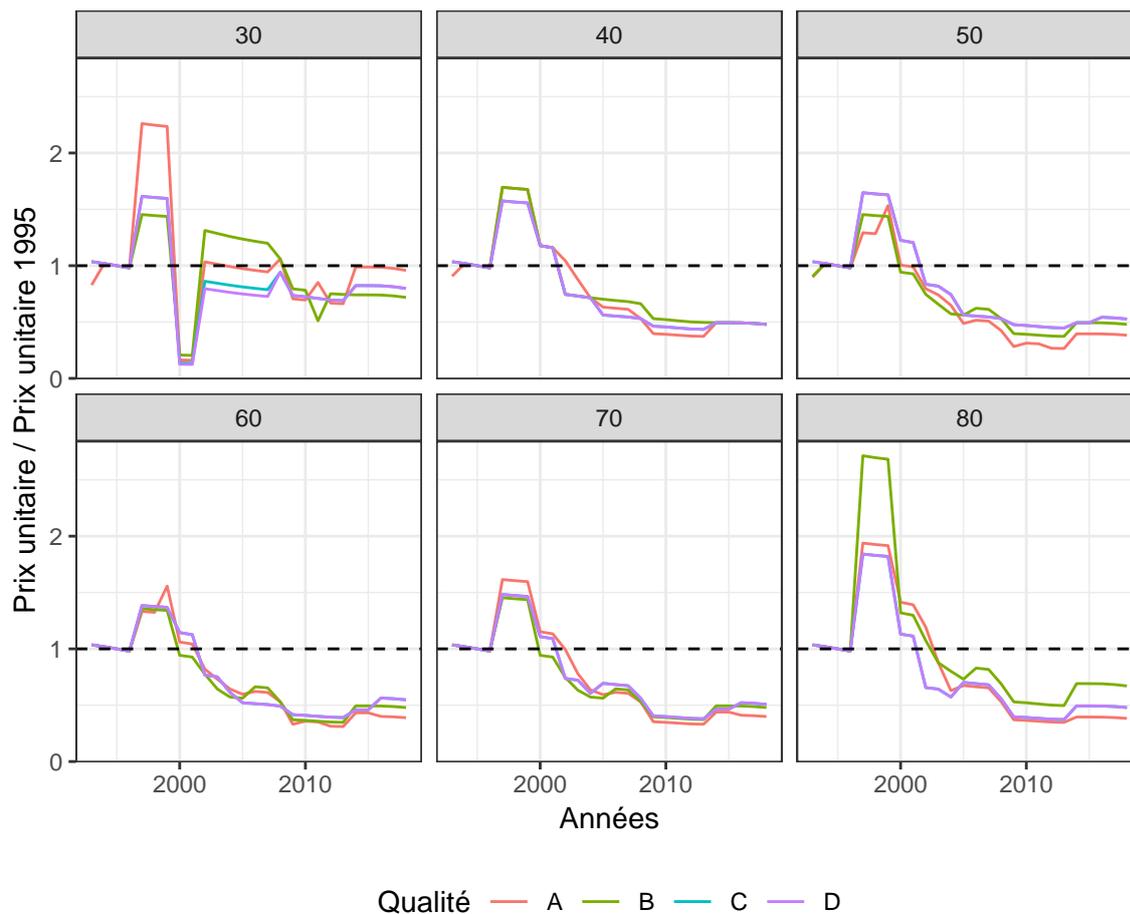


FIGURE 1.3 – Variation relative des cours du hêtre

Le hêtre se valorisait très bien avant la tempête de décembre 1999. Notamment au cours des années 90, la demande en sciage de hêtre de la part de la Chine dominait très fortement les exportations françaises. La tempête de 1999 entraînant la mise sur le marché de volumes très importants de hêtre, l'essence s'est dévalorisée et les prix se sont effondrés. Depuis 2013, la tendance pour les prix des sciages feuillus est à la hausse. Les sciages de hêtre en profitent aussi, comme nous pouvons le voir sur la figure 1.3 avec une légère augmentation du ratio, même si les prix restent bien inférieurs à ceux d'avant 1999.

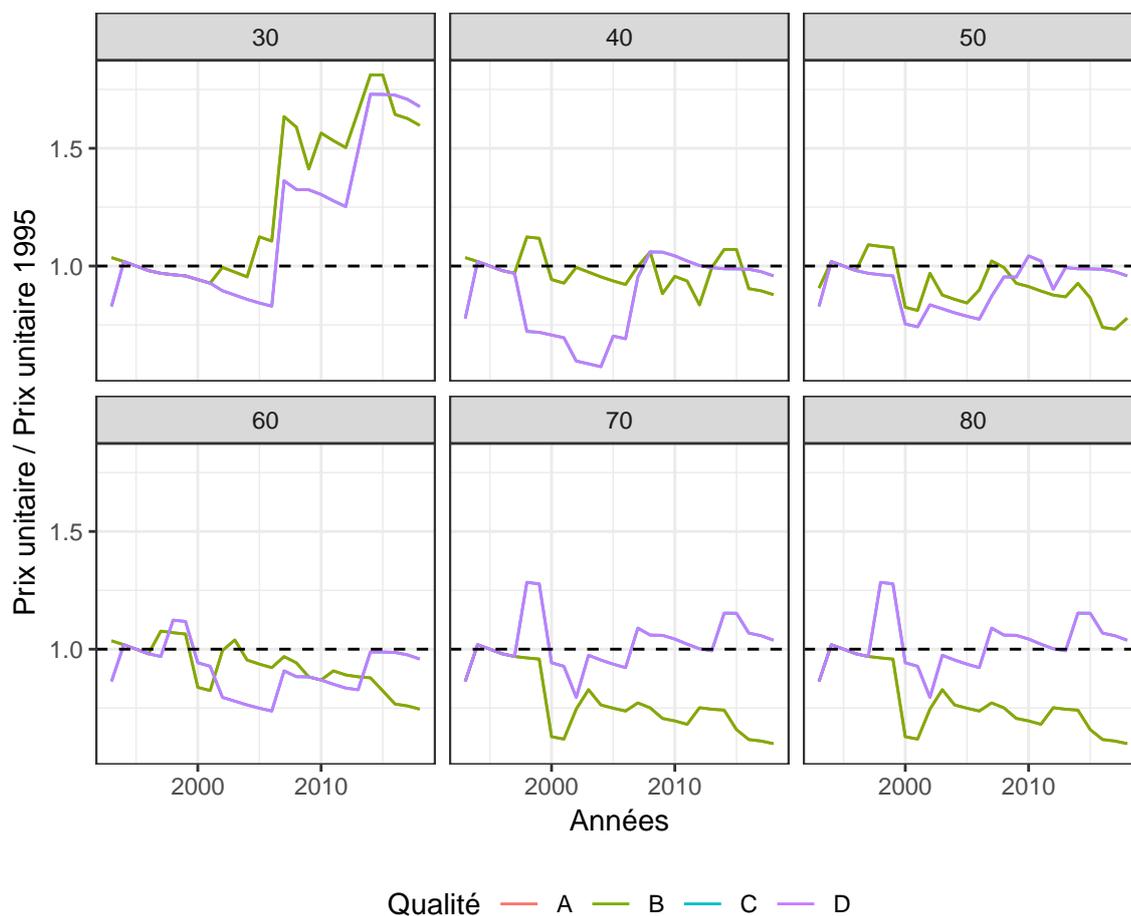


FIGURE 1.4 – Variation relative des cours du douglas

Le même type de courbe peut être fait dans le cas du douglas (voir figure 1.4). Elle montre un comportement assez différent entre les bonnes et les mauvaises qualités, particulièrement pour les gros diamètres. Pour la classe de diamètre 30, une forte hausse des prix du bois a lieu à partir de 2005. Les cours des gros bois de douglas est relativement stable depuis les années 2010.

De manière générale, plusieurs phénomènes peuvent avoir une influence sur le marché du bois national, notamment les politiques nationales ou européennes qui depuis quelques années cherchent à dynamiser la filière forestière.

A titre d'exemple, le plan «Immeubles de grande hauteur en bois», en 2013, vise à inciter le secteur de la construction à utiliser la ressource forestière. En 2015, la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte cherche à valoriser la biomasse forestière. Cette politique a permis la montée en puissance de l'utilisation du bois-énergie. C'est ainsi que l'on peut observer sur les prix des petits diamètres et des qualités moyennes des tendances à la hausse.

Aujourd'hui, la conscience environnementale des consommateurs est aussi un phénomène qui influence le marché du bois national notamment en faveur d'approvisionnements locaux et de bois certifiés.

La situation à l'extérieur des frontières françaises explique aussi une grande part des tendances observées du marché du bois. En 2014, la situation économique mondiale est favorable avec une croissance soutenue et un marché de la construction neuve dynamique aux Etats-Unis, en Asie (Chine, Japon) et en Europe. La demande accrue en bois brut de la part de la Chine influence également de manière grandissante le marché du bois national (Ministère de l'Agriculture de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2014, 2016).

Enfin, les conditions météorologiques ou des phénomènes climatiques non prévisibles peuvent impacter par-

fois sur le long-terme le marché national (crise des prix du hêtre suite à la tempête de 1999).

Après avoir vérifié la cohérence des hypothèses avec les tendances des cours du bois, de nouvelles variables économiques ont été définies en utilisant le coefficient de variation, précédemment défini.

La valeur de consommation se calcule alors en multipliant la valeur de consommation fixe par le coefficient de variation correspondant.

$$V'_c = Vol \times PU_{fixe} \times Coef = V_c \times Coef \quad (1.8)$$

Pour les années entre deux inventaires, la valeur de consommation a été approchée en considérant le volume de l'arbre au premier inventaire et son accroissement en volume calculé sur la période. Pour la première période, entre le premier et le deuxième inventaire, et la dernière période, un accroissement par défaut a été considéré.

Pour la valeur potentielle, le gain annuel d'un arbre a été redéfini en considérant la variation de prix lors du passage à la classe supérieure. De la même manière qu'avec une mercuriale de prix fixes, la valeur potentielle peut être calculée de manière instantanée ou périodique.

La valeur potentielle instantanée s'écrit :

$$V'_p = \frac{\delta'_{arbre}}{r} \quad (1.9)$$

où :

$$\delta'_{arbre} = Coef \times (\delta_{arbre} + \frac{\ln \frac{CoefSup}{Coef}}{5} \times V_c \times AcctD) \quad (1.10)$$

Sur une période, la valeur potentielle entre deux inventaires aux instants t_1 et t_2 peut se calculer de la manière suivante :

$$\begin{aligned} V'_{pt_2} - V'_{pt_1} &= \frac{V'_{c_2} - V'_{c_1}}{(t_2 - t_1) \times r} \\ &= \frac{V_{c_2} \times Coef_2 - V_{c_1} \times Coef_1}{(t_2 - t_1) \times r} \end{aligned} \quad (1.11)$$

La mercuriale de prix annuels permet d'affiner le suivi économique et de voir les variations de la valeur patrimoniale en fonction du marché des bois.

1.3.3 Apport des nouvelles variables économiques pour l'évaluation des recettes issues des dispositifs

Depuis l'installation des dispositifs, l'AFI suit le bilan financier de ceux-ci. Les données de recettes et de dépenses sont fournies par les gestionnaires. Les recettes issues des coupes sont répertoriées et calculées en fonction des volumes et prix unitaires indiqués par le gestionnaire. La mercuriale de prix annuels et les valeurs de consommation calculées annuellement par dispositif grâce aux données d'inventaire issues des placettes permanentes permettent de comparer la recette réellement perçue issue d'une coupe et la recette basée sur les prix du marché. Une comparaison de ces recettes constitue un outil d'évaluation pour le gestionnaire et permet de situer la recette perçue par rapport au marché du bois. La recette de la coupe peut être calculée également par la mercuriale de prix fixes. A la valeur de consommation est appliqué $\delta \times n$ qui représente l'accroissement en valeur entre la date de l'inventaire AFI et l'année de la coupe.

$$Recette = \sum (V_{c_i} + \delta \times n) \quad (1.12)$$

Avec :

- δ , l'accroissement en valeur de l'arbre, exprimé en €/an.
- n, le nombre d'années entre l'inventaire et la coupe.

1.4 Valorisation de la double comptabilité : synthèse des résultats par dispositif

Les résultats de suivi économique d'après les deux mercuriales pour quelques dispositifs parmi les plus anciens du réseau seront analysés. Le dispositif 5, riche en chêne, le dispositif 6, riche en hêtre et le dispositif 44, peuplement mélangé. Les variables économiques présentées sont actualisées en euros constants de l'année 2018.

1.4.1 Dispositif 5

Le dispositif 5 est l'un des plus anciens du réseau AFI. C'est l'un des exemples de gestion en irrégulier de peuplement de chênes sessile et pédonculé sur sols hydromorphes. Cet ancien taillis-sous-futaie est géré depuis 1989 en futaie irrégulière en essayant d'augmenter la qualité individuelle des arbres.

1.4.1.1 Résultats

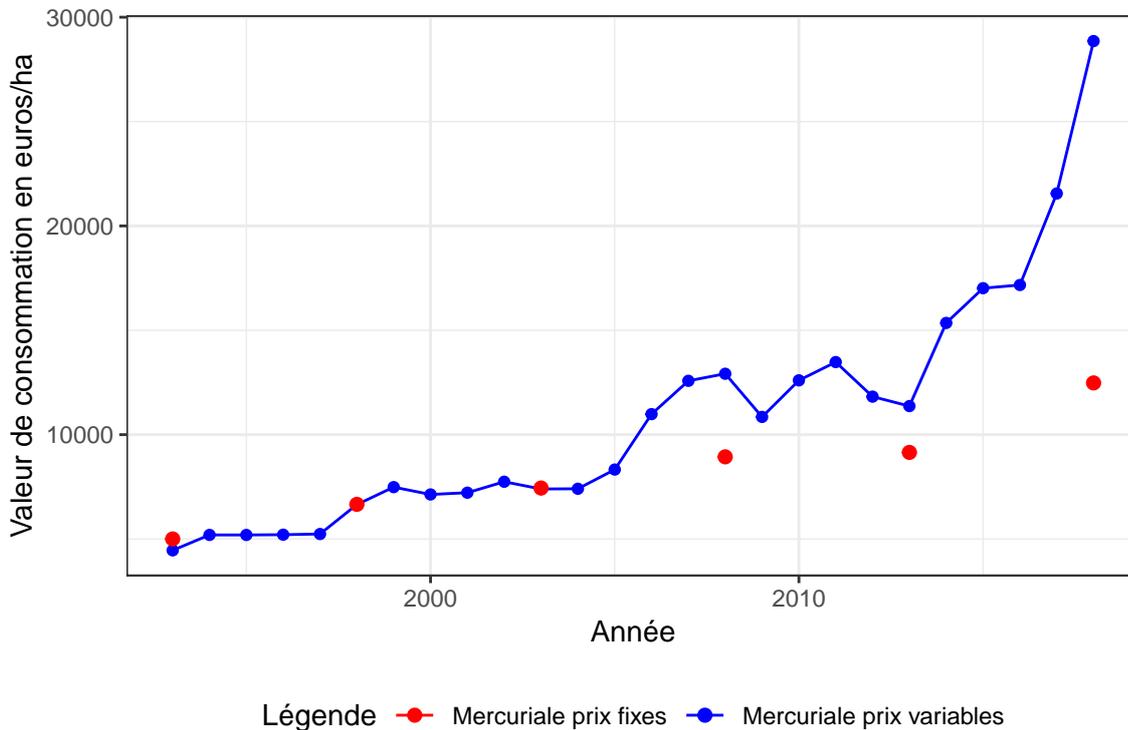


FIGURE 1.5 – Evolution de la valeur de consommation suivant les deux mercuriales pour le dispositif 5

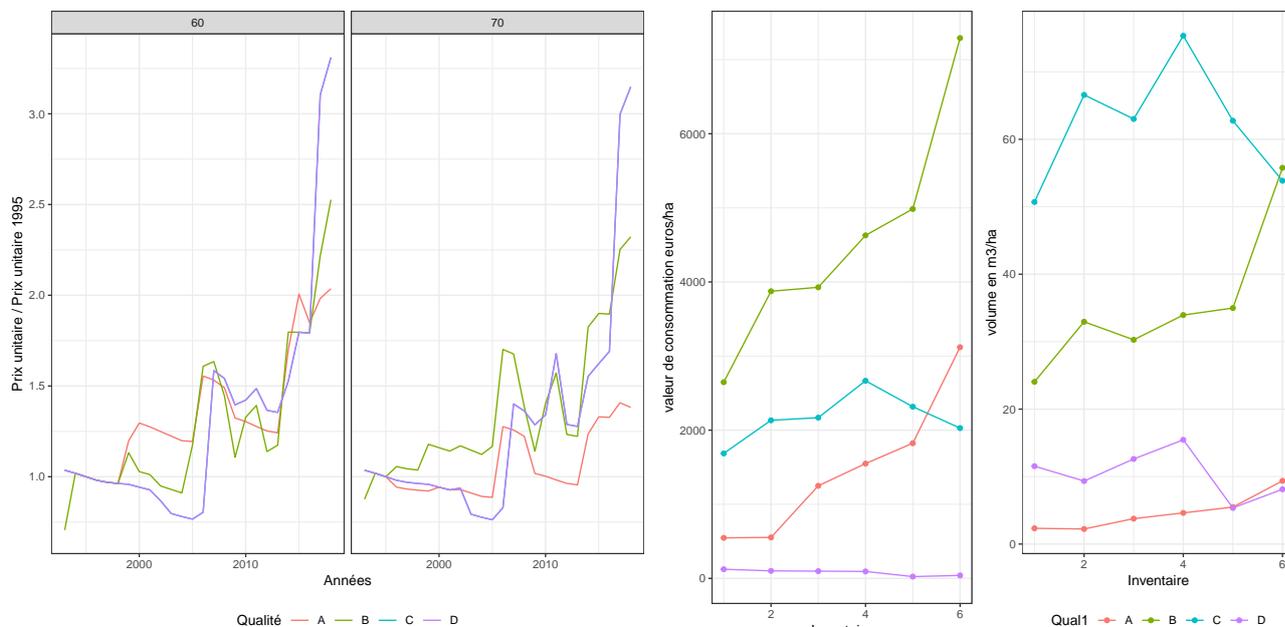


FIGURE 1.6 – Evolution des stocks, en volume et valeur, avec la mercuriale AFI et évolution du marché pour le dispositif 5

Le tableau suivant récapitule les recettes issues des coupes de bois d'oeuvre du dispositif. Sur la période de suivi (1993-2018), deux coupes de bois d'oeuvre ont eu lieu, en 2000 et en 2009. Des chênes exploités ont été inventoriés aux cycles 2 et 4, ce qui a permis de faire le lien entre les données de recettes réelles et celles de l'inventaire. Au cycle 2, un chêne de qualité moyenne et de classe de diamètre 25 n'a pas été considéré dans le calcul des recettes et au cycle 4, un chêne de qualité D et de classe de diamètre 35.

TABLE 1.6 – Evaluation des recettes de coupes bois d'oeuvre du dispositif 5

	Année	Vente réelle	Vente AFI	Vente Forêt Privée
Volume (m ³)	2000	97,9	127,4	127,4
Recette (€)	2000	6 571	7 439	7 007
Prix moyen (€/m ³)	2000	67,1	58,4	55
Volume (m ³)	2009	120,9	166,3	166,3
Recette (€)	2009	11 459	17 218	20 409
Prix moyen (€/m ³)	2009	94,8	103,5	122,7

1.4.1.2 Analyse

Le volume à l'hectare des qualités A et B a fortement augmenté, contrairement à ceux des qualités C et D. Sur les 25 ans de suivi, la qualité B a doublé passant de 22 m³/ha à plus de 50 m³/ha témoignant de la gestion qualitative de ce dispositif (voir figure 1.6). Au départ du suivi, le peuplement était dominé par les bois moyens qui représentaient environ 50 % de la surface terrière. Le gestionnaire a mené une capitalisation progressive des gros bois et très gros bois, qui représentent actuellement 50 % de la surface terrière dont 11 % correspondant à la part de très gros bois. Les gros bois et très gros bois de chêne représentent 70 % des meilleures qualités. La figure 1.5 montre l'évolution de la valeur du patrimoine du dispositif. Sur les dix premières années de suivi, l'évolution de la valeur de consommation calculée par la mercuriale de prix variables (points bleus) est

confondue avec celle calculée par la mercuriale de prix fixes (points rouges). A partir de l'année 2005, l'estimation de la valeur du peuplement d'après la mercuriale variable est plus élevée qu'avec la mercuriale fixe. A partir de 2013, l'écart d'estimation entre les deux mercuriales est de plus en plus important. L'augmentation progressive de la valeur de consommation fixe est expliquée par la capitalisation dans les gros bois et très gros bois menée dans le peuplement mais aussi par la concentration de la qualité dans ces tiges (voir figure 1.6). Les valeurs de consommations fixes reflètent l'effet de la sylviculture pratiquée par le gestionnaire. L'augmentation fulgurante de la valeur de consommation du peuplement basée sur les prix du marché de chêne est due à l'augmentation des prix des gros bois et très gros bois de chêne à partir de l'année 2005 (voir figure 1.6). En effet, les prix des chênes de classes 60 et 70 sont multipliés par 1,5 jusqu'à 3 à partir de l'année 2005. Pour ce dispositif, les prix pratiqués par l'AFI sont cohérents avec les prix du marché sur les dix premières années mais ensuite, ils sous-estiment largement la valeur marchande du peuplement. La figure 1.5 permet de mettre en évidence deux effets distincts : l'un lié à la sylviculture et l'autre lié au marché.

D'après le tableau 1.6, le prix moyen du mètre cube auquel s'est vendue la coupe de 2000 est d'environ 67 €/m³, de 58 €/m³ avec les prix fixes et 55 €/m³ d'après la mercuriale de prix variables. Le gestionnaire a vendu sa coupe à un prix moyen supérieur à la tendance du marché. En 2009, les prix moyens pour la recette constatée et celles estimées par la mercuriale fixe et variable sont respectivement d'environ 95 €/m³, de 104 €/m³ et 123 €/m³. Le prix de vente réel est en dessous des estimations faites par les estimations des mercuriales. Les prix du chêne en 2009 ont légèrement chuté expliquant peut-être cette différence de prix entre la recette réelle et estimée par la mercuriale de prix variables.

1.4.1.3 Comparaison avec le dispositif 15

La chênaie sur milieu hydromorphe du dispositif 15 est suivie depuis quinze ans par l'AFI. Ce peuplement est traité en irrégulier depuis 1989, et issu d'un taillis-sous-futaie. Ce peuplement dominé par les petits bois et bois moyens a été capitalisé et est maintenant dominé par les bois moyens gros bois.

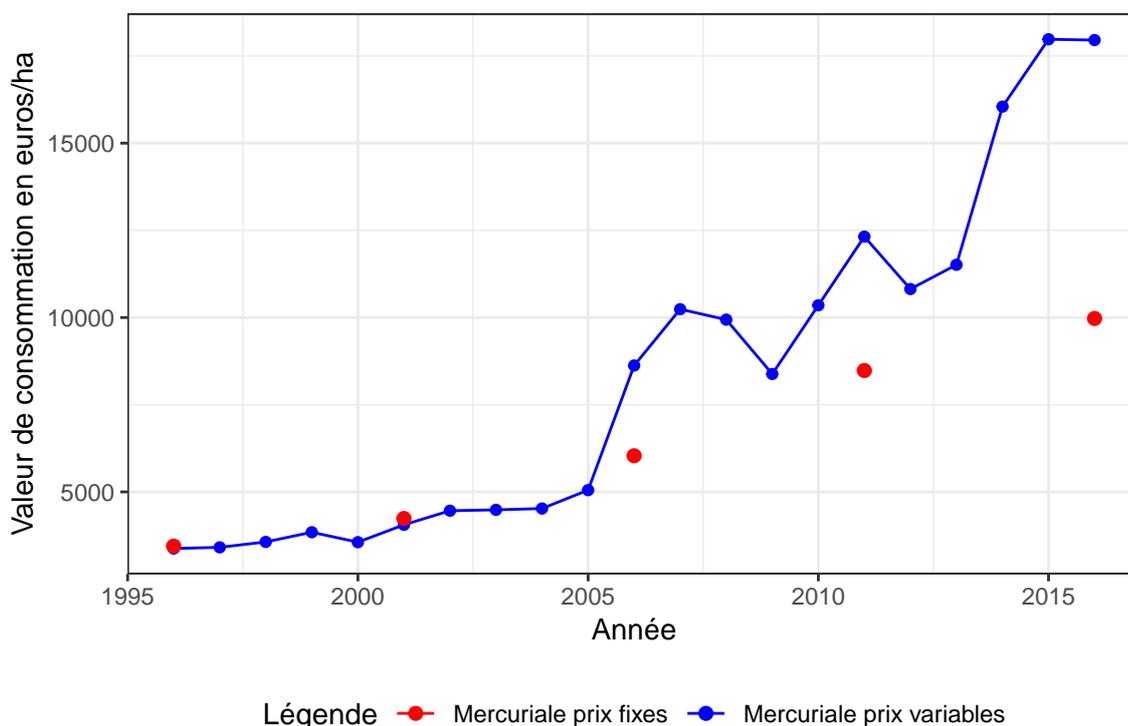


FIGURE 1.7 – Evolution de la valeur de consommation du dispositif 15 suivant les deux mercuriales

Le peuplement de ce dispositif est actuellement dominé par les bois moyens et gros bois. La capitalisation progressive qui était recherchée au début doit être maintenue à niveau. Les prix pratiqués par l'AFI sont en cohérence avec les prix du marché sur les neuf premières années de suivi. Même si la valeur de consommation calculée avec les prix fixes traduisant la capitalisation menée dans le peuplement, la valeur marchande liée à la sylviculture reste largement sous-estimée au regard de la valeur marchande liée au marché. Les écarts sont particulièrement importants illustrant la forte variabilité des prix des petits diamètres de chênes. En 2018, la valeur de ce peuplement, qui est en structure plus jeune que le dispositif 5, est proche de la valeur du peuplement du dispositif 5 en 2015-2016.

1.4.2 Dispositif 6

Le dispositif 6 est l'un des plus beaux exemples de gestion irrégulière de hêtre dans le Nord-Est de la France. Le peuplement issu d'une gestion en futaie sur taillis est traité en irrégulier depuis 1975.

1.4.2.1 Résultats

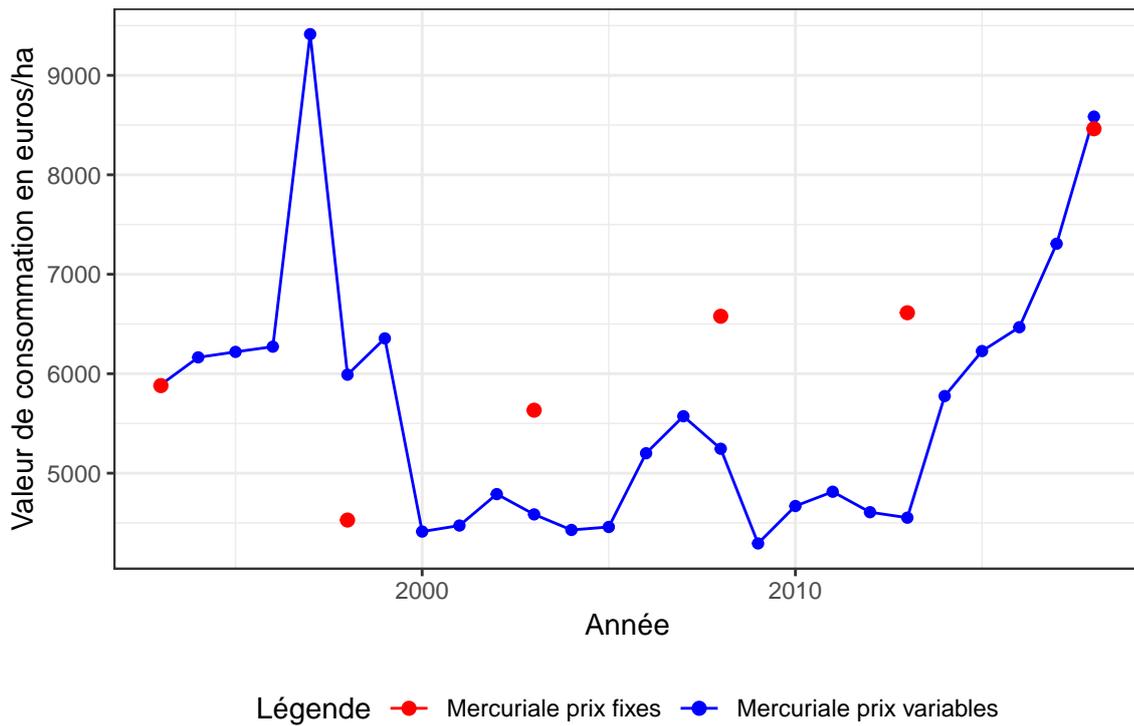


FIGURE 1.8 – Evolution de la valeur de consommation suivant les deux mercuriales pour le dispositif 6

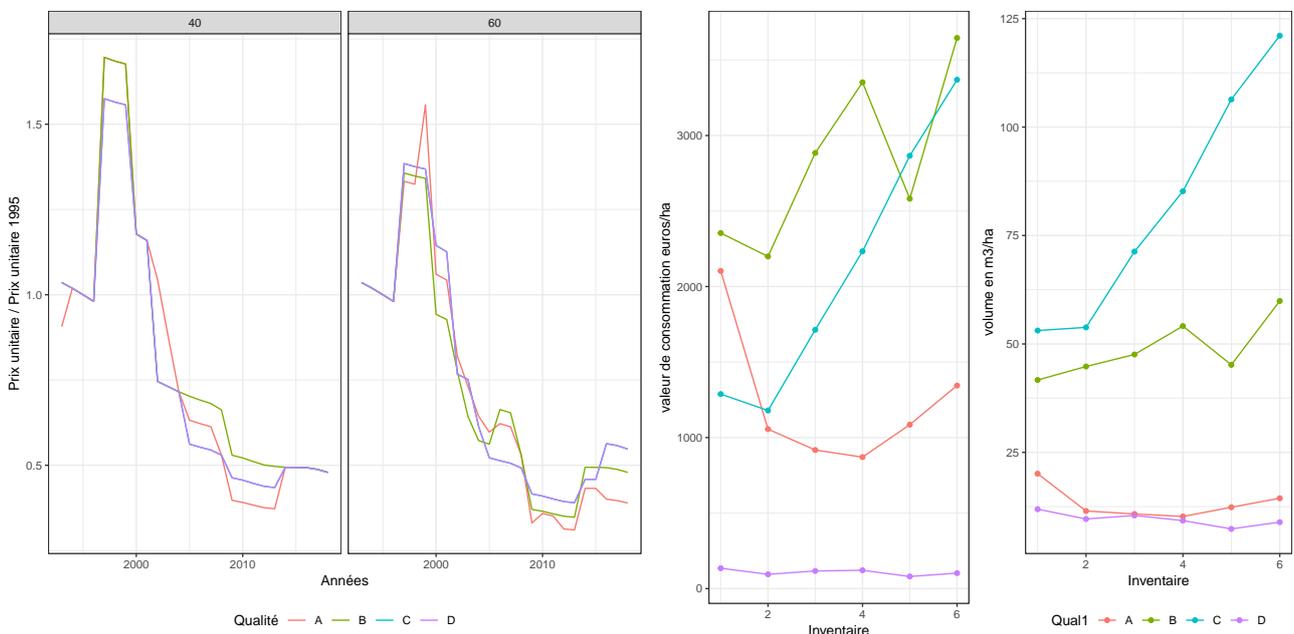


FIGURE 1.9 – Evolution des stocks, en volume et valeur, avec la mercuriale AFI et évolution du marché pour le dispositif 6

Le tableau suivant compare les recettes de bois d'oeuvre de hêtre estimées par les deux mercuriales de prix et le suivi économique réel. Les rotations sont de 10 ans et sur la période de suivi, une seule a été effectuée en 2007 ainsi qu'une vente de chablis en 1993. Les autres coupes sont des coupes intermédiaires de petit bois et bois moyens.

TABLE 1.7 – Evaluation des recettes de coupes bois d'oeuvre du dispositif 6

	Année	Vente réelle	Vente AFI	Vente Forêt Privée
Volume (m ³)	1993	345	400	400
Recette (€)	1993	41 765	25 402	26 237
Prix moyen (€/m ³)	1993	121	63,5	65,6
Volume (m ³)	2007	209	266,5	266,5
Recette (€)	2007	13 520	14 547	9 453
Prix moyen (€/m ³)	2007	64,7	54,6	35,5

1.4.2.2 Analyse

La figure 1.8 montre l'évolution de la valeur de consommation du dispositif 6 suivant les deux mercuriales. La valeur de consommation calculée sur la mercuriale de prix variables correspond bien à celle de 1995, année de référence. La valeur de consommation fixe calculée tous les cinq ans ne permet pas de voir les variations inter-annuelles, contrairement à la valeur de consommation variable. Avant 1999, les prix du hêtre étaient élevés d'où une valeur marchande du dispositif forte. A partir de 1999, la valeur de consommation fixe augmente au cours du temps alors que celles calculées avec les prix du marché restent inférieures aux estimations de l'AFI entre 2000 et 2013, puis la valeur de consommation augmente à partir de 2014 (voir figure 1.8). Sur les inventaires 2 à 5 (voir figure 1.9), la part des individus de qualité A et B est restée stable mais les prix des hêtres étant très bas, cela explique l'évolution de la valeur de consommation variable. La valeur de consommation fixe à l'inventaire de 1998 (deuxième inventaire) est faible (moins de 5 000 €/ha) car une coupe sanitaire a été réalisée en début de période prélevant des gros bois de qualité (risque de dépréciation). La valeur de consommation fixe qui augmente à partir des années 2000 est due à la capitalisation progressive suite à la coupe et à la part de sapin de qualité C dans le peuplement (de 2 % de la surface terrière à 26 %, voir figure 1.9). Le sapin peut également expliquer la remontée de la valeur de consommation variable observée à partir de l'année 2014 compensant en partie la valeur des hêtres. En effet, les prix des hêtres de classes 40 et 60 ont légèrement remonté à partir de 2014 (voir figure 1.9). Ainsi, les fluctuations de la valeur de consommation fixe (points rouges) sont le reflet de l'évolution du matériel sur pied alors que les fluctuations de la valeur de consommation variable (points bleus) sont avant tout liées aux fluctuations des cours du hêtre.

En 1993, les recettes réelles ont été d'environ 121 €/m³ et les recettes estimées par les deux mercuriales fixes et variables sont respectivement de 63,5 €/m³ et 65,6 €/m³ (voir tableau 1.7). Le gestionnaire a bien profité des cours favorables de hêtre pour vendre sa coupe, presque au double de la tendance du marché. En 2007, les recettes estimées par la mercuriale de prix fixes et variables sont respectivement de 54,6 €/m³ et 35,5 €/m³ et la recette réellement perçue est de 64,7 €/m³. Le prix moyen cette coupe a été divisé par deux par rapport au prix moyen de la coupe en 1993. Cela est cohérent avec les prix moyens des deux coupes estimés par la mercuriale de prix variables qui ont également été divisés par deux. Mais le gestionnaire, au regard de la tendance du marché, a très bien vendu sa coupe et a su valoriser ses bois.

1.4.3 Dispositif 44

Le dispositif 44 a été l'un des premiers à être installé en Picardie, sur des milieux très fertiles. Ce dispositif a été retenu pour l'ancienneté de sa gestion en irrégulier (début 1984 sur d'anciens-taillis-sous-futaies), la gestion

de la qualité et une comptabilité analytique très précise. Le peuplement est mélangé avec une dominance du chêne pédonculé, de l'érable sycomore et du frêne. Toutes les essences, principales et secondaires, sont considérées comme des essences objectif et de valeur.

1.4.3.1 Résultats

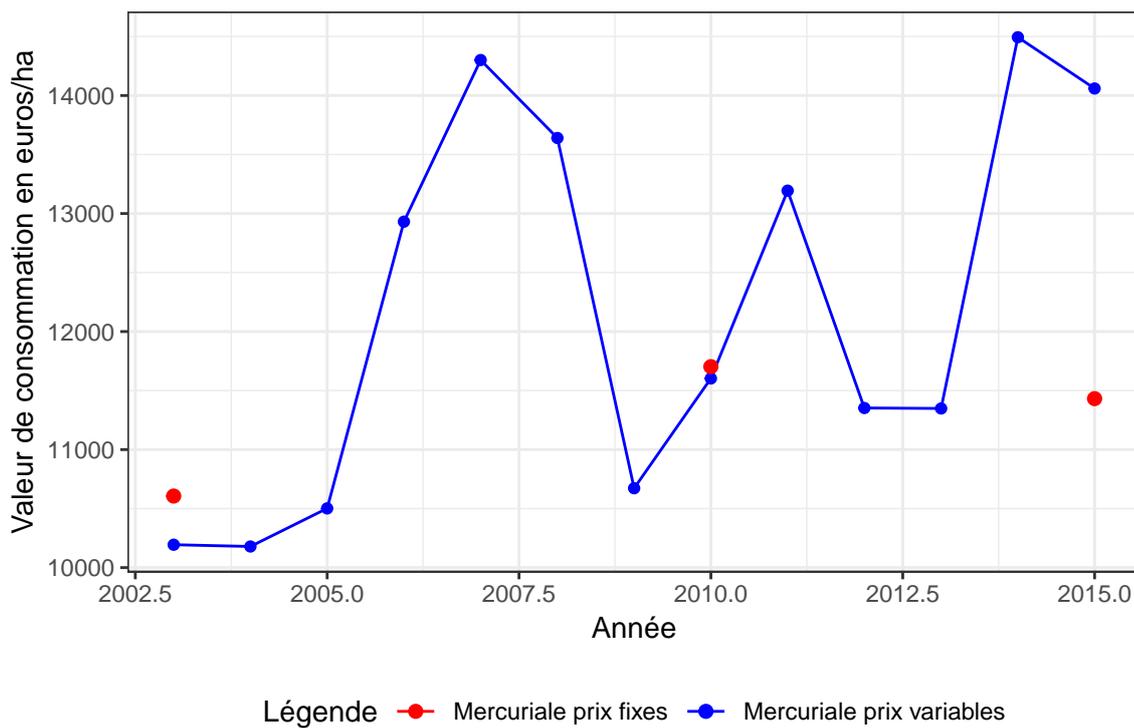


FIGURE 1.10 – Evolution de la valeur de consommation suivant les deux mercuriales pour le dispositif 44

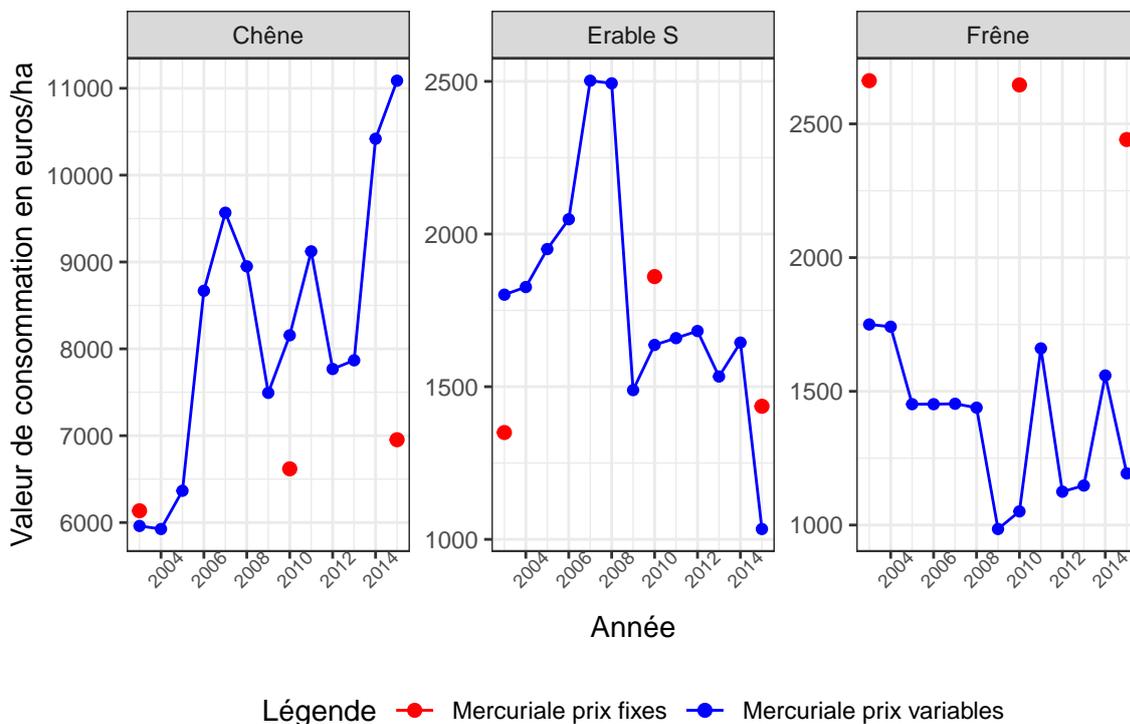


FIGURE 1.11 – Evolution de la valeur de consommation pour les essences principales

Les recettes réelles des coupes vendues issues de ce dispositif sont détaillées par essence et qualité. Sur la période de suivi, deux interventions ont été faites au cycle 1, en 2006 et au cycle 2, en 2014. Pour la coupe de bois d'oeuvre, les recettes ne sont pas ventilées par essence et qualité.

TABLE 1.8 – Evaluation des recettes de coupes bois d'oeuvre du dispositif 44

	Année	Vente réelle	Vente AFI	Vente Forêt Privée
Volume (m ³)	2006	325	210	210
Recette (€)	2006	33 002	17 578	17 680
Prix moyen (€/m ³)	2006	101,5	83,9	84,4
Volume (m ³)	2014	179	156	156
Recette (€)	2014	23 076	18 951	14 517
Prix moyen (€/m ³)	2014	129	122	93,4

Le tableau ci-dessous détaille pour la recette réelle constatée et les recettes estimées, les prix moyens au mètre cube par essence.

TABLE 1.9 – Evaluation du prix moyen de la recette de la coupe de bois d’oeuvre de 2006 ventilée par essence du dispositif 44

Essence	Qualité	Prix moyen réel (m ³ /ha)	Prix moyen AFI (m ³ /ha)	Prix moyen Forêt Privée (m ³ /ha)
Aulne	C	63,5	14,7	20,3
Châtaignier	B	-	76,1	151
Châtaignier	C	80,8	-	-
Chêne	B	346	213	346
Chêne	AB	438,5	-	-
Chêne	BC	173	-	-
Erable S	C	242	65,1	63
Erable S	CD	150	-	-
Erable S	D	34,6	17,2	19
Frêne	A	277	168	97,8
Frêne	B	144	60,3	28,1
Frêne	C	80,8	29,5	14
Frêne	BC	103,9	-	-
Frêne	D	34,6	-	-
Hêtre	C	80,8	47,7	33
Hêtre	D	34,6	-	-

1.4.3.2 Analyse

La figure 1.10 montre la valeur de consommation du peuplement d’après les deux mercuriales. La valeur de consommation du peuplement estimée par la mercuriale de prix fixes est plutôt stable sur la période et en moyenne de 11 000 €/ha. La valeur de consommation variable est très fluctuante sur la période de suivi avec parfois des écarts assez importants d’une année sur l’autre (10 500 €/ha en 2005 puis 13 000 €/ha en 2006). Le peuplement étant mélangé, la valeur de consommation intègre les valeurs de toutes les essences dont les cours n’ont pas les mêmes comportements face au temps.

La figure 1.11 donne le détail pour les trois essences principales : le chêne pédonculé, l’érable sycomore et le frêne. Les trois essences sont présentes en parts quasiment égales dans le peuplement (en 2015, 20 % de frêne, 21 % d’érable et 27 % de chêne pédonculé en termes de surface terrière) et la qualité est resté stable sur la période de suivi. La valeur de consommation fixe des trois essences est donc expliquée par les niveaux de matériel sur pied.

Pour le frêne, les écarts d’estimations des valeurs de consommation sont assez importants. La mercuriale de prix fixes sur-estimant la valeur liée à cette essence. Une part d’explication réside dans le fait qu’en 1995, lors de la construction de la base de prix de l’AFI, les prix du frêne étaient très élevés et cette essence est très volatile.

Pour le chêne pédonculé, les cours du bois de chêne font augmenter très fortement la valeur liée à cette essence.

L’effet lié à la sylviculture est constant sur la période de suivi, c’est-à-dire que la sylviculture pratiquée est indépendante des crises sur les cours du bois. Le peuplement du dispositif 44 illustre aussi l’intérêt des mélanges. Les cours du chêne étant élevés, ils permettent d’absorber les fluctuations des cours du bois des autres essences. La qualité de ce peuplement permet de plus, de bien réagir aux modes du marché du bois.

La coupe de 2006 a été vendue à un prix moyen d’environ 102 €/m³ ce qui est mieux que les prix estimés par les mercuriales de prix fixes et variables (respectivement de 84 €/m³ et 84,4 €/m³, voir tableau 1.8) et il en est de même pour la vente de la coupe de bois d’oeuvre de 2014. Le gestionnaire a bien vendu ses coupes par rapport au marché. Le tableau 1.9 donne le détail du lot par essence et qualité. Le suivi économique réel étant plus détaillé que les inventaires et concernant l’ensemble de la forêt du Régnaval, certaines essences et

qualités n'ont pas de correspondance avec les arbres inventoriés comme étant exploités. Les prix moyens réels de la coupe sont quasiment toujours au-dessus des prix estimés par ceux de la mercuriale de prix variables. La gestion qualitative pratiquée indépendante du marché permet au gestionnaire de vendre très bien les bois. A titre d'exemple, le gestionnaire possède de bons débouchés pour l'aulne qui s'est vendu presque le triple du prix estimé par la mercuriale variable (63,5 €/m³ perçus contre 20,3 €/m³ estimés). Le chêne de qualité B s'est vendu à un prix normal au regard des tendances du marché. La différence sur le total de la recette se fait sur les essences secondaires. De manière générale, le gestionnaire vend ses bois de moyenne qualité à des prix moyens estimés pour de belles qualités. Par exemple, pour le frêne de qualité B, son prix moyen réellement perçu est de 144 €/m³ et les prix estimés par les mercuriales fixes et variables pour le frêne de qualité A sont respectivement de 168 €/m³ et 97,8 €/m³. Cet exemple montre que pour des essences, même secondaires, dès lors que les qualités sont bonnes, les prix de vente peuvent être bien supérieurs aux tendances du marché.

1.5 Discussion

Etablir une correspondance entre deux mercuriales n'a pas été simple. J'ai dû formuler de nombreuses hypothèses en m'appuyant sur les connaissances actuelles et à dire d'expert de Julien Tomasini. Des essences n'apparaissent pas encore dans la grille de prix variables, plus particulièrement le cèdre. Les dispositifs de cèdre sont très récents mais à l'avenir, il faudrait trouver des données pour compléter la mercuriale de prix variables.

Les résultats avec la mercuriale de prix variables permettent une meilleure correspondance, par rapport à la réalité du marché, des estimations de la valeur patrimoniale du capital forestier. Cela ressort notamment avec les dispositifs de chêne qui sont largement sous-évalués avec la grille de prix fixes, si l'on tient compte de la situation actuelle du marché. Nous voyons bien ici, l'intérêt d'une mercuriale de prix variables. Néanmoins, la grille de prix fixes établie en 1995 par l'AFI garde tout son intérêt. En effet, l'effet de la sylviculture sur la valeur du capital forestier reste déterminante.

Ainsi, il convient de conserver cette grille. L'AFI dispose à présent d'une grille de prix variables qui répond à des enjeux économiques et d'une grille de prix fixes qui répond à des enjeux sylvicoles. Changer de grille de prix ferait perdre à la fois en cohérence et à la fois sur l'historique économique des dispositifs. Chacune de ces deux grilles sont donc d'intérêt et elles sont complémentaires.

La comparaison entre les recettes estimées à partir des deux mercuriales de prix et les recettes réelles est difficile à établir si l'on cherche un lien exact entre les inventaires et le suivi économique réel. En effet, il peut exister un décalage entre l'inventaire des bois exploités et la date de la vente. De plus, des incertitudes subsistent sur le mode de vente et les volumes considérés pour calculer la recette réelle. Cette comparaison est donc à considérer avec précaution bien qu'elle puisse servir d'indicateur pour le gestionnaire.

Pour ce stage j'ai utilisé une grille de prix issue de la Forêt Privée mais il serait tout aussi envisageable d'utiliser une autre grille (à condition qu'elle remplisse les attentes de l'AFI). A titre d'exemple, la forêt du Nouvion, en Picardie, gérée par l'expert forestier Evrard de Turckheim possède une comptabilité analytique très détaillée qui a permis de construire une autre grille de prix (confidentielle), depuis 2005, détaillée pour quelques essences par classes de diamètre et qualités. Bien que cette grille de prix reflète les tendances à un niveau local et dans un peuplement de qualité, la comparaison des résultats pourrait être intéressante.

Chapitre 2

Quantification et évolution du stock carbone au sein des dispositifs du réseau AFI

2.1 Introduction

Depuis quelques années le carbone en forêt est devenu un véritable sujet de recherche. En effet, la filière forêt-bois a un rôle important dans le cycle du carbone, à plusieurs titres : séquestration du dioxyde de carbone (CO₂) par les forêts, stockage du carbone dans les sols forestiers, stockage du carbone dans les produits bois, substitution à des énergies non renouvelables et à des matériaux énergivores. La forêt française capte au total 88 MtCO₂/an actuellement, ce qui représente environ 15 % des émissions de CO₂ annuelles du pays.

La France a mis en place une politique d'atténuation du changement climatique qui se matérialise par la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC). Avec le Plan National d'Adaptation au Changement Climatique, ils constituent les deux volets de la politique climatique française. Le gouvernement français entend atteindre la neutralité carbone d'ici l'horizon 2050, c'est-à-dire l'atteinte de l'équilibre entre les émissions anthropiques et les absorptions anthropiques de gaz à effet de serre (GES) qui comprennent notamment les émissions absorbées par les milieux naturels gérés par l'homme. Cependant à l'horizon 2050, certaines émissions apparaissent incompressibles, et pour atteindre la neutralité carbone, il s'agit de compenser ces émissions par des puits de carbone. Pour le secteur forestier, cela signifie notamment une gestion durable de la forêt et une meilleure valorisation des produits bois récoltés (Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2018).

Le label Bas-Carbone publié en novembre 2018 par le gouvernement s'intègre dans la SNBC. Il permet d'apporter un cadre juridique et technique aux entreprises, collectivités et forestiers pour construire des projets carbone en forêt. Il est issu d'un long travail en amont d'un collectif d'acteurs, dont l'Institut de l'économie pour le climat (I4CE) et le Centre National de la Propriété Forestière (CNPF).

Le label Bas-Carbone certifie trois types de réductions d'émissions, qui peuvent être utilisées pour la compensation volontaire¹ des émissions d'acteurs non étatiques. Les réductions d'émissions «effectuées» où la certification est faite après leur réalisation dans le périmètre du projet, les réductions d'émissions «anticipées» où la certification est faite avant leur réalisation effective dans le périmètre du projet. Dans le cas des projets forestiers, les réductions d'émissions anticipées visent à prendre en compte le temps de croissance des arbres et le besoin d'aide financière pour le porteur du projet au début du projet, notamment pour des travaux sylvicoles. Le troisième type de réduction d'émissions est la réduction des émissions indirectes, qui

1. La compensation volontaire consiste à financer un projet de réduction ou de séquestration d'émissions de GES dont on n'est pas directement responsable (Ministère de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, 2012)

ne concernent pas le périmètre du projet et ne sont pas la conséquence directe de celui-ci. Elles sont liées à la «chaîne de valeur complète des activités couvertes par le Projet»². Dans le cadre des projets forestiers, elles permettent de prendre en compte l'effet de substitution si les produits bois sont utilisés à la place de matériaux plus énergivores ou d'énergies fossiles.

Les projets carbone doivent s'inscrire dans une méthode annexée au label Bas-Carbone qui définit les critères de qualité à suivre pour donner lieu à une certification de réductions des émissions de GES.

Un des principaux critères de qualité est l'additionnalité. Pour que le projet soit certifié, le porteur doit démontrer que celui-ci ne se serait pas fait sans les financements de l'acteur qui souhaite compenser ses émissions. Pour démontrer l'additionnalité du projet, la méthode définit un scénario de référence auquel est comparé ensuite le projet. Seules les réductions d'émissions allant au-delà de ce scénario de référence sont reconnues par le label Bas-Carbone.

Actuellement, trois méthodes ont été publiées par le gouvernement³. Les trois méthodes rédigées par le CNPF décrivent le type de projet auquel elles s'appliquent et les étapes à suivre pour faire certifier le projet (critères d'éligibilité, scénario de référence, la démonstration d'additionalité, la méthode d'évaluation des réductions d'émissions...). La méthode «Boisement» concerne des projets de boisement sur friches ou terrains agricoles. La méthode «Conversion de taillis en futaie sur souches» concerne des taillis sur stations fertiles pour lesquels une conversion en futaie peut être envisagée. La troisième méthode, «Reconstitution de peuplements forestiers dégradés» permet de reboiser avec des essences adaptées à la station et au changement climatique des forêts touchées par des problèmes sanitaires, des tempêtes ou des incendies.

Tout acteur peut proposer et rédiger une méthode. Elle doit respecter les conditions fixées par l'arrêté et être ensuite validée par le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire (Grimault et Gleizes, 2019).

Dans ce chapitre, nous tenterons de répondre à plusieurs questions : quel est le stock de carbone dans les différents dispositifs AFI et comment se répartit-il dans les différents compartiments (biomasse aérienne, morte et racinaire)? Comment évolue-t-il au sein d'un peuplement géré en irrégulier, qu'est-ce qui le caractérise? La gestion en futaie irrégulière permet-elle d'optimiser la séquestration de carbone par rapport à une situation de référence?

Dans un premier temps, nous ferons un rapide point sur les différentes méthodes de calcul du stock carbone dans l'écosystème forestier, avant de les appliquer au réseau AFI et d'en analyser les résultats. A la fin du chapitre, nous donnerons des pistes de réflexion de l'AFI sur des méthodes forestières pouvant répondre au label Bas-Carbone puis nous appliquerons une des pistes proposées en suivant les étapes d'une méthode forestière du label.

2. Voir l'arrêté du 28 novembre 2018 définissant le référentiel du label Bas-Carbone, disponible en ligne au <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2018/11/28/TRER1818764A/jo/texte>

3. Disponible en ligne à l'adresse suivante : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/label-bas-carbone>

2.2 Estimation du stock carbone au sein des écosystèmes forestiers

Le carbone en forêt est stocké dans la biomasse aérienne, souterraine ainsi que dans le sol. Le tableau suivant tiré de Rossi *et al.* (2015) résume les quantités de carbone pour chacun des compartiments considérés.

TABLE 2.1 – Répartition du carbone dans les compartiments forestiers

	Dupouey & al., 2000		Buchholz & al., 2014		Luyssaert & al., 2008		Taverna & al., 2007		Lecocq & al., 2008	IFN, 2010
Biomasse aérienne	42 %		37 %		46 %		47 %		42 %	36 %
	<i>Bois fort, branches</i>	32 %	<i>Tronc, écorce</i>	23 %	<i>Biomasse aérienne</i>	17 %	<i>Tronc</i>	41 %		
	<i>Feuilles</i>	2 %	<i>Feuille, branches</i>	10 %	<i>Litière, bois mort au sol*</i>	29 %	<i>Bois mort debout</i>	4 %		
	<i>Sous-étage, nécromasse</i>	2 %	<i>Bois mort debout</i>	2 %			<i>Litière, bois mort au sol*</i>	1 %		
	<i>Litière*</i>	6 %	<i>Litière, bois mort au sol*</i>	2 %						
Biomasse souterraine	7 %		9 %				12 %		15 %	10 %
	<i>Racines</i>	7 %	<i>Racines</i>	9 %						
			<i>Racines mortes</i>	1 %						
Sol	51 %		54 %		54 %		42 %		43 %	54 %
	<i>0-10 cm</i>	26 %	<i>Horizons organiques</i>	10 %	<i>Horizons organiques, racines</i>	54 %				
	<i>10-20 cm</i>	16 %	<i>0-20 cm</i>	20 %						
	<i>20-30 cm</i>	9 %	<i>> 20 cm</i>	24 %						

D'une source à l'autre, la définition des différents compartiments peut différer mais la proportion du stock carbone dans la biomasse ou celle dans le sol restent assez stables. Environ la moitié du stock carbone est contenu dans le sol. La biomasse souterraine, comprenant les racines vivantes et mortes, contient environ 10 % du stock total de carbone en forêt. La biomasse aérienne stocke environ 40 % du stock total de carbone, dont la majeure partie se retrouve dans le bois vivant.

Plusieurs méthodes de calcul existent pour calculer les quantités de carbone de ces compartiments.

2.2.1 Le carbone dans la biomasse aérienne

La quantité de carbone dans la biomasse aérienne (bois, écorce, branches) dépend du volume, de l'infradensité de l'essence considérée et du taux de carbone dans la matière sèche.

$$\boxed{Quantite_{carbone} = Volume \times Infradensite \times Taux_{carbone}} \quad (2.1)$$

Le volume, exprimé en m³/ha, par l'infradensité sèche, propre à chaque essence (tonne de matière sèche/m³) permet de calculer la biomasse aérienne. Bien que l'infradensité varie en fonction de l'âge et de la largeur de cerne (Vallet, 2005), une valeur moyenne par essence est souvent utilisée pour simplifier les calculs. Les infradensités adaptées aux essences françaises sont disponibles en annexe A. Le volume correspond soit à un volume bois fort issu de tarifs de cubage ou à un volume total, si l'on dispose de données suffisantes. Un récent article de Deleuze *et al.* (2014) sur les travaux issus du projet EMERGE a permis de confirmer et d'affiner les équations de Vallet sur l'estimation du volume total d'un arbre (jusqu'à l'extrémité des rameaux). Sur la base de 12 216 arbres représentant 28 essences (10 feuillues et 18 résineuses), le modèle construit permet de prédire le volume total aérien, c'est-à-dire tige et branches mais sans les feuilles et les aiguilles, d'un arbre et quelque soit l'essence. Il prend en entrée la circonférence à 1,30 m et la hauteur totale de l'arbre. Des modèles "feuillus" et "résineux" ont également été construits lorsqu'une essence n'était pas assez représentée.

Ce modèle a l'avantage d'être utilisable quelque soit la taille, la station et la sylviculture. L'équation du volume total est la suivante :

$$Vol_{tot} = \frac{H_{tot} \times C_{130}^2}{4 \times \pi \times (1 - \frac{1,3}{H_{tot}})^2} \times (a + b \times \frac{\sqrt{C_{130}}}{H_{tot}} + c \times \frac{H_{tot}}{C_{130}}) \quad (2.2)$$

Avec :

- $C_{1,30}$, la circonférence à 1,30 m
- H_{tot} , la hauteur totale en m

Dans le cadre du projet EMERGE, des taux d'écorce en volume tige entière ont été déterminés pour les essences forestières françaises permettant de distinguer les quantités de carbone contenues dans le bois ou dans l'écorce.

Lorsque le calcul du volume total aérien n'est pas possible, un coefficient d'expansion branches peut être utilisé pour approcher à partir d'un volume bois fort, le volume total. Cependant, l'utilisation d'un tel facteur multiplie les risques d'erreur (Vallet, 2005). Le taux de carbone dans la biomasse, permettant de passer des tonnes de matière sèche à des tonnes carbone, est difficile à estimer, mais une valeur moyenne de 47,5 % ou 50 % est communément admise. Cependant, cette hypothèse de calcul peut entraîner une surestimation des stocks de carbone (Weggler *et al.*, 2012).

2.2.2 Le carbone dans la biomasse racinaire

La part de carbone stockée dans la biomasse racinaire est évaluée à environ 10 % selon la source utilisée. La quantité de carbone de la biomasse racinaire peut être estimée selon plusieurs méthodes.

- Les équations allométriques de Cairns *et al.* (1997) expriment la biomasse racinaire comme fonction de la biomasse aérienne selon le type de forêt (tempérées, boréales et tropicales). L'utilisation de ces équations sont recommandées par le GIEC⁴ et utilisées dans les méthodes forestières du label Bas-Carbone.
- Les coefficients d'expansion racines qui permettent de passer d'un volume bois fort à la biomasse racinaire mais comme les coefficients d'expansion branches, ils multiplient les risques d'erreur sur le calcul du stock carbone (Vallet, 2005).
- Des équations allométriques spécifiques à une essence forestière existent, reliant la biomasse racinaire à des paramètres simples à mesurer, tel que le diamètre à 1,30 m. Cependant ces équations sont souvent basées sur des hypothèses strictes qui ne permettent pas leur application à d'autres cas d'études. En effet, des études de l'accroissement de la biomasse racinaire pour le hêtre en Allemagne, en Belgique et en France ont montré des résultats différents suivant l'âge du peuplement ou la fertilité du site testé (Le Goff et Ottorini, 2001).

Les différentes équations citées ci-dessus sont présentées en annexe B.

2.2.3 Le carbone dans le sol et le bois mort

Le carbone contenu dans le bois mort est souvent négligé ou lors des calculs de bilans, considéré constant. En effet, d'après les données de la littérature, celui-ci ne représente qu'à peine 5 % du carbone total dans l'écosystème forestier (voir tableau 2.1). Dans les méthodes forestières du label Bas-Carbone, l'étude du stock de carbone dans le bois mort est négligé car il est considéré constant sur une période de 30 ans, durée des projets.

4. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, voir le programme du GIEC sur les inventaires nationaux de gaz à effet de serre (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, GIEC)

Le carbone dans le sol quant à lui, représente près de 50 % du stock total de carbone voire plus si l'on y associe la litière, les racines et le bois mort. En France, le carbone contenu dans le sol est d'environ 70 tC/ha, valeur utilisée dans les méthodes forestières du label Bas-Carbone. Mais, cette quantité est largement sous-estimée car les études portent généralement sur les premiers horizons du sol (30 à 40 cm). Or, les horizons profonds contiennent une quantité non négligeable de carbone, estimée à 1/3 du stock total de carbone du sol (Rossi *et al.*, 2015).

2.3 Etude sur le stock carbone au sein du réseau AFI

Après avoir fait un panorama des compartiments forestiers à prendre dans le calcul du stock de carbone et des méthodes de calcul, nous pouvons appliquer ces résultats sur les données d'inventaires de l'AFI. L'ensemble des calculs a été réalisé et traduit à l'aide du logiciel R.

2.3.1 Stock de carbone dans la biomasse vivante

Un important travail sur le calcul du carbone dans la biomasse vivante aérienne au sein des dispositifs du réseau AFI a déjà été réalisé par Minotte (2012). Les hypothèses de travail et la méthode utilisée sont rappelées dans ce paragraphe. J'ai ensuite ajouté à ce travail le stock de carbone calculé dans la biomasse racinaire.

La quantité de carbone a été calculée sur le volume bois fort arbre, c'est-à-dire jusqu'à une découpe de 7 cm. A la quantité de carbone calculée par la formule 2.1, un terme de rendement matière a été appliqué pour rendre compte des pertes de matière lors de la valorisation des bois.

Le volume bois fort de l'arbre a été décomposé en trois billons pour tenir compte de leur qualité et de leur future valorisation : un premier billon correspondant à la longueur sur laquelle la qualité est estimée par l'AFI (3 m pour les feuillus et 6 m pour les résineux), le deuxième billon qui s'arrête à la base du houppier (découpe «gestionnaire») et enfin, le troisième billon comprend l'ensemble du houppier jusqu'à une dimension de 7 cm fin bout. Le volume du houppier a été estimé au *pro rata* du volume grume grâce à des coefficients issus du *Vade-mecum du forestier* permettant de passer d'un mètre cube grume à un volume houppier exprimé en stère. Le taux carbone utilisé par Minotte (2012) avait été fixé par défaut à 50 %. Le taux de carbone a été actualisé en utilisant des taux de carbone par essence issus de la base de données de Thomas et Martin (2012). Si une essence n'était pas répertoriée, un taux carbone feuillus ou résineux a été utilisé (voir l'annexe C pour les valeurs utilisées).

Le rendement permet de traduire les pertes de matière, donc de carbone, de la transformation d'un volume sur pied en un ensemble de produits. Le rendement des qualités A, B et C a été fixé à 60 %, et celui de la qualité D à 99%. La perte de matière s'apparente aux connexes de scieries. Cette distinction par billons et qualités a permis de calculer une durée de vie des produits bois.

La durée de vie des produits bois a été considérée comme une fonction du diamètre et de la qualité. La figure ci-dessous tirée du rapport de Minotte (2012) fournit le modèle et les coefficients utilisés.

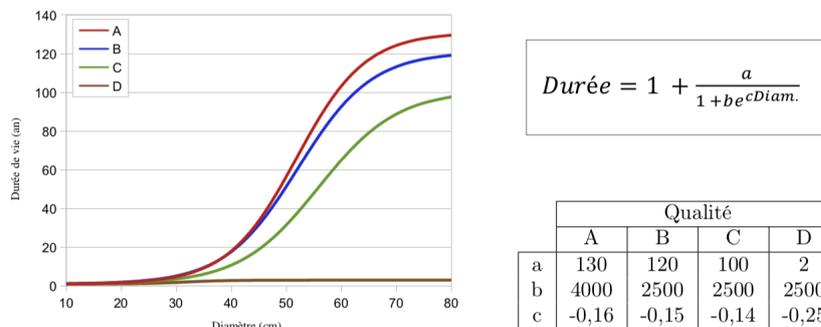


FIGURE 2.1 – Fonction de la durée de vie et paramètres associés

Le calcul de la durée de vie a nécessité quelques hypothèses sur la qualité et le diamètre du deuxième et troisième billons. Par défaut, la qualité attribuée au houppier est D. Pour le deuxième billon, la qualité dépendra de celle du premier billon : D, si le premier billon est de qualité D, C sinon. Le carbone contenu dans l'écorce ou dans le bois n'a pas été distingué.

Enfin, au vu des possibilités pour estimer la biomasse racinaire, l'équation de Cairns *et al.* (1997) pour les forêts tempérées a été utilisée.

2.3.2 Stock de carbone dans la biomasse morte

Pour compléter le calcul du stock carbone et préciser les estimations, le choix a été fait de prendre en compte le stockage de carbone par la biomasse morte, c'est-à-dire bois mort au sol et sur pied.

La mesure du bois mort au sol et sur pied est intégré au protocole d'inventaire de l'AFI depuis quelques années. Mais actuellement, ces données sont encore peu valorisées.

Le bois mort au sol est échantillonné et cubé selon deux méthodes différentes, choisies en fonction du diamètre de la pièce de bois. De même, le bois mort sur pied est inventorié selon deux méthodes différentes en fonction du diamètre de l'individu, puis est cubé en fonction de sa nature (arbre entier, chandelle ou souche haute). Plusieurs variables sont mesurées pour caractériser la pièce de bois mort : l'essence, le diamètre, s'il y a contact au sol et un stade de décomposition (voir l'annexe D pour plus de détails).

Le stade de décomposition est défini à partir d'une clé de détermination à deux entrées, décrite ci-dessous :

TABLE 2.2 – Clé de détermination du stade de décomposition d'une pièce de bois mort retenue par l'AFI

Note	Ecorce	Pourriture du bois
1	Présente sur tout le billon	Dur ou non altéré
2	Présente sur plus de 50 % de la surface	Pourriture < 1/4 du diamètre
3	Présente sur moins de 50 % de la surface	Pourriture comprise entre 1/4 et 1/2 du diamètre
4	Absente du billon	Pourriture comprise entre 1/2 et 3/4 du diamètre
5		Pourriture supérieure à 3/4

Si l'on reprend l'équation 2.1, plusieurs questions se posent pour l'appliquer à une pièce de bois mort. D'abord, l'infradensité ne peut pas être considérée constante car elle varie au cours de la décomposition. En effet, une

pièce de bois en se décomposant perd de la masse, entraînant une diminution de l'infradensité. Puis, le taux de carbone contenu dans le bois évolue au fur et à mesure de la décomposition et varie différemment entre les feuillus et les résineux (Harmon *et al.*, 2013). La position du bois mort, s'il est au sol ou sur pied influence également sa décomposition. La synthèse de Russell *et al.* (2015) explicite la formule pour calculer une quantité de carbone dans une pièce de bois mort.

$$\boxed{Quantite_{carbone} = Volume \times Infradensite \times Taux_{carbone} \times SRF} \quad (2.3)$$

Avec :

- Une infradensité par essence et par classe de décomposition. L'United States Department of Agriculture (USDA) Forest Service qui est en charge de l'inventaire forestier national américain dispose d'une base de données recensant pour toutes leurs essences les infradensités en fonction du stade de décomposition. Les données sont ventilées par essence, par stade de décomposition et distinguant le bois mort au sol du bois mort sur pied (Harmon *et al.*, 2008, 2011). Après une comparaison des infradensités préconisées pour les essences françaises par l'IGN (voir annexe A) et les infradensités pour un arbre vivant de la base de l'USDA Forest Service, j'ai décidé d'utiliser leur base de données. En effet, pour quelques essences seulement, les infradensités sont un peu différentes, mais dans l'ensemble les valeurs sont cohérentes.

- Un taux de carbone, issu de Harmon *et al.* (2013) qui différencie les résineux des feuillus et par stade de décomposition.

- SRF, un facteur de réduction structurelle qui traduit la désagrégation de la pièce de bois au cours du temps. Les valeurs de ce facteur sont issues de Fraver *et al.* (2013). Elles sont fonction de la position du bois mort (debout ou couché) et de son stade de décomposition.

Pour les arbres morts sur pied, en majorité des chandelles dans les inventaires AFI, uniquement la biomasse bois a été considérée, sans différenciation de l'écorce.

L'USDA Forest Service utilise une classification des stades de décomposition en 5 classes, qui diffère entre un bois mort sur pied ou un bois mort au sol (Harmon *et al.*, 2011). Les critères principaux qui permettent de discriminer les classes, portent sur l'aspect du bois : son état, sa dureté, sa couleur. Pour pouvoir se servir des données précédentes pour les données de l'AFI, il a fallu établir une correspondance entre les deux classifications. La pourriture du bois a été choisie comme critère le plus discriminant. Le tableau permet de faire le lien entre les deux classifications. La clé détaillée des stades de décomposition de l'USDA Forest Service est présentée en annexe E.

TABLE 2.3 – Correspondance entre la classification américaine et celle de l'AFI

Classification USDA FS	Classification AFI
1	1-1 ; 2-1
2	1-2 ; 2-2 ; 3-1 ; 3-2 ; 4-1 ; 4-2
3	1-3 ; 2-3 ; 3-3 ; 4-3
4	1-4 ; 1-5 ; 2-4 ; 2-5 ; 3-4 ; 3-5
5	4-4 ; 4-5

Pour certains cas, rares, où l'essence de la pièce de bois mort n'a pas été identifiée dans les inventaires AFI, c'est l'essence dominante du peuplement qui a été choisie.

Le calcul du stock de carbone dans le bois mort s'accompagne nécessairement d'une étude sur la décomposition de ce bois mort et le devenir du carbone. Je m'attacherai ici, à donner quelques éléments de réponse sur la dynamique de décomposition du bois mort, issus de la littérature scientifique.

Le processus de décomposition du bois se caractérise par une perte de volume et par des changements dans ses propriétés physico-chimiques. Le principal procédé de décomposition est la perte de carbone par la respiration de l'ensemble des microorganismes intervenant dans le processus. Par exemple, les émissions de CO₂

au cours de la décomposition peuvent représenter jusqu'à 76 % du carbone présent dans le bois mort dans les forêts tropicales (Chambers *et al.*, 2000). Ensuite la fragmentation, c'est-à-dire l'activité biologique qui décompose le bois mort et la lixiviation sont les deux autres principaux phénomènes intervenant dans le processus. Le carbone va être petit à petit incorporé dans le sol. La lixiviation est responsable du transport du carbone organique dissous par le ruissellement de l'eau du bois mort au sol.

Le temps de stockage du carbone dans le bois mort est déterminé par le taux de décomposition (ou vitesse de décomposition) communément noté k et exprimé en an^{-1} . Le taux de décomposition représente la fraction de la quantité de carbone stockée perdue par unité de temps. Il est généralement calculé grâce à une fonction exponentielle décroissante. Cette fonction basée sur la perte de densité ou de masse au cours du temps nécessite de connaître ces paramètres ou de pouvoir les mesurer. La connaissance de la vitesse de décomposition permet ensuite d'avoir une estimation des flux de CO_2 émis par la pièce de bois mort. Il est également utile dans l'établissement de bilans de carbone sur le compartiment bois mort.

Dans la littérature, plusieurs travaux existent sur la détermination des vitesses de décomposition pour différentes essences forestières. Cependant, les vitesses de décomposition sont souvent dépendantes du lieu d'étude et ne peuvent pas être utilisées sans en tenir compte. Elles sont également fonction du stade de décomposition, la vitesse de décomposition ayant tendance à décroître à mesure que la décomposition avance. Mais pour des conditions similaires, les taux présentent des ordres de grandeur proches. Une thèse récente menée en Allemagne donne des taux de décomposition pour le hêtre, l'épicéa et le pin sylvestre, qui en absence de données locales, peuvent être utilisés (Herrmann, 2017). En France, une étude menée par l'INRA et l'IGN sur le rôle de la forêt et de la filière forêt-bois dans l'atténuation du changement climatique prend en compte le bois mort en considérant des temps de demi-vie et des vitesses de décomposition pour les feuillus et les résineux (Roux *et al.*, 2017).

La difficulté réside dans le fait que les connaissances actuelles ne savent pas estimer le temps qu'une pièce de bois mort passe dans un stade décomposition donné.

Kahl *et al.* (2015) étudie les émissions de CO_2 issues des premières phases de décomposition du bois mort pour 13 essences forestières européennes. Le flux de CO_2 libéré lors de la décomposition varie significativement entre les essences. Il est en moyenne plus élevé pour les feuillus que pour les résineux. Les principaux paramètres influant sur les taux d'émissions de CO_2 sont l'essence, la température, la densité du bois mort et la diversité de la communauté fongique impliquée dans la décomposition du bois mort.

Ces résultats sont cohérents avec ceux de Herrmann et Bauhus (2013) qui font ressortir l'importance de l'essence et du stade de décomposition, et le contrôle de la décomposition par la température et le taux d'humidité du bois pour trois essences d'importance économique en Allemagne (le hêtre, le pin sylvestre et l'épicéa). L'intensité d'intervention sylvicole ne semble pas avoir un effet considérable sur la dynamique de décomposition initiale du bois mort. Sur les 13 essences étudiées par Kahl *et al.* (2015) uniquement 5 essences semblent répondre à l'effet de la gestion sylvicole et de manière différente. Une gestion avec une fréquence d'intervention modérée agit favorablement sur les taux d'émissions de CO_2 de bois mort de tilleul, contrairement au douglas, bouleau et mélèze où les taux d'émissions de CO_2 augmentent lorsque que la gestion est intensive.

L'historique de gestion d'une forêt peut influencer positivement sur la décomposition du bois mort dans la phase initiale, par la création de microclimat forestier ou par le stock de bois mort laissé en forêt qui agit comme un réservoir pour la communauté fongique impliquée dans le processus (Kahl *et al.*, 2015).

Le transport du carbone présent dans le bois mort vers le sol et l'influence du bois mort sur la quantité de carbone organique présent dans le sol ont été étudiés en Allemagne par Kahl (2008). Le transport de carbone a été suivi et étudié à travers le flux de carbone organique dissous (COD) du bois mort vers le sol. Le flux de COD des pièces de bois mort vers le sol est environ vingt fois plus important que le flux de COD entre la litère et le sol (modalité témoin) en l'absence de bois mort. Cependant, le COD transporté dans le sol ne fait augmenter la quantité de carbone organique présent dans les horizons minéraux du sol qu'au bout d'une trentaine d'années. En vingt ans, le COD du bois mort transféré dans le sol permet de remplacer 20 % du carbone organique présent dans le sol. Mais, dans le cas d'une tempête, le bois mort peut participer de manière importante à la reconstitution du stock de carbone perdu.

D'autres études sur le transport de carbone arrivent à des conclusions différentes. En effet, les concentrations de carbone organique dissous transférés dans le sol (sur une profondeur de 0 à 20 cm) sont fortement dépendantes de l'essence et du stade de décomposition (Blonska *et al.*, 2017).

Finalement, le carbone stocké dans le bois mort constitue un stock de carbone sur le long-terme (plus d'une trentaine d'années). Les éléments minéraux présents dans le bois mort y sont pour de longue période. En effet, sauf quelques exceptions, les éléments minéraux ne sont exportés du bois mort qu'à partir de stades de décomposition avancés (Herrmann, 2017). Ainsi, le bois mort constitue d'abord un puits pour les éléments minéraux tels que l'azote, le phosphore ou le sodium avant d'être une source. La bibliographie montre que la concentration en carbone dans le bois mort augmente de manière significative au cours de la décomposition pour le hêtre, l'épicéa et le pin sylvestre, mais que la quantité de carbone diminue au cours du temps. La concentration en carbone est plus élevée dans les résineux en décomposition que dans les feuillus ce qui s'explique par les taux de carbone plus importants dans les résineux sains que dans les feuillus sains (Herrmann, 2017).

Ces différentes études ne nous livrent pas des valeurs directement applicables mais permettent de mieux comprendre les flux de carbone dans le bois mort.

2.4 Résultats et analyses thématiques

Les résultats de stock carbone dans les différents compartiments (racines, bois vivant et bois mort) pour quelques dispositifs de peuplements feuillus et résineux seront analysés. D'autres résultats sont présentés en annexe F. L'inventaire du bois mort a été ajouté récemment dans le protocole de suivi de l'AFI expliquant l'absence de carbone stocké dans ce compartiment sur les premiers inventaires de certains dispositifs (avant 2008).

2.4.1 Stockage de carbone dans des peuplements de châtaignier

Les dispositifs 81 et 82 sont deux peuplements à dominance châtaignier situés en Ardèche. Ces deux peuplements sont issus d'anciens vergers à châtaignier qui ont ensuite été recolonisés ou plantés par divers feuillus ou résineux. Dans les deux dispositifs, le châtaignier demeure l'essence principale (environ 40 % de la surface terrière totale) accompagné par du frêne, chêne sessile ou pin sylvestre.

La figure 2.2 donne la répartition du stock de carbone dans les différents compartiments. Les deux dispositifs ont des niveaux assez élevés de carbone, comparés à d'autres peuplements feuillus, compris entre 90 tC/ha et 130 tC/ha dans l'ensemble des compartiments. Le stock de carbone dans les racines reste stable sur les périodes de suivi et représente environ 20 % de la totalité du stock calculé. Il augmente légèrement dû à l'augmentation du capital sur pied. Les deux dispositifs ont des stocks de bois mort sur pied parmi les plus importants du réseau AFI (en 2018, 60,5 m³/ha pour le dispositif 82) permettant ainsi de stocker environ 10 tC/ha. A noter que le stock de carbone dans le bois mort reste assez stable sur les périodes de suivi. Pour le dispositif 81, il représente dans l'ordre des inventaires, 8,4 %, 7,7 % et 5 % du stock de carbone total et pour le dispositif 82, 10,6 %, 10,7 % et 7 % du stock total. Le stock de carbone dans le bois vivant augmente également. L'augmentation du matériel sur pied du dispositif 82 explique en partie cette tendance bien qu'il y ait eu une première intervention dans le peuplement sur les cinq premières années de suivi (prélevant seulement 12 % du matériel sur pied). Le stock du dispositif 81 est moins élevé. Ce dispositif a également subi une coupe lors du premier inventaire, prélevant 24 % du matériel sur pied au profit des petits et moyens bois, contrairement au dispositif 82 dont la structure est plutôt gros bois et très gros bois.

La figure 2.3 montre l'évolution du volume sur pied sur la période de suivi ventilée par qualité. En effet, le stock de carbone est fortement dépendant de la biomasse, calculée à partir du volume. L'intérêt de la ventilation par qualité permet d'avoir une idée de la répartition des futurs produits bois issus de ces dispositifs, dans

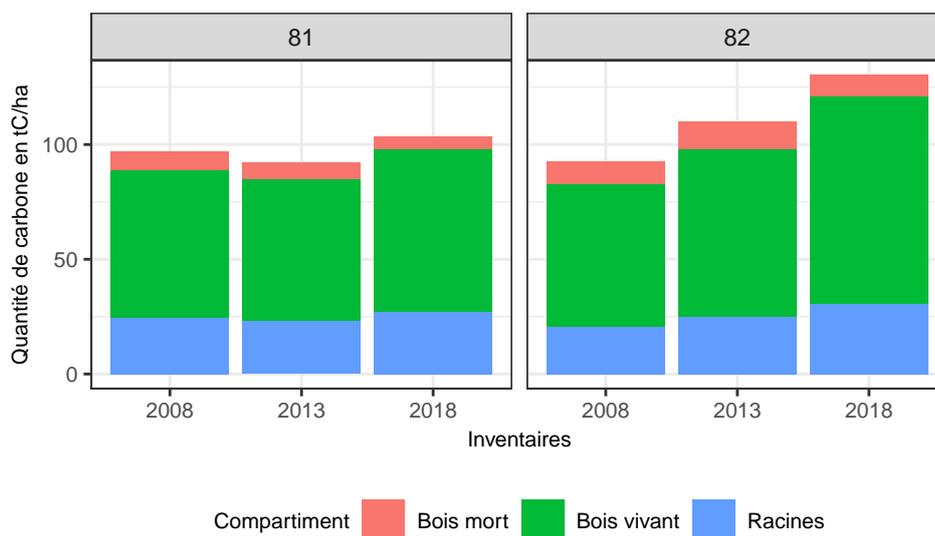


FIGURE 2.2 – Stock de carbone des dispositifs 81 et 82

les différentes destinations possibles. La futaie irrégulière en favorisant une amélioration de la qualité pied à pied vise à optimiser la production de bois d'oeuvre. Les produits de bois d'oeuvre permettent de stocker le carbone plus longtemps que des produits bois énergie.

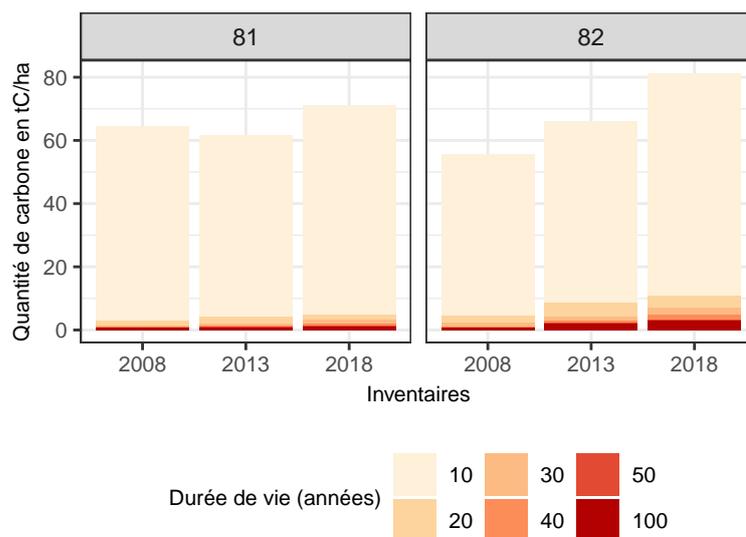


FIGURE 2.4 – Durée de vie des produits des dispositifs 81 et 82

La figure 2.4 donne les durées de vie des produits bois qui seraient issus des dispositifs 81 et 82. La proportion des produits à longue durée de vie (supérieure à 40 ans) a augmenté de manière assez nette dans le dispositif 82. Ceci s'explique en partie par l'augmentation de la part de qualité B en volume dont les produits seront ensuite mieux valorisés. Le dispositif 81 a une part assez faible du volume en qualité A et la proportion de qualité B a peu augmenté sur la période de suivi. Certaines placettes de ce dispositif présentent une proportion de résineux (notamment du pin sylvestre) importante (31 % de la surface terrière totale en 2018) dont la majorité sont de qualité C. Cela ne permet pas d'améliorer significativement la part de produits à forte durée de vie.

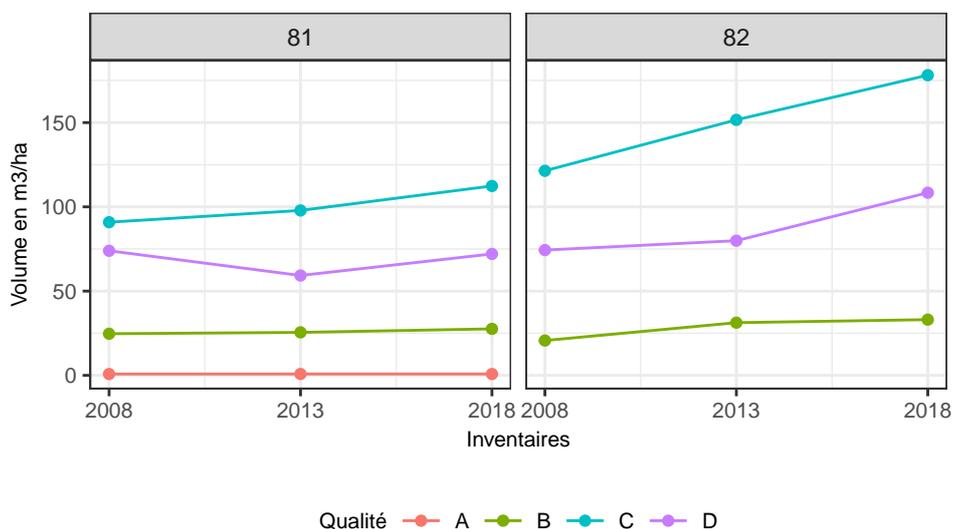


FIGURE 2.3 – Evolution du volume par qualité des dispositifs 81 et 82

2.4.2 Stockage de carbone dans des peuplements de chêne

Les dispositifs 11 et 15, situés dans le quart nord-est de la France, sont des peuplements de chêne. Les dispositifs 52 et 54 sont situés dans le centre de la France. Les quatre dispositifs sont sur des stations plutôt hydromorphes. Les dispositifs 52 et 54 sont mélangés avec du taillis de charme dynamique qui continue d’être maîtrisé.

La figure 2.5 donne la répartition du stock carbone dans les différents compartiments. La quantité de carbone dans les racines est assez semblable sur les quatre dispositifs, entre 15 à 20 tC/ha soit environ 25 % du stock de carbone total des trois compartiments. Cette quantité reste relativement stable mais a tendance à augmenter avec l’augmentation de la biomasse aérienne.

Les niveaux de carbone dans le bois mort sont faibles (inférieurs à 5 %) et reflètent les faibles volumes de bois mort de ces dispositifs. Les dispositifs 52 et 54 sont situés dans une région où les anciennes pratiques consistaient à laisser une forêt «propre» après une intervention, laissant ainsi peu de rémanents en forêt. Les dispositifs 52 et 54 ont été installés dans des taillis de charme à faible réserve en chêne où la gestion pratiquée consiste à capitaliser en chêne et maîtriser le taillis. Le stock de carbone dans le bois vivant a donc augmenté sur les périodes de suivi, de 30 tC/ha au premier inventaire à presque 50 tC/ha au dernier inventaire (dispositif 52).

Le capital sur pied du dispositif 11 a fluctué sur la période de suivi, ce qui s’en ressent sur le stock de carbone. Au quatrième inventaire, le stock diminue du fait d’une coupe de bois d’oeuvre prélevant 24 % du capital. Les gros bois de chêne dominent dans le peuplement. Le dispositif 15 a un niveau de carbone assez bas au premier inventaire (1996), qui pourrait être encore la conséquence d’une forte coupe dans les années 40. Deux coupes légères et l’extraction de quelques chablis ont eu lieu sur la période de suivi pour le dispositif 15 mais n’empêchant pas l’augmentation du stock de carbone (40 tC/ha à 65 tC/ha). La structure à dominance petits et moyens bois au premier inventaire est devenue à dominance bois moyens et gros bois.

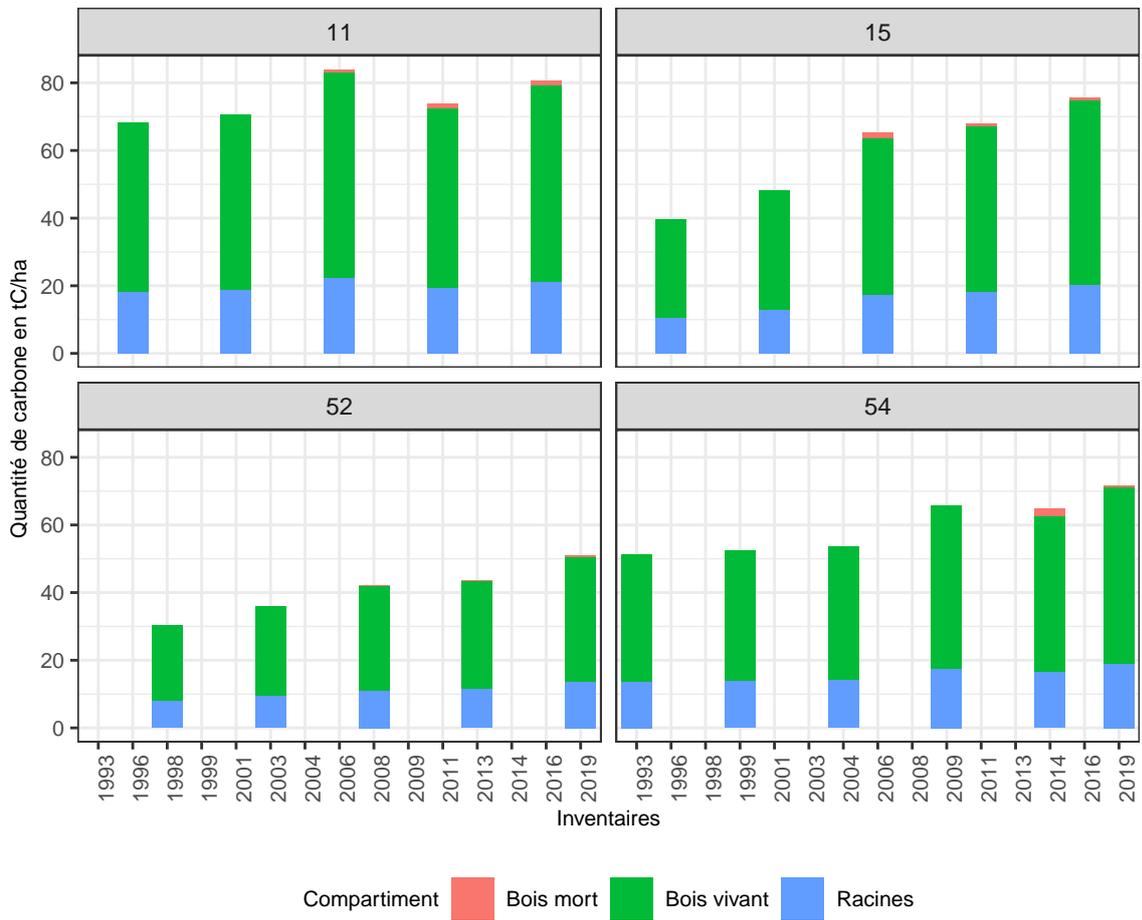


FIGURE 2.5 – Stock de carbone des dispositifs 11, 15, 52 et 54

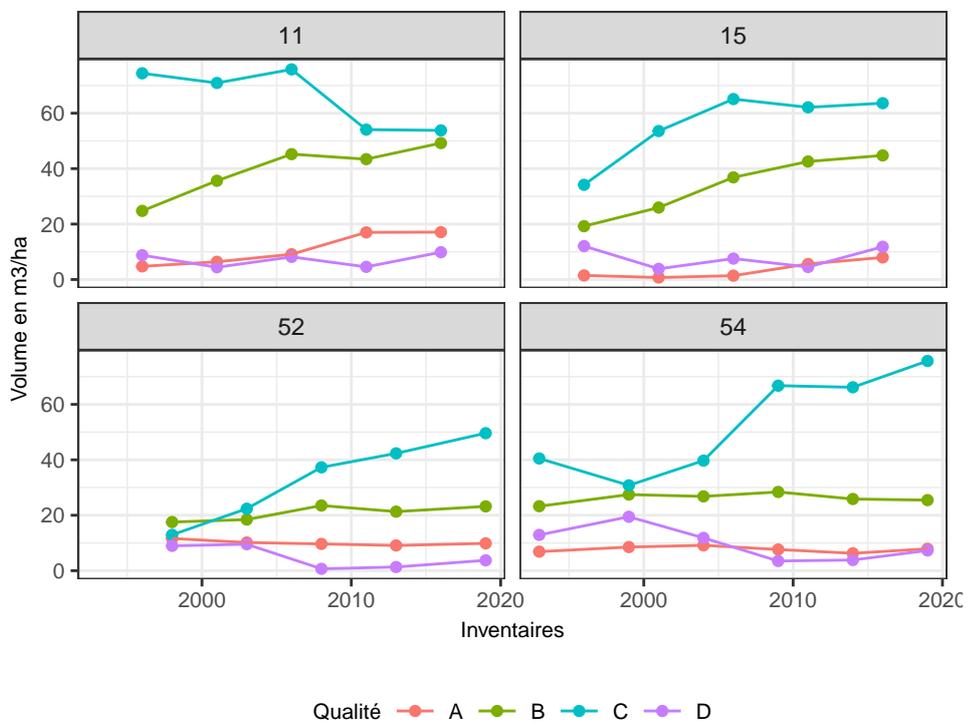


FIGURE 2.6 – Evolution du volume par qualité des dispositifs 11, 15, 52 et 54

La figure 2.6 montre l'évolution du volume par qualité pour les quatre dispositifs. De manière générale, la qualité D est restée stable ou a diminué et les meilleures qualités ont augmenté.

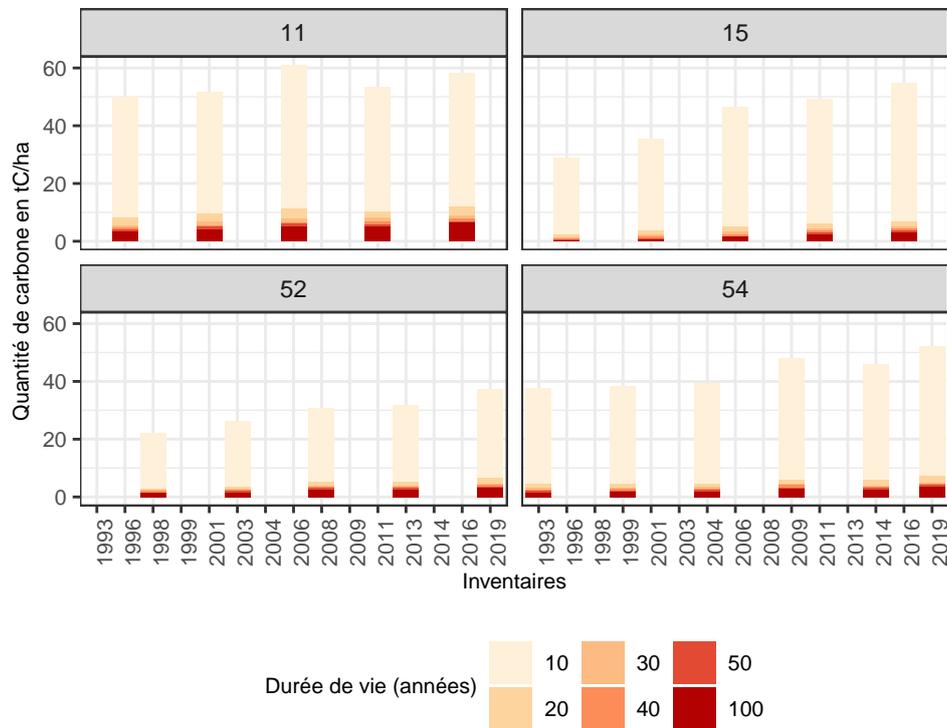


FIGURE 2.7 – Durée de vie des produits des dispositifs 11, 15, 52 et 54

En lien avec la qualité, la figure 2.7 montre la durée de vie des produits. La qualité au sein du dispositif 11 est en constante progression sur la période de suivi et représente près de la moitié des tiges précomptables. En effet, la part des produits ayant une longue durée de vie, notamment supérieure à 100 ans, a augmenté sur la période de suivi. De la même façon, pour les dispositifs 15 et 52 dont l'augmentation des durées de vie des produits témoignent de la gestion de la qualité. La quantité de carbone ayant une durée de vie inférieure à 10 ans peut paraître étonnante, mais il s'agit de la durée de vie des produits à l'instant de l'inventaire. Ainsi, un chêne de petit diamètre et de qualité potentielle A ne peut pas fournir du bois d'oeuvre. Sans oublier, la part du houppier, non négligeable qui par défaut termine en bois énergie. De même, quelque soit le diamètre, les produits bois d'un chêne de qualité D seront considérés comme ayant une durée de vie inférieure à 10 ans, or en pratique, les gros bois de chêne, même de mauvaise qualité, trouvent des débouchés en bois d'oeuvre.

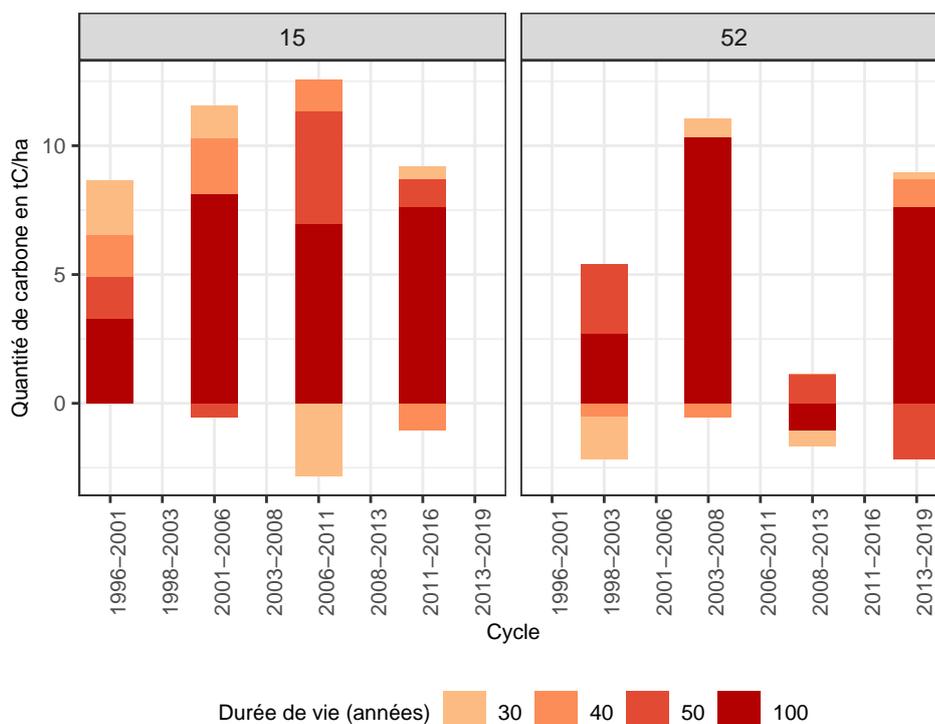


FIGURE 2.8 – Flux des durées de vie des produits des dispositifs 15 et 52

La figure 2.8 montre le flux des produits ayant des durées de vie supérieures à 30 ans pour chaque cycle des dispositifs 15 et 52. Pour les deux dispositifs, le flux de carbone des produits ayant une durée de vie supérieure à 100 ans est positif et compris entre 3 tC/ha et 10 tC/ha. Sauf sur la période 2008-2013 où le flux de carbone dans les produits ayant une durée de vie supérieure à 100 ans est de -1,1 tC/ha, sans doute du à une coupe sur cette période dans les bois moyens et gros bois (dispositif 52).

2.4.3 Stockage de carbone dans des peuplements de hêtre

Les dispositifs 6 et 10 illustrent la possibilité de gestion irrégulière de peuplements majoritaires en hêtre. Le chêne sessile et le sapin sont les essences secondaires de ces dispositifs. Ils sont situés tous les deux en Bourgogne-Franche-Comté sur des stations acidiphiles.

La figure 2.9 illustre la répartition du stock de carbone dans les trois compartiments. La biomasse racinaire stocke 25 % du carbone et cette proportion reste relativement stable sur toute la période de suivi. Les stocks de carbone au sein du bois mort des deux dispositifs sont assez faibles (moins de 5 % soit au maximum 3 tC/ha). Les stocks de carbone dans la biomasse aérienne atteignent 70 tC/ha et 80 tC/ha sur les derniers inventaires. Sur les périodes de suivi, représentant 25 ou 20 ans de gestion en irrégulier, la quantité de carbone a fluctué au gré des interventions. Pour le dispositif 10, la tempête de 1999 ainsi qu'une récolte de bois d'oeuvre de gros bois de hêtre ont entraîné une baisse de ce stock (inventaire 2), de même pour l'inventaire 5 où une coupe de bois d'oeuvre a été effectuée. Pour le dispositif 6, plusieurs coupes ont eu lieu (inventaire 2 et inventaire 4), mais cela n'a pas fait baisser significativement le stock de carbone. Hormis pour l'inventaire 2, où une coupe dans les petits bois et bois moyens a été pratiquée. Cependant, le fort impact de cette coupe n'est pas tant liée au volume prélevé mais plutôt à l'infradensité des essences coupées.

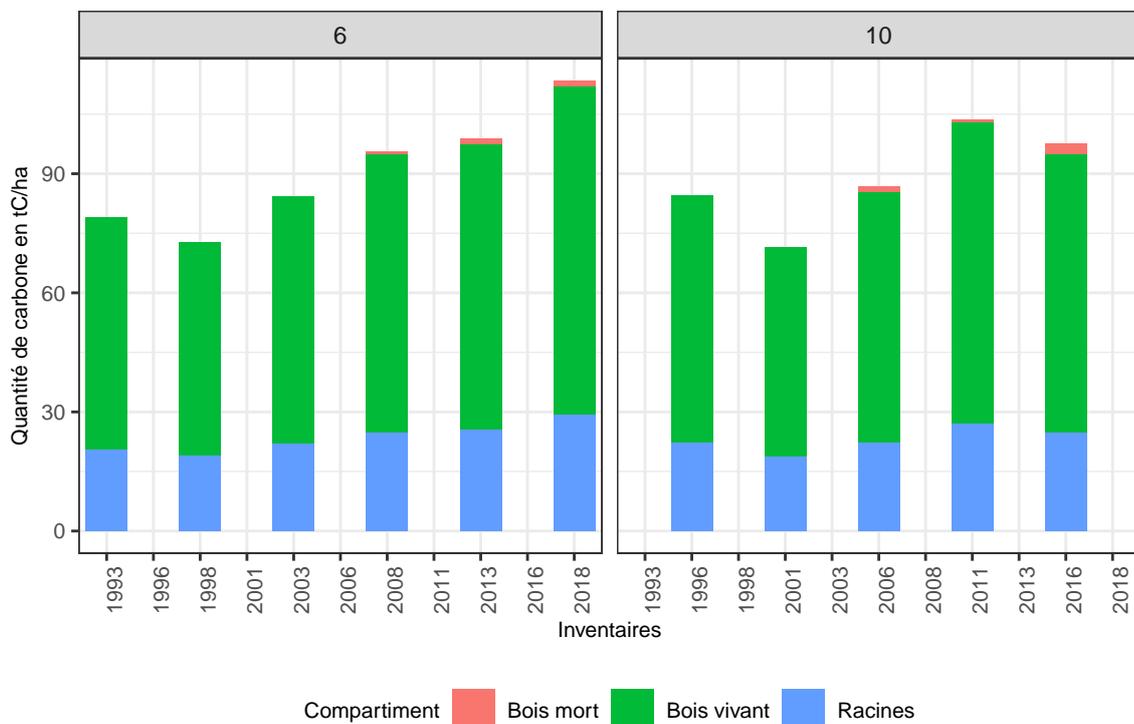


FIGURE 2.9 – Stock de carbone des dispositifs 6 et 10

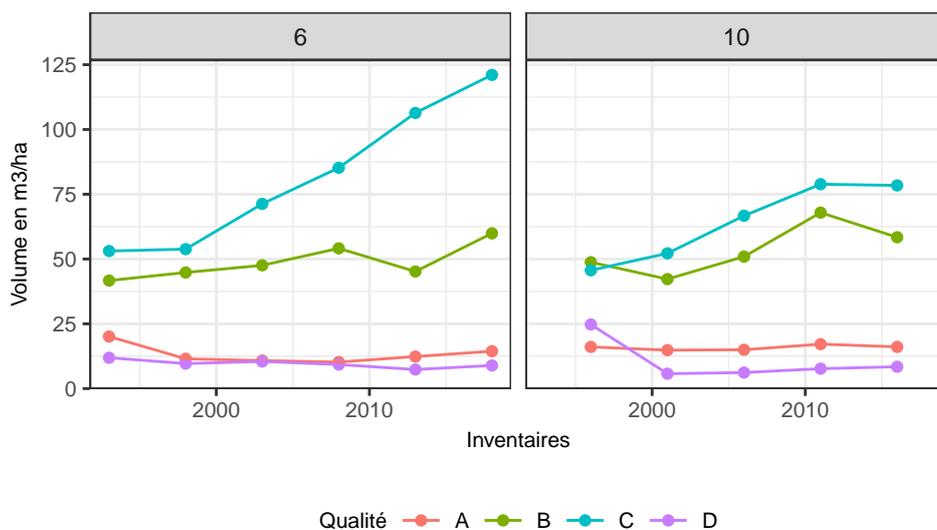


FIGURE 2.10 – Evolution du volume par qualité des dispositifs 6 et 10

La répartition du volume en qualité (voir la figure 2.10) montre la gestion de la qualité pratiquée sur les dispositifs. Les parts du volume de qualités A et B qui augmentent au cours de la période de suivi, la part de qualité D qui diminue.

La figure 2.11 montre les durées de vie des produits potentiels des dispositifs 6 et 10. Pour des stocks de carbone assez proches, si ce n'est légèrement plus faible pour le dispositif 10, les durées de vie des produits de celui-ci sont en proportion meilleures que le dispositif 6. Dans le cas du dispositif 6, même si la qualité des feuillus a

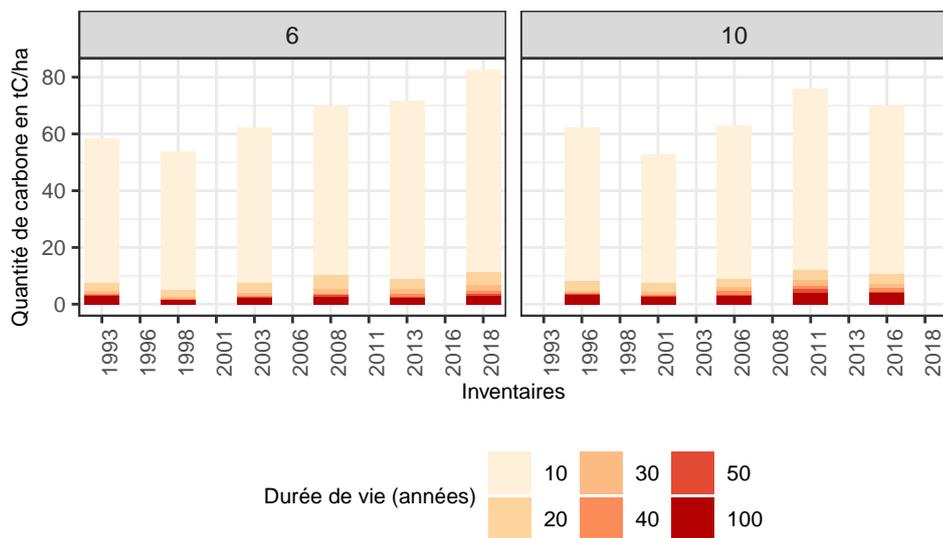


FIGURE 2.11 – Durée de vie des dispositifs 6 et 10

augmenté, la proportion de sapin pectiné est devenue plus importante au cours du temps (de nombreux jeunes sapins sont devenus précomptables) dont la plupart sont de qualité C, expliquant l'augmentation de produits ayant une faible durée de vie. La part des produits ayant des durées de vie supérieures à 20 ans a fluctué au cours des inventaires, au gré des interventions sylvicoles dans le peuplement. L'augmentation de la part des belles qualités en termes de volume montre qu'une meilleure valorisation des produits bois est possible.

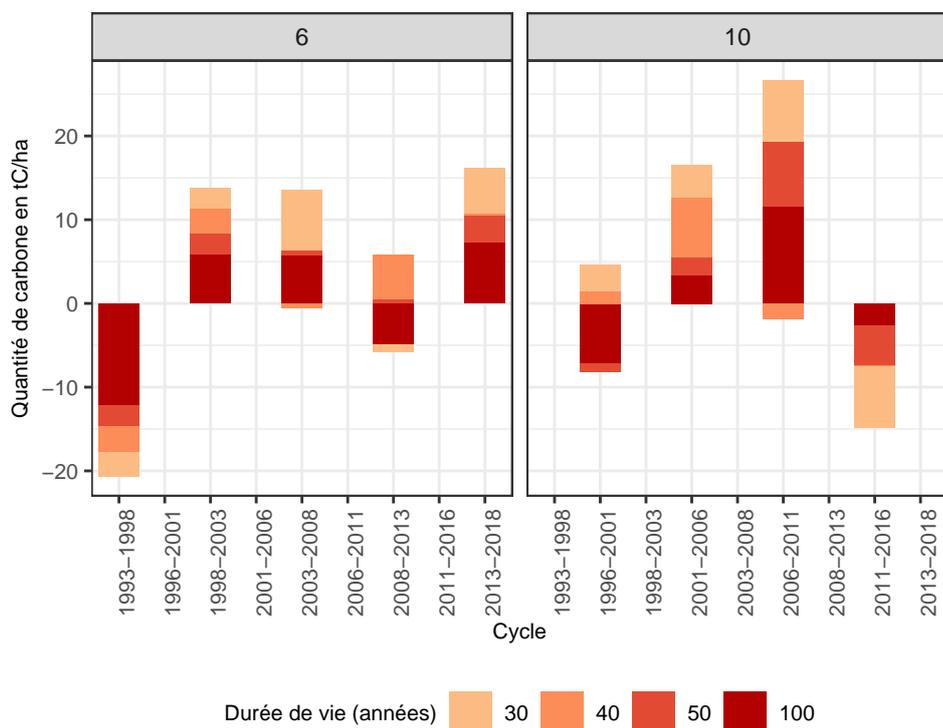


FIGURE 2.12 – Flux des durées de vie des produits des dispositifs 6 et 10

La figure 2.12 montre le flux des produits ayant des durées de vie supérieures à 30 ans pour chaque cycle des dispositifs 6 et 10. Les flux sur cinq ans oscillent entre -20 tC/ha et 25 tC/ha. Pour le dispositif 6, les coupes sur les périodes 1993-1998 et 2008-2013 dans les gros bois et très gros bois expliquent les flux négatifs observés pour les produits ayant une durée de vie supérieure à 100 ans. Pour le dispositif 10, les interventions dans les gros bois sur les périodes 1996-2001 et 2011-2016 expliquent les flux négatifs observés pour les produits ayant une durée de vie supérieure à 100 ans. Excepté lors des coupes de récolte dans les gros bois ou très gros bois, la gestion de la qualité dans ces dispositifs permet d'avoir des flux positifs de produits bois ayant des durées de vie supérieures à 30 ans.

2.4.4 Stockage de carbone dans des peuplements de résineux

Les deux dispositifs dont les résultats sont présentés sont des peuplements d'essences résineuses. Le dispositif 48 est un peuplement de sapin-hêtre avec une dominance du sapin sur station acidiphile et le dispositif 49 est une ancienne plantation de douglas sur station acidiphile.

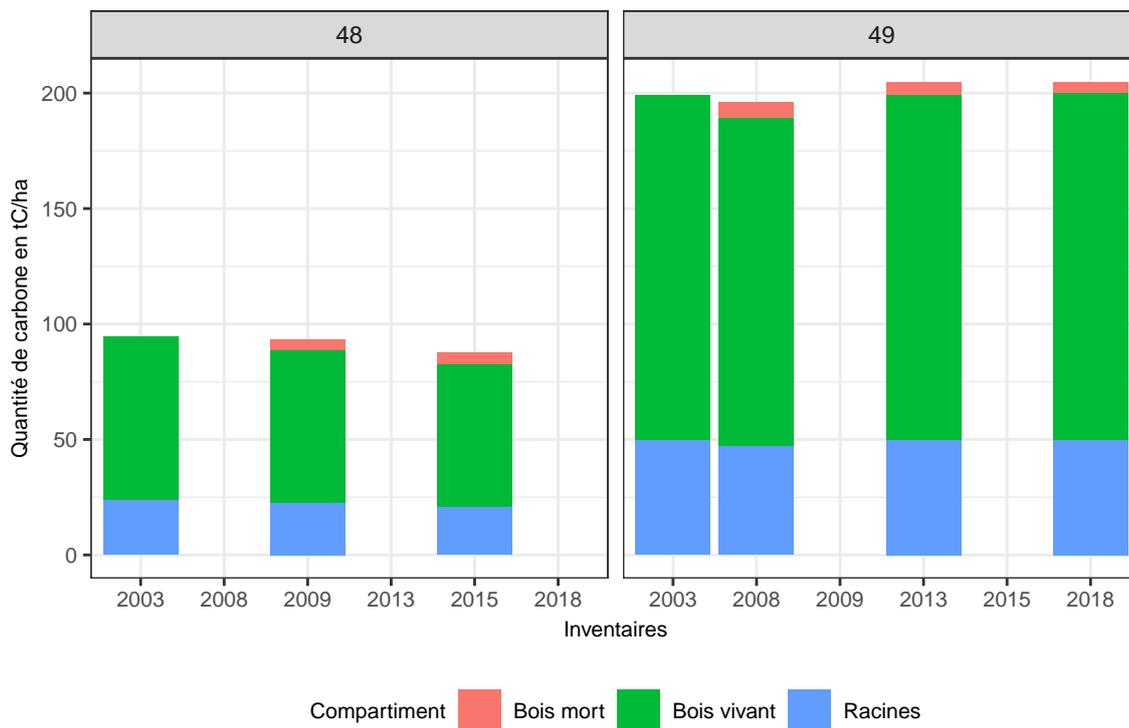


FIGURE 2.13 – Stock de carbone des dispositifs 48 et 49

La figure 2.13 donne la répartition des quantités de carbone stockées dans le peuplement selon les trois compartiments pris en compte.

La biomasse racinaire stocke environ une vingtaine de tonnes de carbone par hectare dans le dispositif 48 contre une cinquantaine pour le dispositif 49. Cependant, pour les deux dispositifs, la biomasse racinaire stocke 25 % du carbone total considéré. Cette différence importante s'explique car la biomasse racinaire est fonction de la biomasse aérienne. Or, le capital sur pied de la plantation de douglas est très élevé (de l'ordre de 42 m²/ha) comparé au dispositif 48 (environ 20 m²/ha).

Le dispositif 49 est l'un des dispositifs AFI qui stocke le plus de carbone avec un stock constant sur les 15 ans de suivi, de quasiment 200 tC/ha (biomasse aérienne). Dans le dispositif 48, les stocks de carbone dans le bois vivant sont moitié plus faibles, de l'ordre de 60 tC/ha. Sur la période de suivi, une baisse du niveau de matériel

sur pied est constatée, ce qui est également visible sur le stock de carbone.

Le carbone stocké dans le bois mort représente 3 (dispositif 49) à 6 % (dispositif 48) du carbone total. Ce sont des niveaux assez faibles mais communs au sein du réseau AFI. Cependant les volumes de bois mort, notamment pour le dispositif 48 sont assez élevés, mais cela reste faible au regard du capital sur pied total.

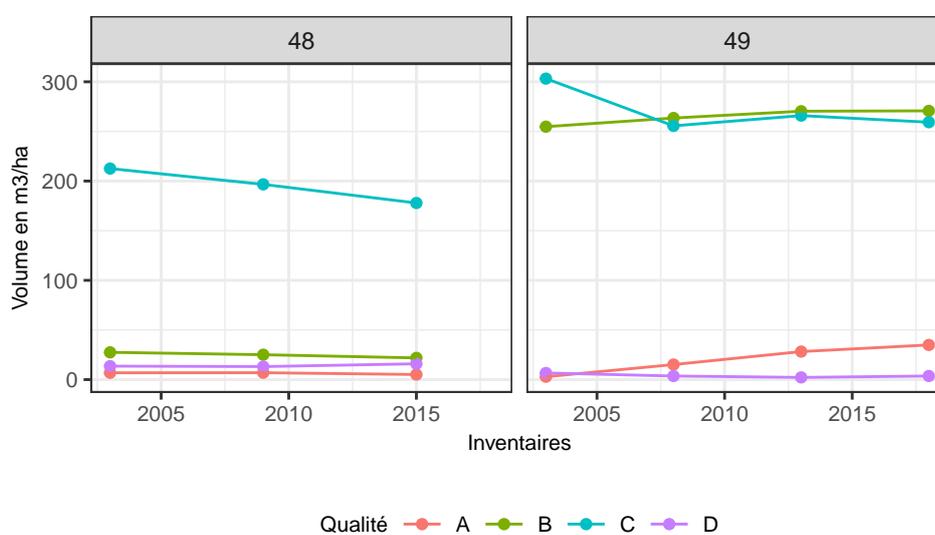


FIGURE 2.14 – Evolution du volume par qualité des dispositifs 48 et 49

Le dispositif 49 a un volume sur pied de qualité, en témoigne la figure 2.14, où la part de B est importante (plus de 250 m³/ha de bois qui ont les six premiers mètres estimés en qualité B) et en augmentation, de même que la part de la qualité A qui n'a cessé d'augmenter au cours de la période. Les volumes sur pied du dispositif 48 sont légèrement plus faibles, la part de qualité C tend à diminuer et la part des belles qualités à se stabiliser.

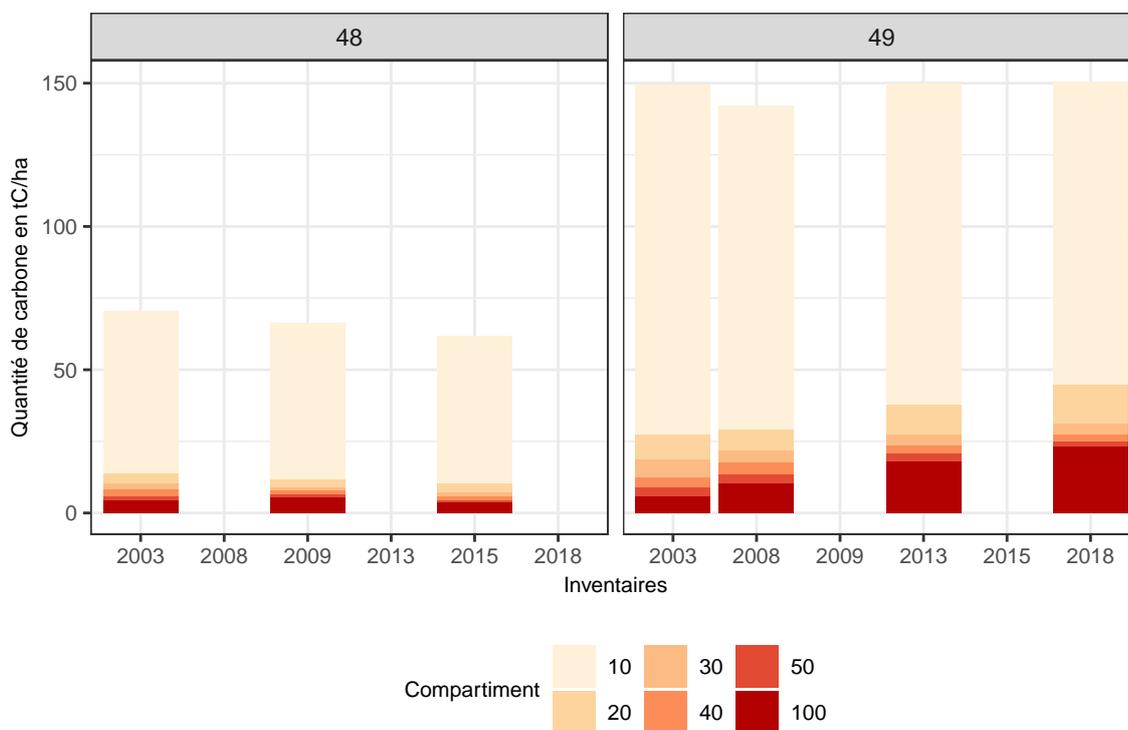


FIGURE 2.15 – Durée de vie des produits des dispositifs 48 et 49

La gestion de la qualité du dispositif 49, concentrée sur les gros diamètres, est flagrante si l'on regarde la figure 2.15 qui donne la durée de vie des produits bois. La part des produits de durée de vie supérieure à 100 ans n'a cessé d'augmenter et à plus que doublé entre le premier et le dernier inventaire. La quantité de carbone stockée dans les produits bois à forte durée de vie dans les peuplements de douglas peut s'expliquer car la proportion du houppier chez les résineux est plus faible rapportée au volume de la grume (contrairement aux feuillus) et le douglas peut être bien valorisé à partir de diamètres plus faibles que d'autres essences, notamment feuillues. De plus, la part des qualités A et B du volume n'a cessé d'augmenter au cours des inventaires, témoignant là-aussi de la gestion qualitative.

2.4.5 Stockage carbone dans un dispositif géré et une réserve naturelle non gérée

Les stocks de carbone de dispositifs AFI ont été comparés à ceux d'une réserve naturelle. La réserve naturelle du massif du Grand Ventron⁵ est gérée par le Parc Naturel des Ballons des Vosges, qui nous ont fourni les données. Cette réserve de 400 ha s'étend sur les versants vosgiens et haut-rhinois avec une hêtraie-sapinière qui domine à l'étage montagnard. Ponctuellement, de l'érable et de l'épicéa sont en mélange.

La réserve est inventoriée selon deux modalités, des placettes en partie gérée et d'autres non. Les stocks de carbone dans le bois vivant (volume bois fort arbre et houppier) et dans le bois mort ont été calculés. Pour le bois mort, certaines essences non déterminées ont été assimilées aux essences dominantes, hêtre ou sapin. Les niveaux de carbone sont comparés à ceux du dispositif 32 de l'AFI. Ce dispositif se situe entre le premier et deuxième plateau du Jura. Le peuplement est à base de hêtre et de sapin, avec en accompagnement un cortège d'essences feuillues. Bien que les conditions stationnelles soient différentes, le cortège d'essences de ces deux dispositifs (la réserve et le dispositif AFI) sont assez proches justifiant leur comparaison.

5. Plus de détails à l'adresse suivante : <http://www.reserves-naturelles.org/massif-du-ventron>

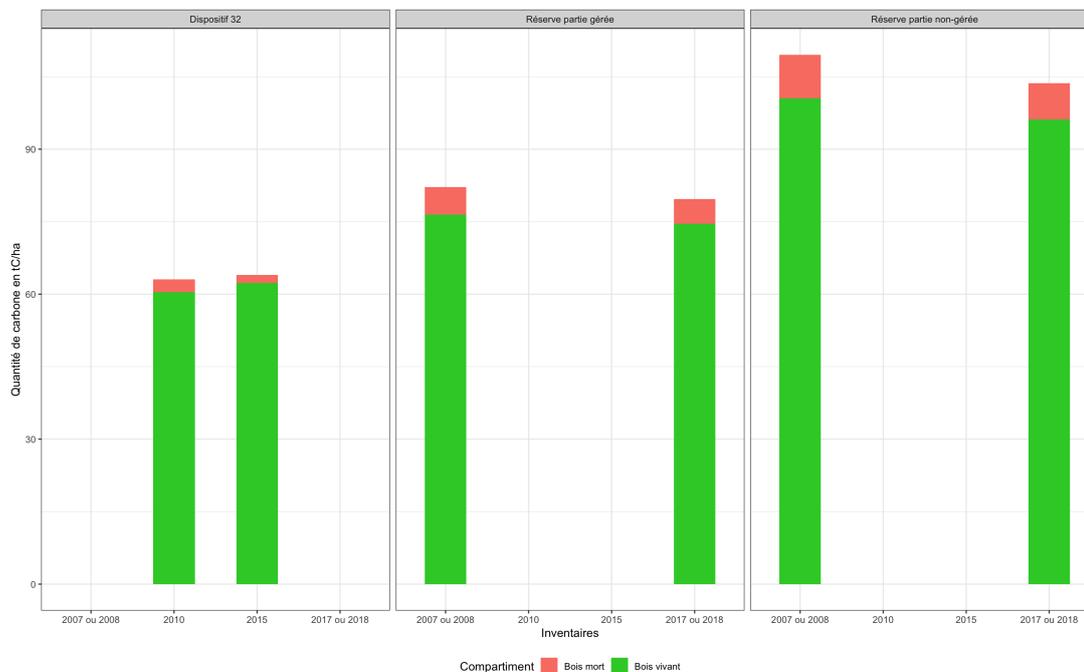


FIGURE 2.16 – Comparaison des stocks de carbone du dispositif 32 du réseau AFI et de la réserve naturelle du Grand Ventron

Sur le dispositif de l’AFI (figure 2.16), le stock de carbone dans le bois vivant reste stable autour de 60 tC/ha, notamment parce que les prélèvements coïncident avec les niveaux d’accroissements constatés. Pour le dispositif 32, quatre inventaires sont disponibles mais l’inventaire du bois mort au sol a débuté seulement à partir du troisième inventaire, en 2010. En 2010, le stock de carbone dans le bois mort est de 2,6 tC/ha et de 1,73 tC/ha à l’inventaire de 2015. Le bois mort ne participe qu’à hauteur de 2 à 3 % du stock total de carbone. Dans la réserve naturelle, les stocks de carbone sont, à l’évidence, plus faibles dans la partie gérée que non gérée. Dans la partie gérée, le stock de carbone dans le bois mort représente aux premier et deuxième inventaires, respectivement 7 et 6 % du stock total calculé, soit 6 tC/ha et 5 tC/ha. Dans la partie non gérée, les stocks de carbone dans le bois mort sont un peu plus élevés mais ne représentent au total que 7 et 8 tC/ha aux premier et deuxième inventaires.

L’estimation de ces stocks et l’évolution au sein des dispositifs AFI, fournit des éléments pour réfléchir au rôle et à l’intérêt d’une gestion irrégulière pour gérer de manière durable le stock de carbone.

2.5 Pistes de réflexion pour l’élaboration de méthodes forestières dans le cadre du label Bas-Carbone

2.5.1 Pistes de réflexion

Plusieurs pistes de réflexion peuvent être avancées pour augmenter le stockage carbone en forêt. Premièrement, réserver plus de bois mort en forêt. La plupart des dispositifs du réseau AFI ont des volumes de bois mort à l’hectare faibles qui pourraient être augmentés sans pour autant nuire à une gestion raisonnée et de qualité. Les résultats des dispositifs de l’AFI le démontrent. Laisser plus de bois mort serait bénéfique pour le stock carbone, au moins une partie serait stockée sur le long-terme et offrirait également des habitats à la faune et la flore dédiées au cycle de décomposition du bois. Une façon d’améliorer les volumes de bois mort à l’hectare serait de réserver au moment du martelage des gros bois (présentant un intérêt écologique

ou non) pour alimenter ce compartiment. Les critères de choix seraient à adapter en fonction de la situation rencontrée : arbre de moins bonne qualité, ne faisant pas concurrence avec de belles tiges. Le gain carbone alors engendré serait un argument pour encourager les propriétaires privés dans cette démarche. Une rapide étude sur quelques dispositifs de l'AFI a montré qu'en choisissant plusieurs seuils de volume de bois à réserver (5 m³/ha, 10 m³/ha et 20 m³/ha) et en appliquant un prix de la tonne carbone de 44 €/tonne de CO₂ (Postic et Métivier, 2019), le gain carbone pourrait être positif et favorable à une telle démarche.

Deuxièmement, augmenter les diamètres d'exploitabilité. En effet, l'une des façons de maximiser le stock carbone est d'allonger les cycles sylvicoles. En France, les stocks de carbone les plus élevés sont situés dans des futaies à cycle sylvicole long (Rossi *et al.*, 2015). Augmenter les diamètres d'exploitabilité permet à la fois d'augmenter la valeur écologique de la forêt (les espèces associées aux forêts âgées sont nombreuses et rares) mais aussi de ne pas trop perdre économiquement sur la valeur des bois.

Troisièmement, à l'origine de l'AFI, les dispositifs ont été installés dans des taillis-sous-futaie, souvent pauvres en réserve et produisant principalement du bois de chauffage, pour montrer que la conversion en futaie irrégulière afin de produire du bois d'oeuvre de qualité était possible et rentable. Une capitalisation progressive de ces taillis-sous-futaie avec une gestion du sous-étage a permis d'augmenter les volumes de bois sur pied, la qualité du peuplement et la proportion de bois d'oeuvre, ainsi que le bilan carbone. Une méthode forestière démontrant le bien-fondé de cette gestion par rapport à un maintien du taillis-sous-futaie en termes de stockage de carbone pourrait permettre d'encourager l'amélioration de ce type de peuplement. Enfin, dans des régions où la sylviculture du douglas est prépondérante, l'AFI a choisi d'implanter des dispositifs pour montrer qu'une gestion alternative est possible et avantageuse d'un point de vue environnemental, écologique et économique. Ainsi, sur des plantations de douglas des conversions en irrégulier ont été entreprises notamment en étalant les phases de récolte. L'optimisation de la séquestration de carbone de ce choix de gestion sera détaillé et discuté dans le paragraphe suivant.

2.5.2 Exemple d'une méthode : Alternative à la gestion régulière des plantations de douglas

Pour voir si le traitement en irrégulier d'une plantation de douglas permet d'améliorer la séquestration carbone du peuplement par rapport à une gestion «classique» en futaie régulière, l'ancienne plantation de douglas du dispositif 16 de l'AFI a été comparée à une plantation de douglas gérée en futaie régulière. Le dispositif 16 est situé dans le Morvan, où la sylviculture de douglas est très présente. Ce peuplement est issu d'une ancienne plantation de douglas de 1927 et une conversion en futaie irrégulière a été entreprise par le gestionnaire sur un peuplement âgé d'environ 70 ans. Le premier inventaire de l'AFI date de 1997.

TABLE 2.4 – Volume et surface terrière du peuplement du dispositif 16 en 1997

	G (m ² /ha)	V (m ³ /ha)
Douglas	37,8	533
Total	52,0	685

Au premier inventaire (1997), le douglas représentait 73 % de la surface terrière totale suivi par l'épicéa (23 % et le hêtre (4 %). La structure était essentiellement dominée par les gros bois (41,8 m²/ha) dont 74 % de qualités C et D. La rotation des coupes du dispositif 16 est de 6 ans, avec un accroissement moyen calculé sur les 20 ans de suivi (1997 à 2017) de 12,8 m³/ha/an et un prélèvement moyen de 14 m³/ha/an sur la période de suivi.

Choix du scénario de référence

Pour comparer les stocks de carbone entre un peuplement en conversion vers une futaie irrégulière et une plantation de douglas, ayant alors atteint l'âge d'exploitabilité, il faut choisir un scénario de référence. Pour choisir le scénario en cohérence avec la région où se situe le dispositif, je me suis reportée au Schéma Régional de Gestion Sylvicole (SRGS) de Bourgogne-Franche-Comté⁶. L'itinéraire conseillé pour une futaie régulière résineuse est le maintien de ce traitement. Le scénario de référence choisi est donc un exemple d'itinéraire de sylviculture «classique» du douglas avec un allongement de la production, soit un âge d'exploitabilité de 70 ans. La table de production de cet itinéraire est disponible à l'annexe G.

Au début du projet, deux possibilités ont été envisagées au vu des caractéristiques du peuplement du dispositif 16 au premier inventaire : la coupe rase puis la plantation (scénario de référence) ou la conversion en futaie irrégulière. Les quatre inventaires du dispositif nous permettent de simuler sa croissance sur les vingt premières années. Un volume à l'équilibre, objectif à atteindre, a été ensuite déterminé en respectant la durée de rotation entre deux coupes. Pour une futaie irrégulière de douglas, la surface terrière objectif est de l'ordre de 30-35 m²/ha. Considérant cet objectif, le volume à l'équilibre peut être approché en multipliant cette surface terrière par le tiers de la hauteur totale dominante (Rasse, 2012). Avec une hauteur moyenne des douglas de 42,7 m en 2017 à Folin, un volume à l'équilibre d'environ 500 m³/ha paraît raisonnable. La table de production de l'itinéraire en gestion irrégulière est disponible en annexe H.

Calcul des réductions d'émissions anticipées générables

Les réductions d'émissions anticipées (REA) générables par le projet sont définies dans l'arrêté du 28 novembre 2018 et constituent le gain carbone sur lequel il est possible de demander une certification. Les formules sont issues directement de la méthode forestière «Reconstitution de peuplements forestiers dégradés» du label Bas-Carbone⁷. Sur l'exemple de cette méthode, les stocks de carbone des deux itinéraires contenus à la fois dans les compartiments forestiers et dans les produits bois récoltés ont été calculés.

Dans une gestion en irrégulier, il est difficile de définir proprement un âge d'exploitabilité, toutefois pour pouvoir comparer les deux scénarios, le scénario alternatif a été étudié sur la même période de révolution que le scénario de référence. Les formules pour calculer les REA sont rappelées en annexe I. L'annexe J donne les estimations des volumes de chaque éclaircie des deux itinéraires et leur répartition par catégorie d'utilisation.

Résultats

Pour ne pas surestimer les stocks de carbone et conformément à la méthode forestière «Reconstitution de forêts dégradés», plusieurs rabais s'appliquent sur les REA_{forêt} calculées. Si une méthode correspondant à notre étude existait, il faudrait démontrer l'additionnalité économique. Dans le cas contraire, un rabais de 10 % doit être appliqué. Pour prendre en compte, les risques liés aux variations du climat, aux attaques sanitaires non prévisibles, un rabais de 10 % doit être pris en compte. Bien que l'itinéraire de référence utilisé ne fasse pas état d'une classe de fertilité, il faut appliquer un rabais de 10 % (cas où la classe de production n'est pas démontrée).

6. Le SRGS est disponible en ligne à l'adresse suivante : https://bourgognefranche-comte.cnpf.fr/data/srgs2_4_1.pdf

7. Cette méthode forestière est consultable en ligne à l'adresse suivante <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/label-bas-carbone>.

TABLE 2.5 – Résultats du gain carbone entre les deux scénarios

Forêt		
	Référence	AFI
Stock à 30 ans (en tCO ₂ /ha)	667	933
Stock moyen sur 70 ans (en tCO ₂ /ha)	642	871
Produits bois		
	Référence	AFI
Stock moyen sur 30 ans (en tCO ₂ /ha)	818	732
REA (en tCO ₂ /ha)		
Forêt	167	
Produits	-3	
Total	164	
Prix de la tonne : 40 €/tCO ₂	6 562 €	

Le tableau ci-dessus donne les résultats de la comparaison des deux scénarios. Le scénario de référence où le peuplement de douglas est coupé à ras au temps 0 puis re-planté et le scénario alternatif (scénario AFI) où la phase de récolte est étalée. Pour les compartiments forestiers, l'itinéraire alternatif, considérant les différents rabais, permet d'optimiser la séquestration carbone par rapport à l'itinéraire de référence. Le gain carbone est de 167 tCO₂/ha. Sur les produits bois, considérant la période de projet (30 ans), l'itinéraire alternatif ne permet pas d'optimiser le bilan carbone. La perte est de 3 tCO₂/ha.

Au total, le gain carbone du scénario AFI est positif et égal à 164 tCO₂/ha. A titre d'indication, avec un prix moyen de la tonne de CO₂ de 40 €/tCO₂, la valeur estimée de ce projet, en termes de carbone est de 6 562 €.

2.6 Discussion

Les peuplements de résineux de l'AFI sont ceux qui stockent le plus de carbone avec des niveaux supérieurs à 100 tC/ha, notamment pour le douglas. Pour les autres peuplements, les valeurs sont assez stables au sein du réseau et comprises entre 40-80 tC/ha. De manière générale, les résineux stockent plus rapidement du carbone durant les premières années de vie d'un peuplement, puis la tendance s'inverse ensuite, les feuillus étant plus efficaces pour stocker du carbone à moyen et long-terme (Rossi *et al.*, 2015). Les stocks de carbone calculés ici ne prennent pas en compte les strates basses, seulement les individus précomptables ont été considérés pour ce travail. On peut émettre l'hypothèse que dans des peuplements avec un sous-étage dynamique, le stockage de carbone serait sans doute légèrement plus élevé. En effet, les peuplements multistratifiés stockent mieux le carbone car les strates basses interceptent le carbone relargué par le sol (Rossi *et al.*, 2015).

La gestion des rémanents est fondamentale pour l'optimisation du stockage de carbone. Sur le long-terme, l'exportation des rémanents fait diminuer le stock de carbone de l'écosystème forestier (Rossi *et al.*, 2015). Le stock de bois mort de l'AFI est principalement constitué par les rémanents. Pour mon travail, je me suis appuyée sur des études américaines particulièrement pour calculer le stock de carbone dans le bois mort. Ce stock de carbone est fortement dépendant du volume de bois mort mais aussi de l'infradensité. Mes résultats de travail permettent de donner des ordres de grandeur relativement fiables de ce stock.

La durée de vie est dépendante des usages faits. Dans mon travail, ils ont été estimés à partir de la qualité et du diamètre. De plus, les hypothèses choisies en fonction de ces deux paramètres conduisent à avoir une forte proportion de produits dont la durée de vie est inférieure à 10 ans. Pour certaines essences, il conviendrait d'affiner ces critères. En effet, il serait intéressant d'intégrer non pas la simple valorisation possible d'un arbre à un instant donné, mais de tenir compte de son usage potentiel s'il était exploité ultérieurement.

Dans mon travail, je me suis attachée à faire une analyse précise du stock de carbone. Toutefois, faire une analyse plus précise se révèle complexe et pas nécessairement plus efficace (selon le but recherché) que celles présentées dans les méthodes forestières du label Bas-Carbone, présentant l'avantage d'être simple d'utilisation.

D'un point de vue du stockage de carbone, l'analyse met en évidence, un gain positif en faveur d'une gestion en traitement irrégulier comme alternative à la coupe rase puis plantation de douglas. Toutefois, ces calculs reposent sur des hypothèses concernant le peuplement ayant servi de cas d'étude et la répartition des produits bois dans les différents usages. Pour que la comparaison soit pertinente, il faudrait l'étayer avec d'autres situations et d'autres peuplements. De plus, les pratiques sylvicoles jouent aussi un rôle sur le carbone dans le sol qui n'est pas pris en compte dans l'étude. Par exemple, la coupe rase en cas de perturbation du sol a un effet néfaste sur le carbone organique du sol, de même que la plantation si elle est comparée à la régénération naturelle (Augusto *et al.*, 2019). Si les résultats ne sont pas généralisables, ils peuvent permettre toutefois d'initier une réflexion pour l'élaboration d'une méthode forestière dans le cadre du label Bas-Carbone.

Chapitre 3

Influence des conditions climatiques sur l'accroissement en diamètres de plusieurs essences

3.1 Introduction

Au cours de son cycle sylvigénétique, l'écosystème peut faire face à des perturbations qui viennent entraver ce cycle notamment d'origine climatique. Chaque essence forestière ayant une plage optimale pour les facteurs essentiels à sa croissance (l'eau et la lumière), un manque de l'un de ces facteurs entraîne des dérèglements physiologiques qui se traduisent par l'apparition de symptômes d'affaiblissement (perte de croissance, défoliation). C'est le climat qui détermine largement les apports en eau et les variations de température.

Actuellement, les forestiers doivent faire face à des crises sanitaires sur plusieurs essences causées par les épisodes de sécheresse de plus en plus fréquents. En effet, les grandes vagues de dépérissement sur les essences telles que le chêne pédonculé, le hêtre ou le sapin pectiné qui ont déjà pu être observées et recensées dans le passé ont été directement reliées aux sécheresses. En France, la température moyenne annuelle a augmenté de un degré depuis un siècle et les années les plus chaudes sont parmi les plus proches de nous. De plus, les prévisions des experts du groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat prévoient à l'horizon 2100 une augmentation des températures moyennes annuelles d'environ 2,5 degrés en Europe, une augmentation des précipitations hivernales en Europe du Nord d'environ 16 % mais accompagnée par des déficits hydriques estivaux et une diminution des précipitations hivernales en Europe du Sud de -4 à -27 %. La fréquence des événements extrêmes climatiques tels que les canicules et les sécheresses devrait également augmenter. Ces changements peuvent à moyen-terme avoir des effets bénéfiques sur la production des essences. En effet, l'augmentation de dioxyde de carbone et des températures favorisent la photosynthèse, l'adoucissement du climat intersaison allonge la saison de végétation et des hivers doux sont bénéfiques pour l'activité des espèces à feuilles persistantes. Cependant sur le long-terme, les limites des disponibilités estivales en eau sont amenées à diminuer quelque soit la station.

Les dispositifs du réseau de l'AFI ont été installés dans des contextes géographiques et climatiques variés. Cela permet de couvrir un large éventail de conditions stationnelles et climatiques où les principales essences forestières peuvent se trouver. Le recul dont dispose l'AFI sur certains dispositif est un réel avantage pour étudier le comportement des essences, notamment en lien avec les conditions climatiques.

Dans ce chapitre, nous tenterons de répondre à plusieurs questions : quel est l'effet des conditions climatiques sur l'accroissement en diamètre de quelques essences forestières ? Quels sont les facteurs climatiques qui impactent le plus la croissance des essences ? Quelles différences de réponse existe-t-il entre les essences ?

3.2 Présentation des données arbres et des données climatiques

3.2.1 Choix et mise en forme des jeux de données arbres

Les données sont issues de dispositifs pour lesquels les tendances actuelles climatiques posent question quant à l'avenir des peuplements et le comportement des essences en place. Nous avons donc choisi les dispositifs sur un critère stationnel mais aussi en fonction des essences. Le tableau ci-dessous résume par dispositif, les caractéristiques pédologiques. L'altitude est exprimée en mètre, la réserve utile maximale (RUM) en millimètre. Les données pédologiques des dispositifs ont été décrites à la tarière.

TABLE 3.1 – Caractéristiques stationnelles des dispositifs étudiés

Dispositif	Référence pédologique	Altitude	Topographie	RUM	Observations
3	Calcisol	460	pente faible	70	limite enracinement 60 cm
14	Calcisol	500-600	pente forte	80	-
23	Brunisol issu de calcaire	620-710	pente modérée	100	limite enracinement 50 cm
32	Calcisol	750-800	pente entre 5 % et 50 %	50	limite enracinement 50 cm
33	Calcisol	380	faible pente	50	limite enracinement 60 cm
6	Brunisol oligosaturé	480	plateau	150	-
1	Planosol typique désaturé	225	pente faible	100	limite enracinement 50 cm
5	Luvisol-rédoxisol	204	plane	140	-
7	Luvisol-rédoxisol	340	pente faible	120	-
9	Luvisol-rédoxisol	236	-	160	-
15	Luvisol-rédoxisol	193	pente légère	120	-
20	Planosol typique désaturé	295	pente faible	135	limite enracinement 60 cm
53	Luvisol-rédoxisol	145	plane	-	-
54	Luvisol-rédoxisol	145	plane	-	-
16	alocrisol désaturé sur arène granitique	700	pente moyenne	120	-
49	alocrisol désaturé sur arène granitique	560-600	pente moyenne	-	-
62		555	pente moyenne	-	-

Les dispositifs 3, 14, 23, 32 et 33 forment le premier groupe sur sols calcaires. Les stations rencontrées au sein de ce groupe sont assez hétérogènes et ces dispositifs peuvent présenter des variations microtopographiques marquées. Par exemple, le dispositif 14 est situé sur un versant présentant une alternance de lapiaz (affleurement calcaire) et de lézine (fissure). Toutefois, ces dispositifs partagent une problématique commune, la présence de calcaire dur à plus ou moins faible profondeur limitant la réserve en eau. Dans le cas de sécheresse, un manque d'eau en période printannière et estivale pourrait mettre en porte à faux les essences les plus sensibles. Cumulé avec le risque de températures élevées et des limites d'enracinement ne dépassant pas les 60 centimètres, cela pourrait fortement impacter la santé de ces essences.

Le dispositif 6 a été séparé du premier groupe car le sol est à dominante sableuse. Cela implique une réserve utile moyenne où les conditions climatiques estivales sont déterminantes.

Les dispositifs 1, 5, 7, 9, 15, 20, 53 et 54 forment le deuxième groupe caractérisé par des sols hydromorphes. Les dispositifs se partagent entre des sols hydromorphes acides ou des sols hydromorphes acidoclines dont la problématique principale est la présence d'hydromorphie plus ou moins contraignante. Le plancher argileux rencontré dans certains dispositifs à une soixantaine de centimètres peut empêcher la prospection racinaire de certaines essences. En cas de bilan hydrique estival déficitaire, cela peut entraîner un risque de stress pour les essences en place.

Le troisième groupe rassemble les dispositifs 16, 49 et 62 caractérisés par des sols acides à forte pauvreté chimique et à réserve utile assez modeste.

Chaque groupe se distingue par le type de station mais aussi l'essence étudiée. Le premier groupe correspond à des peuplements mélangés de chênes (sessile et pédonculé), sapin pectiné, érables (champêtre, plane et sycomore), frêne, hêtre, merisier, pins (noir et sylvestre), tilleul, charme, alisiers. Les essences d'intérêt majeur ayant des effectifs équilibrés, ont été sélectionnées en vue d'une analyse statistique. Plus spécialement, le premier groupe permet d'étudier le chêne sessile, l'érable sycomore, le frêne, le sapin pectiné et le pin noir. Le hêtre, très majoritaire, a été traité à part sur ces dispositifs ainsi que sur le dispositif 6. Le deuxième groupe porte sur l'étude du comportement du chêne sessile sur sols hydromorphes. Les conséquences sylvicoles dues aux diagnostics stationnels de ces dispositifs désignent le chêne sessile comme essence à favoriser. De plus, ce type de configuration est fréquemment rencontrée parmi les dispositifs du réseau. Le troisième groupe cible le douglas. Les trois dispositifs ont été installés dans des peuplements issus de plantation qui ont ensuite été gérés en irrégulier. Ils se situent tous dans le Morvan où la sylviculture du douglas y est prépondérante.

Les dispositifs sélectionnés ont pour la plupart été inventoriés entre trois et cinq fois. Les accroissements sur le diamètre sont calculés entre deux inventaires, généralement espacés de 5 ans. Pour chaque cycle (période entre deux inventaires) des données initiales caractérisant le peuplement et l'arbre échantillonné sont disponibles. Le tableau ci-dessous récapitule les valeurs dendrométriques moyennes principales pour chacun des groupes. Les groupes 1, 2, 3 et 4 font respectivement allusion aux peuplements mélangés sur sols calcaires, aux chênaies sessiliflores sur sols hydromorphes, aux douglas sur sols acides et au hêtre.

TABLE 3.2 – Principales caractéristiques des peuplements étudiés

	Effectif	G (m ² /ha)	N (tiges/ha)	Diamètre (cm)	Hauteur totale (m)
Groupe 1	947	12,70-29,93	103,3-425,4	18-80	10-33,70
Groupe 2	3784	10,10-21,50	104,3-213,2	17,5-105	12,30-39,80
Groupe 3	1116	28,57-52	145,9-530,4	17,5-105	17,70-50,60
Groupe 4	1992	12,70-29,93	103,3-425,4	17,5-82,5	13,60-38,70

3.2.2 Choix et mise en forme des jeux de données climatiques

Les données climatiques proviennent des postes météorologiques de Météo-France ou du programme MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) de la NASA.

3.2.2.1 Données Météo-France

Les données fournies par Météo-France sont des valeurs mensuelles de hauteur de précipitations, de températures minimales et maximales. Certaines stations météorologiques fournissent des valeurs d'évapotranspiration potentielle (ETP) mais celles-ci sont peu fréquentes à proximité des massifs forestiers. L'évapotranspiration est contrôlée par les stomates des feuilles et constitue le principal mécanisme de régulation biologique des échanges en eau entre un arbre et l'atmosphère. Environ 90 % de l'eau absorbée est ensuite rejetée par transpiration. C'est une donnée nécessaire pour pouvoir calculer le bilan hydrique du peuplement.

Plusieurs formules existent permettant de calculer l'ETP d'un peuplement. La formule de Thornthwaite a été choisie car elle ne prend en entrée que la température, la rendant ainsi simple à utiliser. Les données Météo-France couvrent assez bien les périodes de suivi des dispositifs, qui ont été installés pour les plus anciens en 1993. Cependant, elles appréhendent mal la variabilité spatiale des conditions climatiques à l'échelle d'une forêt. Les données proviennent des postes de mesures les plus proches des dispositifs, obligeant parfois à aller chercher un poste situé à 20 km du dispositif (voir le tableau ci-contre).

TABLE 3.3 – Postes Météo-France associés aux dispositifs étudiés

Dispositif	Nombre de postes	Distance (km)	Période couverte
1	2	1,3 et 14,5	1993-2017
5	1	10,8	1993-2017
6	1	8,4	2003-2017
7	1	4,1	1993-2017
9	1	14,9	1996-2017
14	1	17,8	1995-2017
15	1	14,9	1995-2017
16	1	14,9	1996-2017
20	2	12,1 et 20	1998-2017
23	1	15,3	1999-2017
32	1	11,8	1999-2017
33	1	7	2000-2017
49	2	10,8 et 15,3	2003-2017
53	1	16,8	1997-2017
54	1	3,5	1993-2017
62	1	5,9	2004-2017

De plus, sur une période de suivi, des problèmes d'homogénéité des données météorologiques existent. En effet, un même dispositif peut être associé à différents postes, c'est-à-dire que chaque station couvre une période différente dans le suivi du dispositif ou au contraire ils se superposent sur une partie. Une année ou plusieurs peuvent également manquer si la station a été arrêtée ou délocalisée et qu'il n'y a pas d'autres stations proches du dispositif. Des dispositifs proches géographiquement peuvent avoir le même poste météorologique associé, comme c'est le cas des dispositifs 5 et 15 ou encore 53 et 54.

3.2.2.2 Données issues du programme MODIS

Les données issues des satellites du programme MODIS répondent à différentes bandes spectrales qui permettent de les caractériser. Elles sont disponibles en ligne gratuitement¹. Les données d'évapotranspiration potentielle ont été récupérées, calculées directement grâce à un algorithme sur la base de l'équation de Penman-Monteith, faisant intervenir plusieurs paramètres. L'ETP est exprimée en $0,1 \text{ kg/m}^2/8\text{jours}$ à une résolution spatiale de 500 m (Running *et al.*, 2017).

Le programme MODIS débute en 2001, ce qui ne permet pas d'avoir de données pour les dispositifs plus anciens. Cependant il couvre l'ensemble de la terre et de manière continue, ce qui présente un avantage à l'heure où l'AFI se développe au niveau international.

Un test de comparaison de moyennes entre les ETP de MODIS et Thornthwaite a montré une différence significative mais non pertinente car les écarts sont inférieurs à 10 % (source AFI). Selon l'échantillonnage du satellite, les données d'ETP téléchargées pour deux dispositifs présentant un gradient altitudinal permettaient d'avoir des valeurs localisées par placette mais ne respectant pas nécessairement le gradient de pente.

Pour l'étude qui suit, les données de Météo-France ont été utilisées.

3.2.2.3 Choix des variables climatiques

Le bilan hydrique (BH), estimé par la différence entre les précipitations et l'ETP, représente la quantité d'eau disponible une fois les besoins en évaporation et en transpiration satisfaits. Un déficit hydrique en pleine saison de végétation peut entraîner une réduction de la croissance cellulaire et un ralentissement de la pousse des rameaux ainsi que des racines fines. En effet, les stomates se ferment pour limiter la transpiration bloquant ainsi les échanges avec l'atmosphère, plus particulièrement l'absorption de dioxyde de carbone nécessaire à la photosynthèse, ayant pour conséquence un ralentissement de la croissance (Nageleisen *et al.*, 2010).

Les extrêmes climatiques sont une cause des ralentissements de croissance pour les arbres. Ces extrêmes climatiques peuvent être déterminés à partir des relevés météorologiques, mais l'appréciation exacte du stress hydrique au niveau d'un peuplement reste complexe. L'évaluation précise du bilan hydrique au sein d'un peuplement passe nécessairement par l'étude simultanée des données climatiques, des facteurs topographiques, pédologiques ou encore de l'historique du peuplement.

Plusieurs variables climatiques semblent intéressantes pour expliquer l'accroissement sur le diamètre : la température, la pluviométrie, le bilan hydrique, particulièrement sur la période de végétation et les années climatiques extrêmes. Les variables climatiques sont mensuelles tandis que les accroissements sur le diamètre calculés sont par cycle. Tous les dispositifs n'ont pas les mêmes cycles de mesures. Il a donc été nécessaire de faire correspondre ces données climatiques avec les données d'accroissement. Pour cela, un changement d'échelle a été effectué pour caractériser les conditions climatiques moyennes d'un cycle.

Le tableau ci-dessous récapitule les covariables climatiques définies pour l'étude.

1. Consultable sur : <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/index.php>

TABLE 3.4 – Définition des covariables climatiques

Nom	Signification et unité
BH _{moy}	Bilan hydrique annuel moyen sur un cycle, en mm
BH _{min}	Bilan hydrique sur les mois de juin à août, moyen sur un cycle, en mm
DH _{max}	Déficit hydrique sur les mois de juin à août maximal sur un cycle, en mm
T _{moy,été,cycle}	Température moyenne sur les mois de juin à août sur un cycle, en degré celsius
T _{max,été,cycle}	Température maximale moyenne sur les mois de juin à août sur un cycle, en degré celsius
T _{moy,hiv,cycle}	Température moyenne hors saison de végétation sur un cycle, en degré celsius
P _{moy}	Précipitations annuelles moyennes sur un cycle, en mm
ETP _{moy}	Evapotranspiration potentielle moyenne sur un cycle, en mm

3.3 Analyse statistique des données d'accroissement en lien avec les variables climatiques

Afin d'établir un modèle explicatif de l'accroissement, une analyse exploratoire est nécessaire pour bien comprendre les variables et déceler des corrélations éventuelles.

3.3.1 Analyse exploratoire des données

Nous présenterons des graphiques relatifs à quelques dispositifs appartenant au groupe 1 présenté précédemment. Les graphiques des autres cas sont présentés en annexe K. Toutes les variables étudiées ne sont pas représentées.

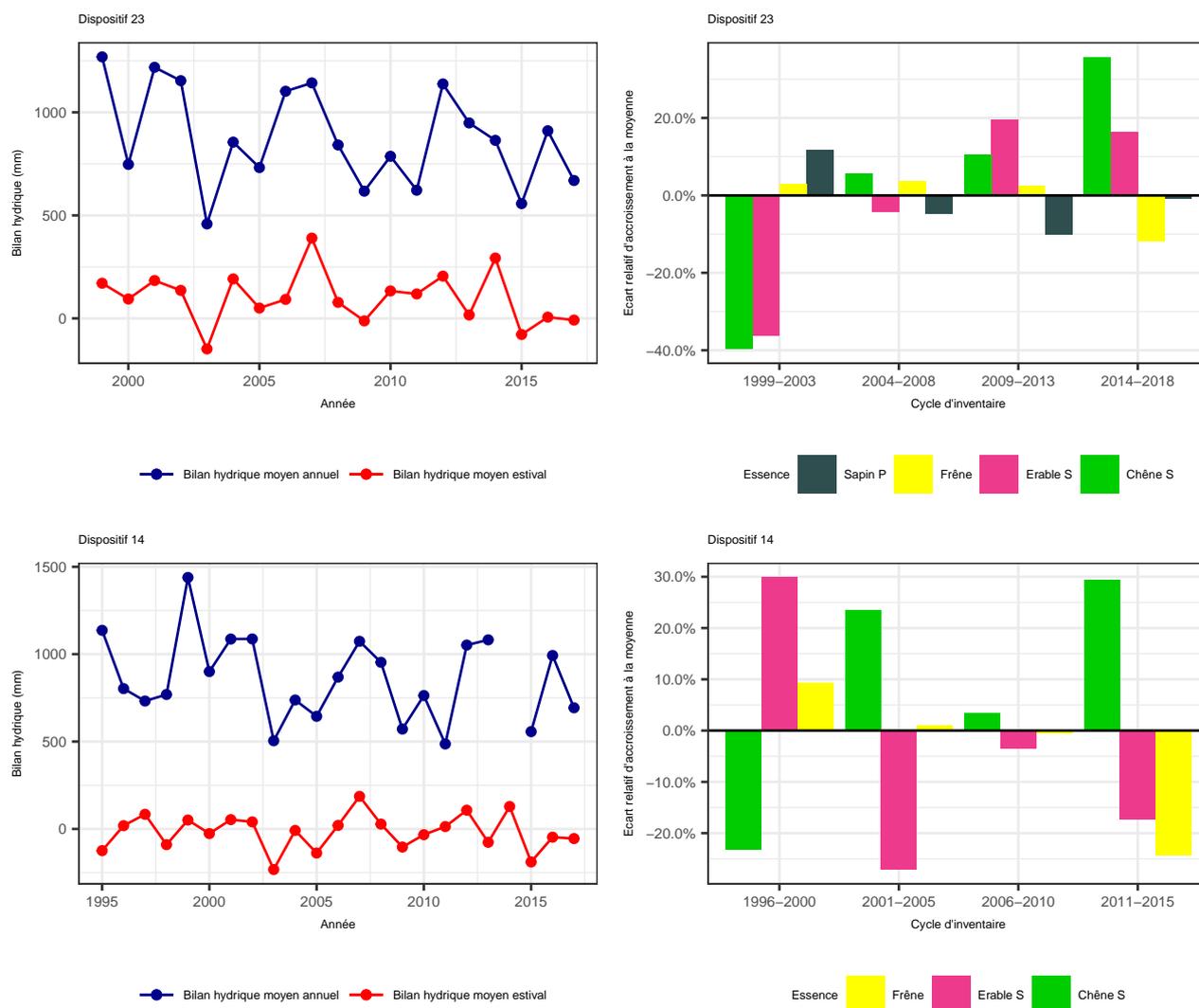


FIGURE 3.1 – Evolutions climatiques et de l'accroissement pour deux dispositifs du cas n°1

La figure 3.1 met en évidence le problème d'échelle des données : annuelle pour les variables climatiques et par cycle pour l'accroissement. Un accroissement moyen sur la totalité de la période de suivi a été calculé et sert de référence pour détecter des différences d'accroissement lors des inventaires. Les deux dispositifs

présentés ont des bilans hydriques très différents selon que l'on considère l'année ou la période estivale. Le bilan hydrique estival reste stable autour de 0 mm sauf lors des années de grandes sécheresses (2003, 2015). Les écarts d'accroissement à la moyenne permettent de repérer des années extrêmes. Ainsi, pour le dispositif 23, au premier cycle l'écart de -40 % peut s'expliquer par l'année 2003 en fin de cycle. Pour le dispositif 14, l'année 2003 se situe en milieu de cycle, ce qui peut masquer son effet. Par ailleurs, la figure permet déjà de constater des réponses différentes entre les essences. En effet, les écarts d'accroissement à la moyenne diffèrent selon les essences. Par exemple, sur le premier cycle du dispositif 23, le chêne sessile et l'érable sycomore ont un accroissement observé inférieur de 40 % par rapport à la moyenne tandis que le sapin pectiné a un accroissement supérieur à la moyenne de 10 % environ.

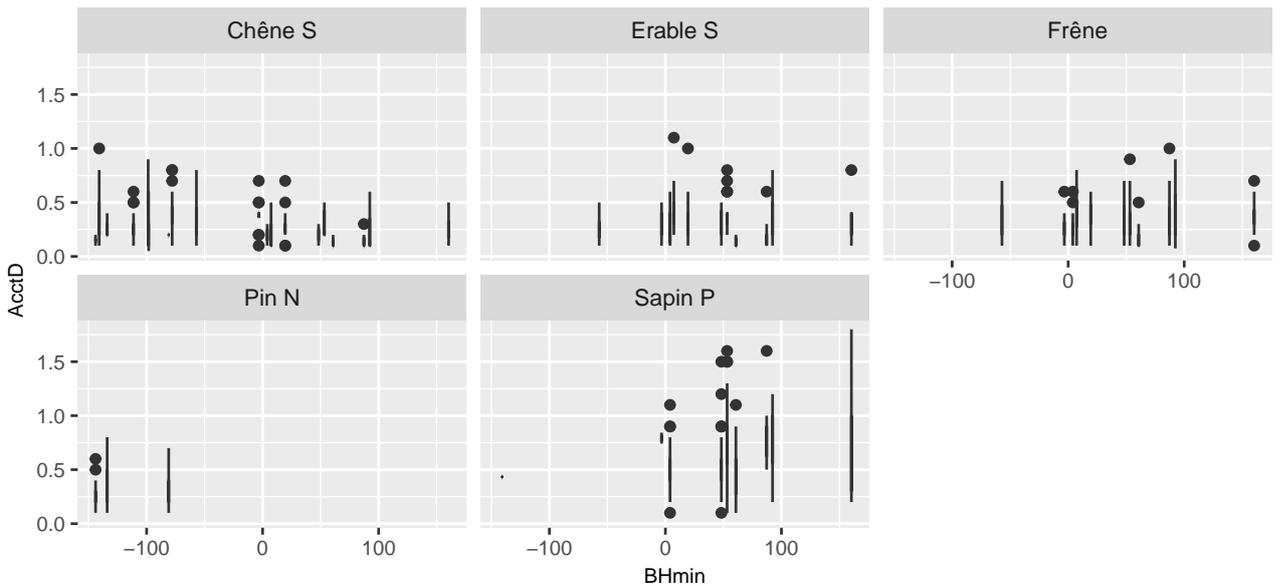
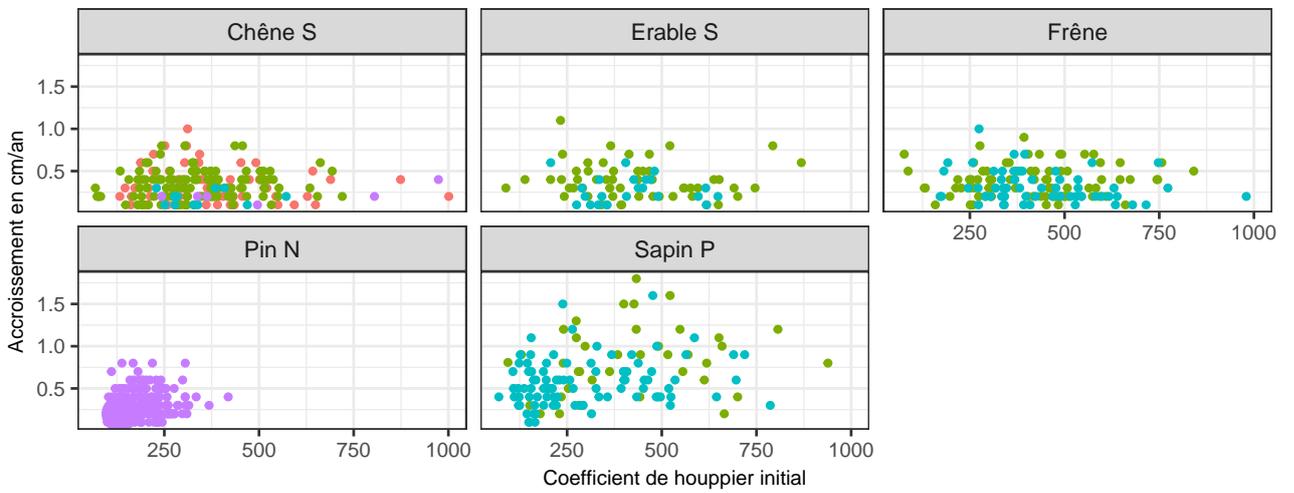
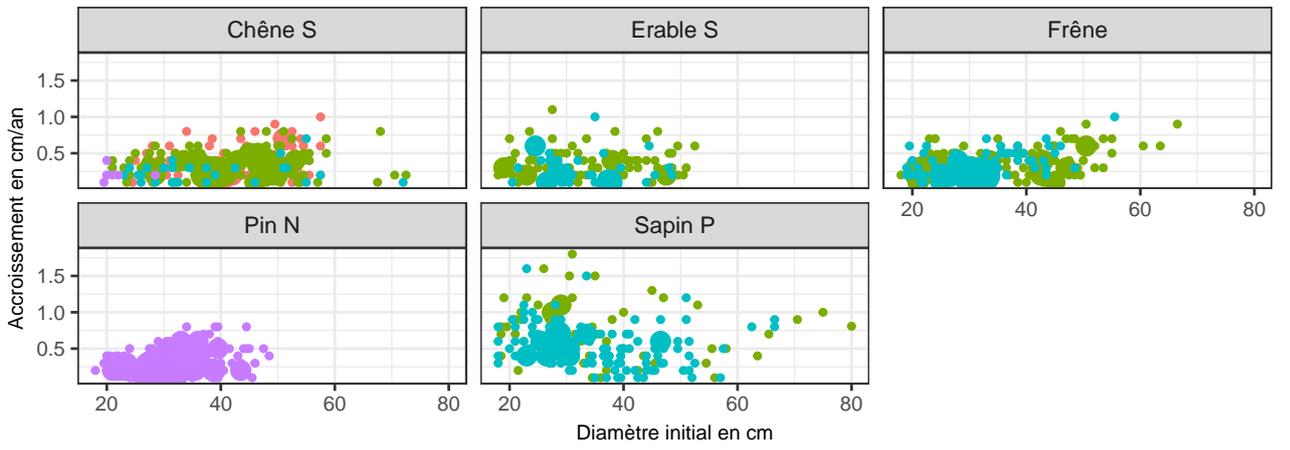


FIGURE 3.2 – Analyse exploratoire pour le cas n°1

La figure 3.2 permet de mieux comprendre les variables et les éventuelles corrélations qui pourraient exister. Il n'y a pas de tendance évidente entre l'accroissement et le diamètre initial. Cependant, les gros bois de frêne semblent pousser plus vite que les petits diamètres, de même pour le chêne. Il y a également une forte variabilité entre les individus au regard de l'amplitude des accroissements en fonction du diamètre.

Les données du cas 2, disponible en annexe K sont plus représentatifs d'une gestion irrégulière qui permet à tous les arbres, quelque soit leur diamètre initial, de pousser à la même vitesse. Les conditions alors limitantes sont les conditions climatiques, la variabilité individuelle et la période prise en compte. En effet, la surface terrière totale du peuplement ne semble pas non plus influencer sur les accroissements.

Pour le cas 3 (voir annexe K), il y a une légère tendance de l'accroissement à augmenter avec le diamètre. Cela est caractéristique des plantations résineuses gérées autrefois en régulier. La surface terrière totale du peuplement est également plus discriminante sur l'accroissement des arbres.

Cela nous permet donc de présager de l'importance des variables arbres et peuplement dans chacun des cas et d'envisager déjà les variables à inclure dans les modèles statistiques.

3.3.2 Modèle statistique proposé et choix de la méthode

Notre jeu de données est donc un pool d'individus hiérarchisés en dispositif et placette et sur lesquels les mesures de diamètre ont été répétées lors des inventaires. Pour prendre en compte la variabilité des individus qui existe mais qui n'est pas traduite dans les variables mesurées, il faut pouvoir faire intervenir dans le modèle explicatif, un effet aléatoire. En effet, cette variabilité doit être considérée même si son estimation précise n'est pas nécessaire. Ainsi, pour ce type de données, le modèle linéaire mixte à effet aléatoire semble approprié. Il est particulièrement utile lorsque les données sont hiérarchisées et longitudinales.

Il faut donc définir d'une part des effets fixes, mesurés et dont tous les niveaux sont connus, permettant d'expliquer la variable réponse. D'autre part, des effets aléatoires seront introduits pour tenir compte de la variabilité entre les individus. Les variables climatiques qui sont les variables d'intérêt seront des effets fixes.

Le modèle linéaire mixte à effet aléatoire s'écrit comme suit, pour un individu i :

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \times X_i + u_i \times Z + \epsilon_i \quad (3.1)$$

où :

- Y_i est la variable réponse pour l'individu i ,
- β_0 , le coefficient de l'ordonnée à l'origine
- β_1 , le coefficient de la variable explicative X de l'individu i
- u_i est le coefficient aléatoire pour la variable Z

Un modèle linéaire mixte permet d'une part d'expliquer la variable d'intérêt sur la population moyenne grâce aux coefficients des variables fixes mais aussi d'expliquer pour chaque individu appartenant à un groupe, ici une placette et un dispositif, grâce au facteur aléatoire.

Pour établir le modèle entre l'accroissement en diamètre et les variables climatiques, la méthode ascendante a été choisie. Pour bien estimer l'impact du climat sur l'accroissement, les effets arbre et peuplement sur l'accroissement ont d'abord été testés. L'effet du site est introduit en effet aléatoire, pour intégrer la variabilité qu'il induit. Plus précisément, la méthode ascendante consiste donc à ajouter pas à pas les variables liées aux différentes échelles (arbre, peuplement, climat) et à ne garder que celles qui améliorent le modèle. Les variables sont ajoutées d'abord sans interaction, puis celles-ci sont ensuite testées et gardées si elles permettent d'améliorer le modèle. Ajouter l'effet climat en dernier lieu permet de mieux contrôler l'importance des autres effets. Pour faciliter l'interprétation des résultats, les variables significatives dans l'explication de l'accroissement sur le diamètre ont été centrées et réduites.

Enfin, les modèles ainsi construits sont sélectionnés sur la base du critère d'Akaike Information Criterion (AIC) et du Bayesian Information Criterion (BIC). Le modèle le plus parcimonieux aura l'AIC et le BIC le plus

faible. Arbitrairement, j'ai choisi de fixer un écart supérieur ou égal à 5 pour décider qu'un modèle est plus ajusté qu'un autre. Dans le cas, où la différence d'AIC entre deux modèles serait inférieur à 5, le choix se portera sur le modèle le plus simple, c'est-à-dire avec le moins de paramètres ou avec des paramètres plus facilement mesurables.

3.3.3 Comparaison et sélection de modèles

3.3.3.1 Cas 1 : Peuplements mélangés sur sols calcaires

Dans un premier temps, les paramètres aléatoires ont été définis puis leurs significativités par rapport à un modèle sans effet aléatoire ont été vérifiées. Le numéro de dispositif, le numéro de la placette et le numéro de l'arbre sont apparus significatifs. Sur l'histogramme de répartition de la variable réponse, la variable accroissement est centrée sur les petites valeurs. Cependant, une transformation sur cette même variable n'était pas nécessaire. Le tableau ci-dessous détaille la méthode ascendante, par l'ajout au fur et à mesure des variables significatives. La dernière colonne donne la significativité de la variable rajoutée.

TABLE 3.5 – Effets des variables sur l'accroissement pour le cas 1

Modèle	AIC	BIC	Pr(>Chisq)
$AcctD = 1 + (Site, Placette, Arbre)$	-171	-147	
$AcctD = Essence + (Site, Placette, Arbre)$	-323	-284	< 2.2e-16
$AcctD = Essence + Diam.initial + (Site, Placette, Arbre)$	-246	-204	0.322
$AcctD = Essence + Choup.initial + (Site, Placette, Arbre)$	-142	-103	0.355
$AcctD = Essence + HautT.initial + (Site, Placette, Arbre)$	-136	-97	0.7758
$AcctD = Essence + Prop.initial + (Site, Placette, Arbre)$	-320	-276	0.7056
$AcctD = Essence + GTot.initial + NTot.initial + (Site, Placette, Arbre)$	-320	-272	0.2921 et 0.8217
$AcctD = Essence + GhaPla.initial + (Site, Placette, Arbre)$	-325	-282	0.01845
$AcctD = Essence + GhaPla.initial + Essence : GhaPla.initial + (Site, Placette, Arbre)$	-330	-272	0.01384
$AcctD = Essence + GhaPla.initial + NhaPla.initial + Essence : GhaPla.initial + (Site, Placette, Arbre)$	-328	-265	0.77905
1 $AcctD = Essence + GhaPla.initial + Essence : GhaPla.initial + ETPmoy + (Site, Placette, Arbre)$	-328	-265	0.877593
2 $AcctD = Essence + GhaPla.initial + Essence : GhaPla.initial + DHmax + (Site, Placette, Arbre)$	-328	-265	0.92434
3 $AcctD = Essence + GhaPla.initial + Essence : GhaPla.initial + Tmoy_{hiv_{cycle}} + Tmoy_{hiv_{cycle}} : Essence + (Site, Placette, Arbre)$	-328	-265	0.566045
4 $AcctD = Essence + GhaPla.initial + Essence : GhaPla.initial + BHmoy + (Site, Placette, Arbre)$	-329	-266	0.24958
5 $AcctD = Essence + GhaPla.initial + Essence : GhaPla.initial + BHmin + (Site, Placette, Arbre)$	-330	-267	0.199904
6 $AcctD = Essence + GhaPla.initial + Essence : GhaPla.initial + Tmax_{ete_{cycle}} + (Site, Placette, Arbre)$	-331	-268	0.09671
7 $AcctD = Essence + GhaPla.initial + Essence : GhaPla.initial + Pmoy + (Site, Placette, Arbre)$	-333	-270	0.012295

Les variables relatives à l'individu telles que le diamètre, le coefficient de houppier ou la hauteur ne sont pas significatives et n'apportent pas dans l'explication de l'accroissement une fois le facteur Essence pris en compte. Les variables du peuplement à l'échelle du dispositif n'apportent rien de plus dans l'explication de

l'accroissement que les variables du peuplement à l'échelle de la placette. C'est pourquoi la surface terrière de la placette a été retenue. Dans les variables climatiques, les précipitations moyennes ainsi que la température moyenne maximale estivale sont significatives pour expliquer les accroissements en milieu calcaire. Mais, aucune interaction entre ces variables et l'essence n'a été mise en évidence. La valeur du coefficient de T_{\max} est négative tandis que le coefficient de P_{moy} est positif. Une température moyenne maximale trop élevée agit négativement sur la croissance des arbres tandis qu'une bonne pluviométrie favorise des accroissements forts.

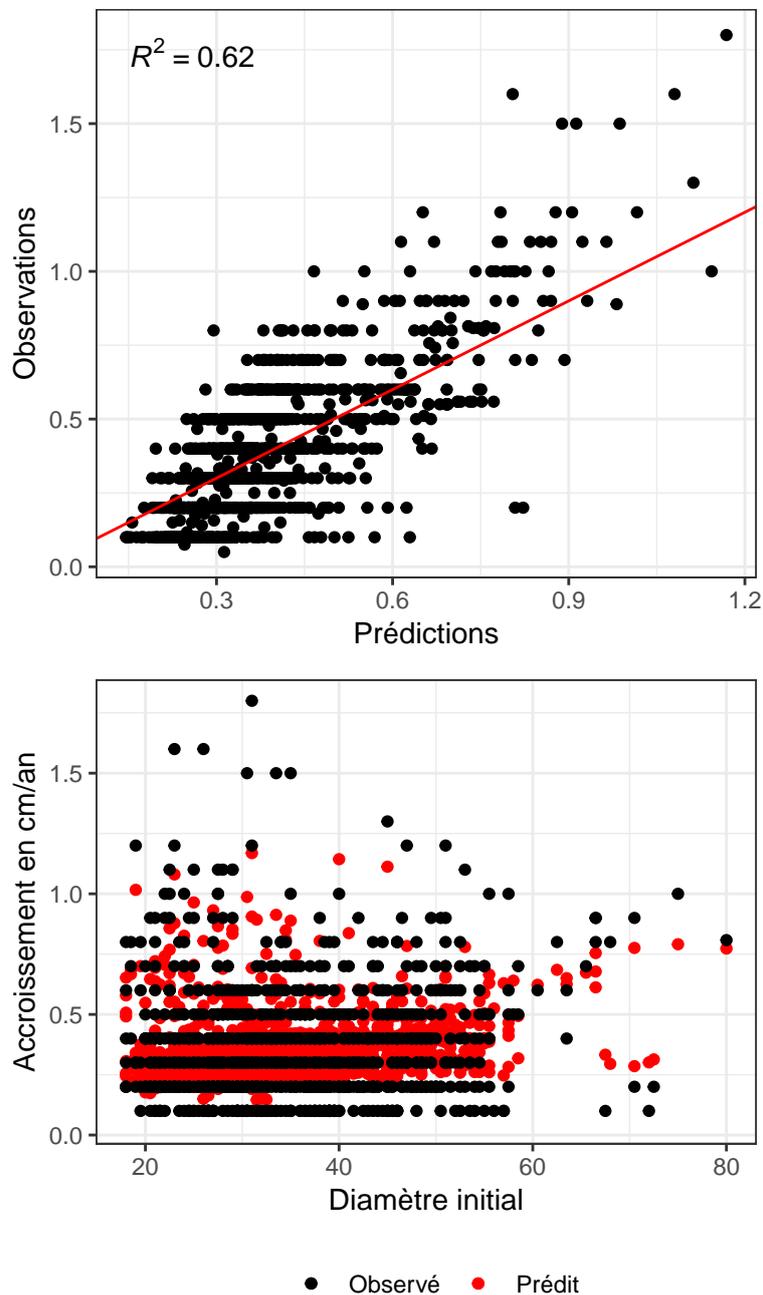


FIGURE 3.3 – Cas 1 - ajustement du modèle

La figure 3.3 permet d'apprécier l'ajustement du modèle aux observations faites sur le terrain en incluant la variable T_{\max} dans le modèle. Le modèle avec la température moyenne maximale permet d'expliquer jusqu'à 60 % de l'accroissement. Le modèle prend assez bien en compte la variabilité des données même s'il ne traduit

pas la tendance constante des accroissements en futaie irrégulière.

3.3.3.2 Cas 2 : Chênaies sur sols hydromorphes

Les données du cas 2 présentent une très grande variabilité. D'après l'analyse exploratoire (voir annexe K), les variables arbres ne sont pas corrélées à l'accroissement. Pour essayer d'expliquer cette variabilité, l'effet compétition a été pris en compte. Dans un premier temps, en tenant compte uniquement de la surface terrière et densité de tiges totales du dispositif et dans un second temps, de ces mêmes variables mais à l'échelle d'une placette. Pour être plus juste, les arbres distants de plus de 15 mètres du centre de la placette n'ont pas été considérés. Cependant, la compétition à l'échelle de la placette est sous-estimée car seuls les arbres précomptables sont comptés. Les résultats n'étant pas meilleurs avec les variables à l'échelle de la placette, les variables à l'échelle du dispositif ont été préférées.

TABLE 3.6 – Effets des variables climatiques sur l'accroissement pour le cas 2

Modèle	AIC	BIC	Pr(>Chisq)
1 $AcctD = Prop.initial + NTot.initial + Prop.initial + NTot.initial + Tmoy_{ete_{cycle}} + (Site, Placette, Arbre)$	-687	-638	0.091214
2 $AcctD = Prop.initial + NTot.initial + Prop.initial + NTot.initial + Tmoy_{hiv_{cycle}} + Tmoy_{ete_{cycle}} + Tmoy_{hiv_{cycle}} + Tmoy_{ete_{cycle}} + (Site, Placette, Arbre)$	-709	-649	2.373e-05 et 0.007404 et 0.001456
3 $AcctD = Prop.initial + NTot.initial + Prop.initial + NTot.initial + Tmoy_{hiv_{cycle}} + (Site, Placette, Arbre)$	-746	-697	0.426064
4 $AcctD = Prop.initial + NTot.initial + Prop.initial + NTot.initial + BHmin + (Site, Placette, Arbre)$	-749	-699	0.074801
5 $AcctD = Prop.initial + NTot.initial + Prop.initial + NTot.initial + Pmoy + (Site, Placette, Arbre)$	-750	-701	0.03017
6 $AcctD = Prop.initial + NTot.initial + Prop.initial + NTot.initial + ETPmoy + (Site, Placette, Arbre)$	-751	-702	0.01828
7 $AcctD = Prop.initial + NTot.initial + Prop.initial + NTot.initial + Tmax_{ete_{cycle}} + (Site, Placette, Arbre)$	-759	-709	0.0002571
8 $AcctD = Prop.initial + NTot.initial + Prop.initial + NTot.initial + BHmoy + (Site, Placette, Arbre)$	-761	-712	3.957e-05
9 $AcctD = Prop.initial + NTot.initial + Prop.initial + NTot.initial + DHmax + (Site, Placette, Arbre)$	-762	-713	4.588e-05

Les variables climatiques avec une forte influence sur l'accroissement sont celles des modèles 7, 8 et 9 du tableau ci-dessus. La valeur du coefficient de DH_{max} est positive. Dans des sols où l'hydromorphie peut être contraignante, une sécheresse peut ponctuellement en améliorer les conditions et être favorable à la croissance des chênes. De même, la valeur du coefficient de BH_{moy} est positive. Au contraire, la température moyenne maximale impacte négativement l'accroissement. Une température maximale trop élevée sur un cycle fait diminuer les accroissements.

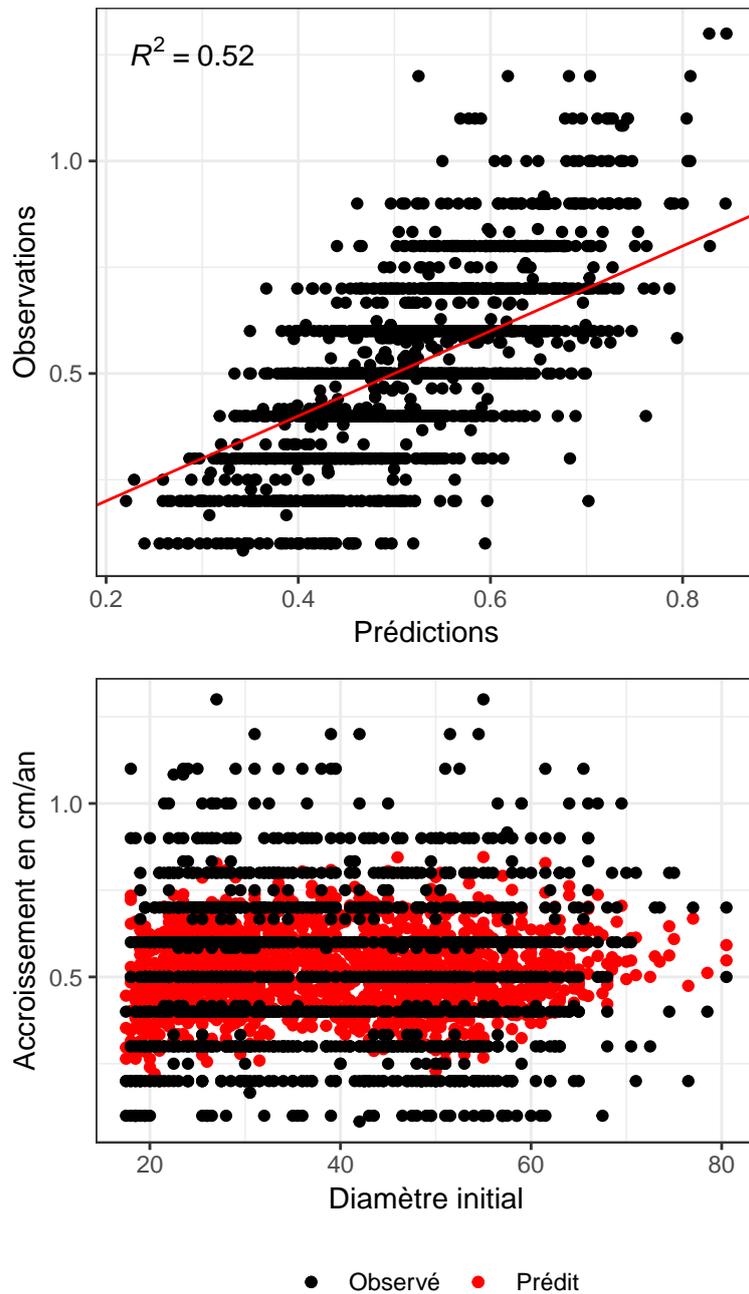


FIGURE 3.4 – Cas 2 - ajustement du modèle

Si l'on considère la variable du déficit hydrique maximal, le modèle permet d'expliquer environ 50 % des accroissements observés. La forte variabilité des individus est mal prise en compte dans le modèle notamment pour les accroissements très forts pouvant tout aussi bien être issus d'une erreur de mesure sur le terrain, et les accroissements faibles.

3.3.3.3 Cas 3 : Douglasaies sur sols acides

L'ajout des variables arbres a confirmé la tendance observée dans l'analyse exploratoire. Certaines variables arbres sont ressorties significatives dans l'explication de l'accroissement.

TABLE 3.7 – Effets des variables climatiques sur l'accroissement des douglas

Modèle	AIC	BIC	Pr(>Chisq)
1 $AcctD = Diam.initial + Choup.initial + Prop.initial + GTot.initial + NTot.initial + ETPmoy + Diam.initial + Choup.initial + Prop.initial : Diam.initial + (Site, Placette, Arbre)$	232	290	1.178e-11
2 $AcctD = Diam.initial + Choup.initial + Prop.initial + GTot.initial + NTot.initial + BHmin + Diam.initial + Choup.initial + Prop.initial : Diam.initial + (Site, Placette, Arbre)$	231	289	< 2.2e-16
3 $AcctD = Diam.initial + Choup.initial + Prop.initial + GTot.initial + NTot.initial + Pmoy + Diam.initial + Choup.initial + Prop.initial : Diam.initial + (Site, Placette, Arbre)$	230	288	4.156e-12
4 $AcctD = Diam.initial + Choup.initial + Prop.initial + GTot.initial + NTot.initial + DHmax + Diam.initial + Choup.initial + Prop.initial : Diam.initial + (Site, Placette, Arbre)$	227	272	1.501e-12
5 $AcctD = Diam.initial + Choup.initial + Prop.initial + GTot.initial + NTot.initial + Tmoy_{ete_{cycle}} + Diam.initial + Choup.initial + Prop.initial : Diam.initial + (Site, Placette, Arbre)$	224	283	2.428e-13
6 $AcctD = Diam.initial + Choup.initial + Prop.initial + GTot.initial + NTot.initial + Tmax_{ete_{cycle}} + Diam.initial + Choup.initial + Prop.initial : Diam.initial + (Site, Placette, Arbre)$	219	277	1.123e-14
7 $AcctD = Diam.initial + Choup.initial + Prop.initial + GTot.initial + NTot.initial + Tmoy_{hiv_{cycle}} + Diam.initial + Choup.initial + Prop.initial : Diam.initial + (Site, Placette, Arbre)$	200	258	< 2.2e-16

Au fur et à mesure de l'ajout des variables arbre et peuplement, la variabilité prise en compte dans les effets aléatoires s'est estompée. En effet, les dispositifs de douglas ont des caractéristiques assez proches sur le plan stationnel. La variable BH_{moy} n'est pas ressortie significative. Les différentes variables climatiques apportent des réponses similaires pour l'explication de l'accroissement quand on regarde les valeurs de l'AIC. Les douglas semblent très sensibles aux températures plus qu'aux conditions hydriques. Les résultats des coefficients des variables climatiques testées montrent que la température moyenne hors période de végétation influe négativement sur l'accroissement, de même que la température moyenne maximale. Pourtant, le douglas est une essence assez résistante au froid, le seuil d'apparition des dégâts étant estimé à $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Nageleisen *et al.*, 2010). Les valeurs de température moyenne hors période de végétation sont ici comprises entre 7 et $9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Le douglas est une essence assez tolérante vis-à-vis des stations à faibles réserves en eau et dans des sols non contraignants, son enracinement lui permettant d'aller puiser l'eau profondément dans le sol. Ce comportement peut expliquer les résultats des variables climatiques hydriques.

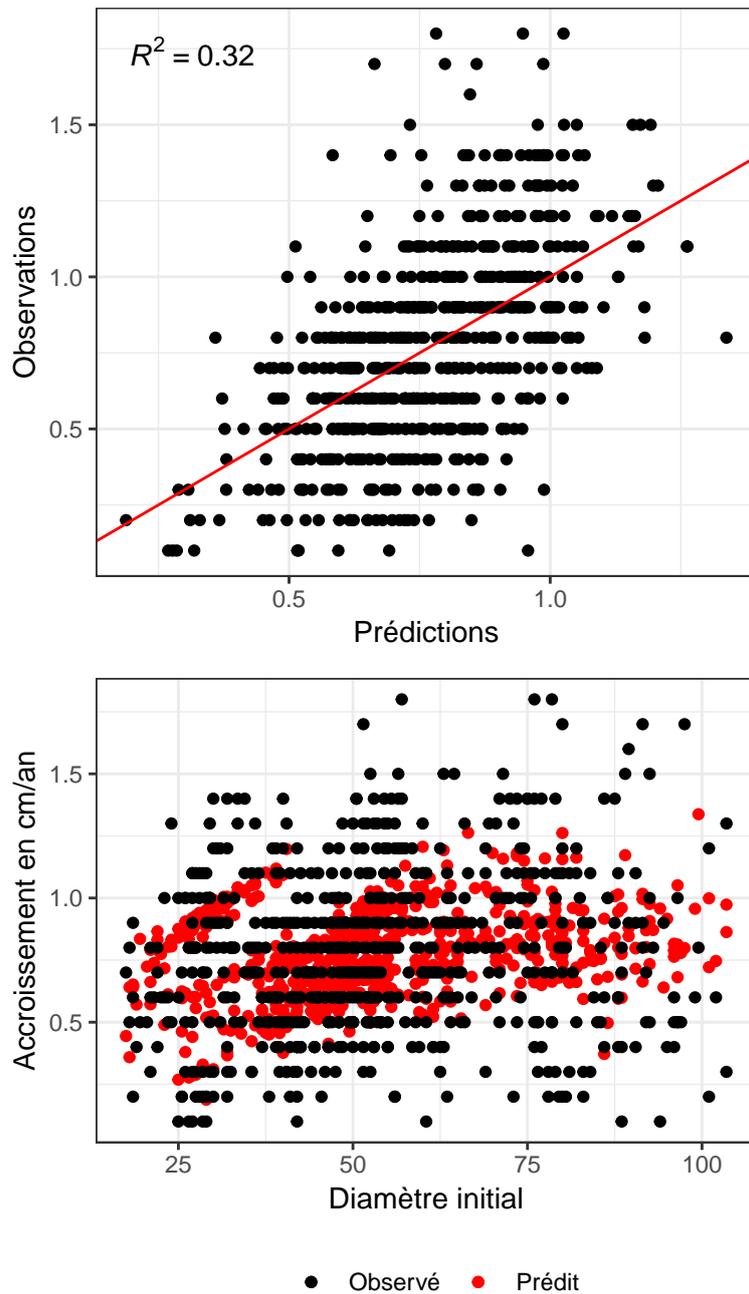


FIGURE 3.5 – Cas 3 - ajustement du modèle

Le modèle avec la température moyenne hors période de végétation permet ici d'expliquer environ 30 % des accroissements observés. Les observations du terrain en fonction des prédictions du modèle se répartissent de manière assez homogène autour de la droite 1 :1 (voir la figure 3.5) permettant de conclure que l'explication par la température moyenne hors période de végétation de l'accroissement est pertinente.

3.3.3.4 Cas 4 : Hêtraies sur sols calcaires ou sableux

La même démarche a été suivie pour le cas du hêtre et les résultats sont présentés ci-dessous.

TABLE 3.8 – Effets des variables climatiques sur l'accroissement des hêtres

Modèle	AIC	BIC	Pr(>Chisq)
1 $AcctD = Diam.initial + Choup.initial + Prop.initial + GTot.initial + NTot.initial + BHmoy + (Site, Placette, Arbre)$	-614	-558	0.0005677
2 $AcctD = Diam.initial + Choup.initial + Prop.initial + GTot.initial + NTot.initial + Pmoy + (Site, Placette, Arbre)$	-616	-560	0.0002283
3 $AcctD = Diam.initial + Choup.initial + Prop.initial + GTot.initial + NTot.initial + ETPmoy + (Site, Placette, Arbre)$	-623	-567	5.490e-06
4 $AcctD = Diam.initial + Choup.initial + Prop.initial + GTot.initial + NTot.initial + Tmax_{ete_{cycle}} + (Site, Placette, Arbre)$	-625	-570	1.641e-06
5 $AcctD = Diam.initial + Choup.initial + Prop.initial + GTot.initial + NTot.initial + Tmoy_{niv_{cycle}} + (Site, Placette, Arbre)$	-629	-573	2.064e-07
6 $AcctD = Diam.initial + Choup.initial + Prop.initial + GTot.initial + NTot.initial + BHmin + (Site, Placette, Arbre)$	-631	-575	1.266e-08
7 $AcctD = Diam.initial + Choup.initial + Prop.initial + GTot.initial + NTot.initial + DHmax + (Site, Placette, Arbre)$	-632	-577	4.448e-08

Les variables les plus significatives et minimisant l'AIC sont la température moyenne hors période de végétation, le bilan hydrique estival moyen et le déficit hydrique maximal sur un cycle. Les valeurs des coefficients des variables BH_{min} et DH_{max} sont positives : les hêtres réagissent positivement à des conditions hydriques plus sèches.

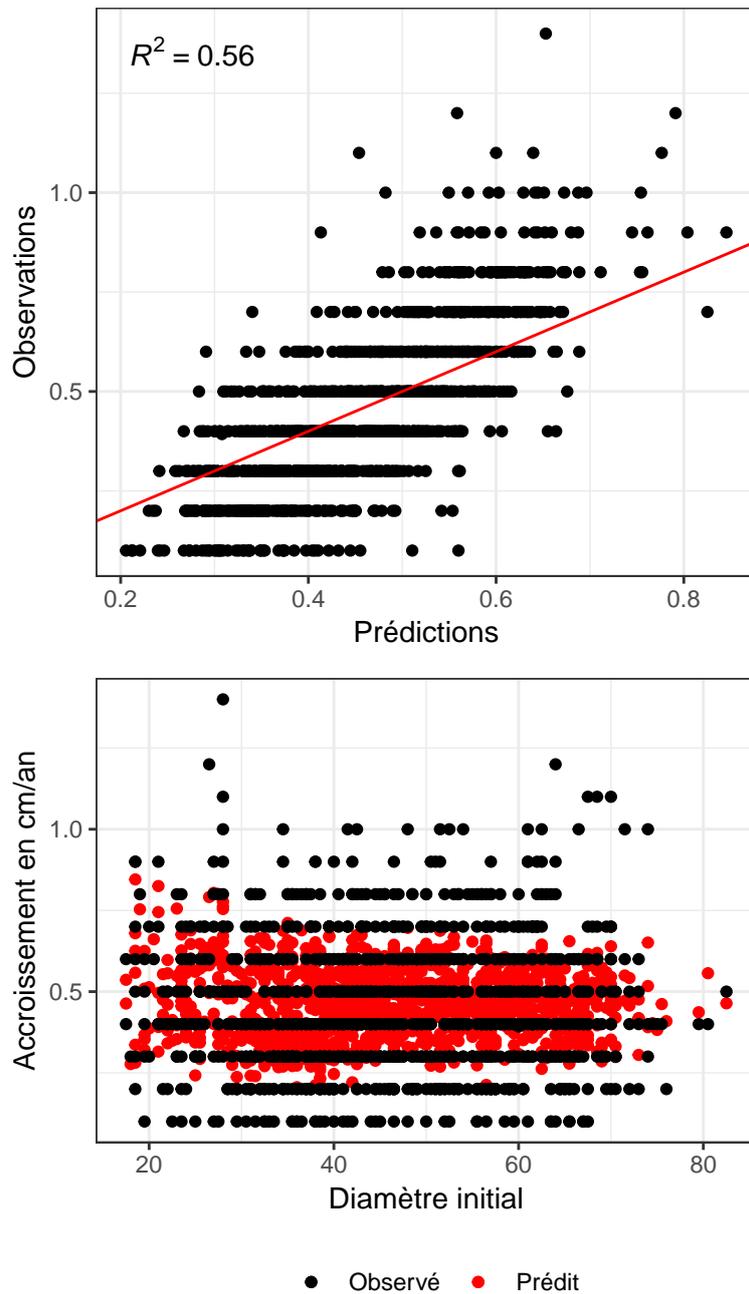


FIGURE 3.6 – Cas 4 - ajustement du modèle

La figure 3.6 montre l'adéquation des prédictions du modèle aux données de terrain. La variable BH_{\min} a été choisie pour présenter ces résultats. En l'incluant dans le modèle, cela permet d'expliquer 56 % de la variabilité des accroissements observés. Le modèle ne suffit pas à expliquer la totalité de la variabilité, notamment pour les valeurs extrêmes (accroissements forts et faibles) mais la répartition moyenne générale est assez bonne.

3.4 Discussion

Variables propres aux peuplements

Dans les trois premiers cas, les variables peuplement (surface terrière, proportion de l'essence) ont un effet

négalif sur l'accroissement. Pour le deuxième et troisième cas, la proportion initiale de l'essence considérée au sein du peuplement est également une variable significative dans l'explication de l'accroissement. Plus le peuplement est pur et plus l'accroissement est faible, le coefficient de la variable traduisant le mélange étant négatif. Dans le deuxième cas, l'interaction entre la proportion de chêne dans le peuplement diminue quand le nombre total de tiges augmente. Pour quelques dispositifs, au début du suivi la dynamique du charme était assez importante et continue à être maîtrisée.

Le diamètre initial souvent utilisé dans les modèles de compétition n'est ressorti significatif que dans les peuplements de douglas et dans les peuplements de hêtres. Un bon diamètre initial assure un accroissement plus favorable dans les peuplements du cas 3. Pour le quatrième cas, le diamètre initial est significatif même s'il contribue assez peu à l'amélioration du modèle. A l'équilibre, dans un peuplement conduit en futaie irrégulière, les accroissements sont quasiment identiques quelque soit la classe de diamètre de l'individu. Pour le troisième cas, le coefficient de houppier initial a également une influence positive sur l'accroissement. Un faible coefficient de houppier induit un accroissement plus faible. L'interaction entre le coefficient de houppier et le diamètre initial est significative. Ces deux variables sont corrélées négativement (corrélation de -0,57). Les variables du peuplement traduisant l'effet de compétition subit par les arbres semblent les plus explicatives de l'accroissement plutôt que des variables arbres individuelles.

Effets aléatoires

Dans chacun des cas étudiés, les sites ont été choisis pour diminuer l'effet stationnel pouvant intervenir sur l'accroissement. Pour le cas 3, les effets aléatoires traduisant les variabilités liées aux sites, placettes et aux mesures répétées sur les mêmes individus deviennent non significatifs lorsque les variables climatiques sont intégrées. Dans le premier cas et quatrième cas, la variabilité entre les sites est plus importante que celle liée aux placettes, de l'ordre de 3 % et 22 % respectivement tandis que dans le deuxième cas, la variabilité entre les placettes des sites est plus élevée (environ 2 %). Les variables climatiques ne suffisent pas à expliquer la variabilité liée aux sites. Il y a donc d'autres paramètres qui semblent intervenir mais qui n'ont pas été pris en compte dans le modèle. Les dispositifs des cas n°1 et n°2 bien qu'assimilés à une catégorie de stations (hydromorphes ou calcaires) présentent en réalité une grande variation pédologique.

Variables climatiques

La plupart des variables climatiques ont montré un effet significatif sur l'accroissement. Cependant certaines variables ont un impact plus important sur celui-ci.

Dans le premier cas, seules les précipitations moyennes et la température moyenne maximale sur la période de végétation ont un effet significatif. L'absence d'interaction pour ces variables avec l'essence ne permet pas de montrer une différence de comportement des essences face à celles-ci. Ceci paraît étonnant au vu de l'autécologie des essences. Le frêne a des besoins en eau assez importants du fait de la régulation tardive de sa transpiration tandis que le pin noir, par exemple, grâce à un enracinement profond résiste bien à la sécheresse. Les données climatiques sur des périodes de cinq ans ne permettent pas de discriminer des essences qui résistent assez bien aux sécheresses (pin noir et érable sycomore) d'essences un peu moins tolérantes au stress hydrique (frêne et sapin pectiné).

Dans les chênaies sur sols hydromorphes, la plupart des variables climatiques semblent jouer un rôle dans l'explication de l'accroissement sans qu'aucune ne se démarque de manière évidente. Les variables de température ont des coefficients négatifs tandis que les variables de bilan hydrique ont des coefficients positifs. Le bilan hydrique moyen annuel et le déficit hydrique maximal sur un cycle ont des effets plus significatifs que les autres. L'enracinement profond et puissant du chêne lui permet d'être assez tolérant à la sécheresse en allant puiser l'eau plus profondément.

Mes résultats ne semblent pas si éloignés de ce qu'on peut trouver dans la littérature. Bien que l'étude n'ait pas permis de montrer de différence de comportement entre les essences dans le premier cas, la littérature permet de discuter les résultats.

Le sapin pectiné à des altitudes inférieures à 800 mètres est sensible au bilan hydrique de mai à juillet avec

des différences de réponse en fonction du type de bois. Le bois initial est sensible au bilan hydrique de l'automne de l'année précédente et à la température de février de l'année de croissance tandis que le bois final est sensible à la sécheresse des mois de juin et juillet (Lebourgeois *et al.*, 2010). Une étude plus ancienne sur le sapin pectiné du Jura montre l'effet du stress climatique sur la perte d'accroissement ainsi que l'influence importante de la fourniture en eau (Bert, 1993).

Pour le hêtre, le bilan hydrique moyen sur la période de végétation ainsi que le déficit hydrique maximal sur un cycle ressortent significatifs dans l'explication de l'accroissement. Une étude de Badeau (1995) montre qu'en plateau calcaire, le cumul de déficit hydrique de juin à août explique près de 60 % de la variabilité de croissance. De même, Lebourgeois (2005) confirme que le déficit hydrique estival annuel influence négativement la croissance des peuplements de hêtre et plus particulièrement, le déficit du mois de juin explique de 22,2 % jusqu'à 35,6 % de la variabilité interannuelle chez le hêtre. La température quant à elle, joue un rôle secondaire. Des températures minimales élevées en automne aurait un effet positif sur l'accroissement.

Contrairement au hêtre, il paraît plus difficile de modéliser l'effet du climat sur l'accroissement du chêne sessile (et pédonculé). Il n'y a pas de facteur climatique unique qui explique la variabilité d'accroissement. Cependant, les conditions climatiques estivales semblent être un facteur clé pour le chêne. Le déficit hydrique de juillet est corrélé négativement à la largeur des cernes, entre 10 % et 28,6 % de la variabilité de croissance. Une partie des chênaies étudiées par Lebourgeois (2006) ont réagi positivement à une absence de sécheresse en automne et des températures hivernales clémentes.

De manière générale, la température moyenne annuelle et le bilan hydrique de juillet montrent un lien significatif avec la distribution du sapin pectiné et du hêtre mais les températures hivernales, l'évapotranspiration potentielle printanière et les précipitations moyennes annuelles sont peu discriminantes (Piedallu *et al.*, 2009). Des résultats de Garcia-Suarez *et al.* (2009), un peu différents, sembleraient confirmer le rôle de la température estivale dans la croissance. En effet, les espèces feuillues de son étude sont particulièrement affectées par les précipitations et la température maximale de la fin printemps et début d'été.

Dans la bibliographie précédemment citée, les différents modèles de croissance intégrant les variables climatiques peuvent expliquer de 28,5 % (chêne) jusqu'à 34 % (hêtre) de la variation de croissance. Ainsi, mes résultats, au regard de la littérature existante, confirment l'importance des variables climatiques dans l'explication de la croissance. Certaines variables sont plus prépondérantes que d'autres et ont un effet prédominant sur l'accroissement par rapport aux variables de compétition.

La plupart des études de ce type sont menées en utilisant des méthodes de dendrochronologie (carottage des arbres). Ces méthodes permettent d'étudier les variations annuelles de croissance en lien avec les variations climatiques annuelles (voire mensuelles).

Mon analyse se base sur des cycles de cinq ans, soit le temps entre deux phases d'inventaire. Les variables climatiques calculées sur la même échelle peuvent masquer des années extrêmes ponctuelles et ainsi réduire leur impact sur la croissance. Des données numériques de terrain pourraient, dans une certaine mesure, permettre d'affiner les données par dispositif pour mieux intégrer les spécificités de chaque dispositif.

Conclusion

Le présent mémoire fait état d'un nouveau bilan du réseau AFI selon plusieurs thématiques variées.

Il aura permis d'améliorer le traitement économique des dispositifs AFI en installant une double comptabilité. La double comptabilité apporte un éclairage différent sur la gestion des dispositifs et permet notamment de les placer dans la réalité du marché. A l'état d'équilibre atteint, la gestion de la qualité permet de bien valoriser les bois et mieux faire face aux baisses des prix du bois.

Aujourd'hui, la valeur des dispositifs de chêne du réseau est élevée d'après les prix du marché, contrairement à ceux du hêtre. Les mélanges au sein de ces dispositifs permettent de poursuivre les objectifs qualitatifs de l'AFI et faire face aux fluctuations du marché. La comparaison des recettes montre que les gestionnaires de l'AFI savent bien valoriser leurs bois par rapport aux tendances du marché. Cet indicateur peut être un outil d'évaluation. Pour garder l'intérêt de la mercuriale de prix variables, elle doit maintenant être tenue à jour.

Ensuite, il aura permis de valoriser des données, notamment les volumes de bois mort au sol et de stade de décomposition pour le calcul du stock de carbone. La majorité des dispositifs AFI stocke du carbone et celui-ci se révèle assez stable au cours du temps qui se répartit à hauteur de 25 % dans la biomasse racinaire, de 10 % maximum dans le bois mort et le reste étant stocké dans la biomasse aérienne. Actuellement, l'enjeu réside dans l'amélioration de la qualité pour augmenter les durées de vie des produits et ainsi, retarder d'autant plus le relargage du carbone dans l'atmosphère.

La valorisation du stock carbone dans le bois mort est intéressante, car le bois mort permet également le stockage de carbone même si les effets sont moindres, notamment à court-terme. Les calculs de carbone dans le bois mort peuvent être intéressants dans les réserves naturelles où les volumes sont beaucoup plus élevés.

Maintenant, il s'agit de valoriser ce travail sur l'étude du stock carbone en futaie irrégulière en envisageant l'élaboration d'une future méthode forestière qui permettrait notamment le partage des connaissances accumulées par l'AFI.

Enfin, le mémoire aura permis d'apporter des améliorations sur la prise en compte des variables de milieux, en particulier les modifications de températures et de précipitations liées aux changements climatiques et d'apporter de nouveaux éclairages sur l'analyse dendrométrique du réseau.

Les données climatiques sont essentielles dans l'explication de l'accroissement tout autant que la sylviculture pratiquée même si sur un pas de temps de cinq ans, les effets sont sous-estimés.

Pour finir, l'intérêt de ce travail qui m'a été confié, réside dans la diversité de thématiques qu'il m'a permis de traiter. Trois des thématiques prioritaires identifiées par l'AFI ont pu être traitées faisant appel à des domaines de recherche et de connaissances très différents. Ce travail m'aura également permis d'en connaître un peu plus dans la technicité et les méthodes de gestion relative au traitement irrégulier.

Bibliographie

- Laurent AUGUSTO, Laurent SAINT-ANDRÉ, Fabrice BUREAU, Delphine DERRIEN, Noémie POUSSE et Lauric CÉCILLON : Séquestration de carbone organique dans les sols forestiers : impacts de la gestion sylvicole. *Forêt-entreprise*, (245):62–66, 2019.
- V. BADEAU : *Etude dendroécologique du Hêtre (Fagus sylvatica L.) sur les plateaux calcaires de Lorraine. Influence de la gestion sylvicole*. Thèse de doctorat, Université Henri-Poincaré, Nancy I, 1995.
- G.D. BERT : Impact of ecological factors, climatic stresses, and pollution on growth and health of silver fir (*Abies alba* mill.) in the Jura mountains : an ecological and dendrochronological study. *Acta Oecologia*, 14 (2):229–246, 1993.
- Ewa BLONSKA, Magdalena KACPRZYK et Anna SPOLNIK : Effect of deadwood of different tree species in various stages of decomposition on biochemical soil properties and carbons storage. *Ecological Research*, (32):193–203, 2017. DOI 10.1007/s11284-016-1430-3.
- Bruno BORDE : Le douglas - quelle sylviculture pour quelle rentabilité ?, 2016. Centre Régional de la Propriété Forestière de Bourgogne-Franche-Comté.
- Michael A. CAIRNS, Sandra BROWN, Eileen H. HELMER et Greg A. BAUMGARDNER : Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*, (111):1–11, 1997.
- Jeffrey Q. CHAMBERS, Niro HIGUCHI, Joshua P. SCHIMEL, Leandro V. FERREIRA et John M. MELACK : Decomposition and carbon cycling of dead trees in tropical forests of the central Amazon. *Oecologia*, (122):380–388, 2000.
- Michel CHAVET : Prix des bois sur pied, une mercuriale depuis 50 ans : une mine d'information recherchée : cas du Chêne. *La Forêt Privée*, pages 44–62, 2008. Hors-Série "Spécial 50e anniversaire". Disponible en ligne au <http://www.laforetprivee.com/index.php?page=consultation>.
- Ministère de la Transition écologique et SOLIDAIRE : Projet de Stratégie National Bas Carbone. La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone, 2018. Disponible en ligne au <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/SNBC>
- Ministère de l'Agriculture de l'Agroalimentaire et de la FORÊT : Le marché du bois en France. Situation actuelle et perspectives à court-terme, octobre 2014. CEE-ONU, Commission économique pour l'Europe des Nations Unies, 72^{ème} session. Consultable en ligne : <http://observatoire.franceboisforet.com/wp-content/uploads/2014/06/Marche-du-bois-2014.pdf>.
- Ministère de l'Agriculture de l'Agroalimentaire et de la FORÊT : Le marché du bois en France. Situation actuelle et perspectives à court-terme, septembre 2016. CEE-ONU, Commission économique pour l'Europe des Nations Unies, 74^{ème} session. Consultable en ligne : <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/timber/country-info/statements/France2016.pdf>.

- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'ÉNERGIE : La compensation volontaire : démarches et limites, 2012. Disponible en ligne au <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/compensation-volontaire-demarches-et-limites-7402.pdf>.
- C. DELEUZE, F. MOREAU, J.P. RENAUD, Y. VIVIEN, M. RIVOIRE et AL. : Estimer le volume total d'un arbre quelles que soient l'essence, la taille, la sylviculture, la station. *Rendez-vous Techniques ONF*, pages 22–32, 2014. hal-01143797.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) : Recommandations en matière de bonnes pratiques pour le secteur de l'utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie, 2003.
- Sébastien ETIENNE : Intégration de la variabilité des cours du bois dans les calculs économiques du réseau AFI. Du calcul d'options réelles à la prise en compte du gain lors des opérations de martelage, 2007. Mémoire de fin d'études, AgroParisTech.
- Shawn FRAVER, Amy M. MILO, John B. BRADFORD, Anthony W. D'AMATO, Laura KENEFIC, Brian J. PALIK, Christopher W. WOODALL et John BRISSETTE : Wood debris volume depletion through decay : Implications for biomass and carbon accounting. *Ecosystems*, (16):1262–1272, 2013. DOI : 10.1007/s10021-013-9682-z.
- A.M. GARCIA-SUAREZ, C.J. BUTLER et M.G.L. BAILLIE : Climate signal in tree-ring chronologies in a temperate climate : A multi-species approach. *Dendrochronologia*, (27):183–198, 2009.
- Noël Le GOFF et Jean-Marc OTTORINI : Root biomass and biomass increment in a beech (*Fagus sylvatica* L.) stand in north-east france. *Annals of Forest Science*, (58):1–13, 2001. 10.1051/forest :2001104 . hal-00883654.
- Julia GRIMAUULT et Olivier GLEIZES : Du projet Vocal au label Bas-carbone...la certification de projets carbone en forêt française. *Forêt-entreprise*, (245):24–29, 2019.
- Mark E. HARMON, Becky FASTH, Christopher W. WOODALL et Jay SEXTON : Carbon concentration of standing and downed woody detritus : Effects of tree taxa, decay class, position and tissue type. *Forest Ecology and Management*, (291):259–267, 2013.
- Mark E. HARMON, Christopher W. WOODALL, Becky FASTH et Jay SEXTON : Woody detritus density and density reduction factors for tree species in the United States : A synthesis. Rapport technique NRS-29, United States Department of Agriculture Forest Service, 2008.
- Mark E. HARMON, Christopher W. WOODALL, Becky FASTH, Jay SEXTON et Misha YATKOV : Differences between standing and downed dead tree wood density reduction factors : A comparison across decay classes and tree species. Rapport technique NRS-15, United States Department of Agriculture Forest Service, 2011.
- Steffen HERRMANN : *Decomposition dynamics and carbon sequestration of downed coarse woody debris of *Fagus sylvatica*, *Picea abies* and *Pinus sylvestris**. Thèse de doctorat, Albert-Ludwigs-Universität (Freiburg-im-Brisgau, Germany), 2017.
- Steffen HERRMANN et Jürgen BAUHHUS : Effect of moisture, temperature and decomposition stage on respiratory carbon loss from coarse woody debris (CWD) of important European tree species. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 28(4):346–357, 2013.
- Association Futaie IRRÉGULIÈRE : *Gestion des peuplements irréguliers, Réseau AFI. Synthèse 1991-2005*, 2005.
- Association Futaie IRRÉGULIÈRE : *Valoriser les fonctions multiples de la forêt. Le traitement des futaies irrégulières*. 2018. Nouvelle édition 2018.
- Timo KAHL : *Kohlenstofftransport aus dem Totholz in den Boden*. Thèse de doctorat, Albert-Ludwigs-Universität (Freiburg-im-Brisgau, Germany), 2008.

- Timo KAHL, Kristin BABER, Peter OTTO, Christian WIRTH et Jürgen BAUHUS : Drivers of CO₂ emission rates from dead wood logs of 13 tree species in the initial decomposition phase. *Forests*, (6):2484–2504, 2015. doi :10.3390/f6072484.
- François LEBOURGEOIS : Approche dendroécologique de la sensibilité du Hêtre (*Fagus sylvatica* L.) au climat en France et en Europe. *Revue Forestière Française*, LVII(1), 2005.
- François LEBOURGEOIS : Sensibilité au climat des Chênes sessile et pédonculé dans le réseau RENECOFOR. Comparaison avec les hêtraies. *Revue Forestière Française*, LVIII(1), 2006.
- François LEBOURGEOIS, Cyrille B.K. RATHGEBER et Erwin ULRICH : Effet de la variabilité climatique et des événements extrêmes sur la croissance d'*Abies alba*, *Picea abies* et *Pinus sylvestris* en climat tempéré français. *Revue Forestière Française*, LXII(1), 2010.
- Maxime MINOTTE : Nouvelle organisation et valorisation des données au sein du réseau de placettes permanentes de l'Association Futaie Irrégulière (AFI), 2012. Mémoire de fin d'études, AgroParisTech.
- Louis-Michel NAGELEISEN, Dominique PIOUS, François-Xavier SAINTONGE et Philippe RIOU-NIVERT : *La santé des forêts : Maladies, insectes, accidents climatiques...Diagnostic et Prévention*. 2010.
- Alexandra NIEDZWIEDZ et Max BRUCIAMACCHIE : Eclairage sur les sources d'informations en matière de prix des bois. *Revue Forestière Française*, LXVIII:345–355, 2016.
- Christian PIEDALLU, Vincent PEREZ, Jean-Claude GÉGOUT, François LEBOURGEOIS et Romain BERTRAND : Impact potentiel du changement climatique sur la distribution de l'Épicéa, du Sapin, du Hêtre et du Chêne sessile en France. *Revue Forestière Française*, LXI(6), 2009.
- Sébastien POSTIC et Clément MÉTIVIER : Les comptes mondiaux du carbone en 2019, 2019. Disponible en ligne sur i4ce.org.
- Nicolas RASSE : Le traitement irrégulier des résineux appliqué aux peuplements de Douglas ou de pins purs et mélangés en Bourgogne. Bilan de la convention 2010-2012. Rapport technique, Centre Régional de la Propriété Forestière de Bourgogne, Conseil régional de Bourgogne et Conseil général de Côte d'Or, 2012.
- Magali ROSSI, J. ANDRÉ et Daniel VALLAURI : Le carbone forestier en mouvements. Eléments de réflexion pour une politique maximisant les atouts du bois. Lyon, 2015. Rapport REFORA.
- A. ROUX, J.-F. DHÔTE, D. ACHAT, C. BASTICK, A. COLIN, A. BAILLY, J.-C. BASTIEN, A. BERTHELOT, N. BRÉDA, S. CAURLA, J.-M. CARNUS, B. GARDINER, H. JACTEL, J.-M. LEBAN, A. LOBIANCO, D. LOUSTAU, C. MEREDIEU, B. MARÇAIS, S. MARTEL, C. MOISY, L. PÂQUES, D. PICART-DESHORS, E. RIGOLOT, L. SAINT-ANDRÉ et B. SCHMITT : Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique ? Une étude des freins et leviers forestiers à l'horizon 2050. Rapport technique, INRA et IGN, 2017. Rapport d'étude pour le Ministère de l'agriculture et de l'alimentation.
- Steven W. RUNNING, Qiaozhen MU, Maosheng ZAO et Alvaro MORENO : User's Guide MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) product (NASA MODIS16A2/A3) NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm, 2017.
- Matthew B. RUSSELL, Shawn FRAVER, Tuomas AAKALA, Jeffrey H. GOVE et Mark J. Ducey CHRISTOPHER W. WOODALL, Anthony W. D'Amato : Quantifying carbon stores and decomposition in dead wood : a review. *Forest Ecology and Management*, (350):107–128, 2015.
- S.C. THOMAS et A.R. MARTIN : Wood carbon content database, 2012. Dryad Repository : <http://dx.doi.org/10.5061/dryad.69sg2>.

Patrick VALLET : *Impact de différentes stratégies sylvicoles sur la fonction «puits de carbone» des peuplements forestiers. Modélisation et simulation à l'échelle de la parcelle.* Thèse de doctorat, ENGREF (AgroParisTech), 2005. pastel-00001635.

Fabian WAGNER et Kim PINGOUD : Methane emissions from landfills and carbon dynamics of harvested wood products : the first-order decay revisited. 2006.

K. WEGGLER, M. DOBBERTIN, E. JÜNGLING, E. KAUFMANN et E. THÜRIG : Dead wood volume to dead wood carbon : the issue of conversion actors. *European Journal of Forest Research*, (131):1423–1438, 2012.

Liste des contacts

Eric BOITTIN
Expert forestier
Mobile : 06 71 05 56 44
Mail : eric.boittin@expert-foret.com

Bruno BORDE
Ingénieur forestier
Délégation de Saône et Loire
7 A rue du Roy Gontran
71100 Châlon-sur-Saône
Tel : 03 85 97 12 92
Mobile : 06 12 01 45 00
Mail : bruno.borde@cnpf.fr

Max BRUCIAMACCHIE
Professeur d'aménagement forestier
AgroParisTech - ENGREF
Département SESG
14, rue Girardet
F54042 Nancy Cedex
Tel : 00 33 (0)3 83 39 68 51
Fax : (33) (0) 3 83 37 06 45
Mail : max.bruciamacchie@agroparistech.fr

Nicolas DEBAIVE
Chargé de projets «forêts»
Réserves Naturelles de France
La Bourdonnerie
2 allée Pierre Lacroute
CS 67524 – 21075 Dijon cedex
Tel : 03 80 48 94 75
Fax : 03 80 48 91 01
Mail : nicolas.debaive-rnf@espaces-naturels.fr

Olivier GLEIZES
Ingénieur forestier
Développement & Innovation
CRPF Occitanie
378 rue de la Galéra
34090 Montpellier
Tel : 04 67 41 68 17
Mail : olivier.gleizes@cnpf.fr

Yoan PAILLET
Ingénieur de recherche
IRSTEA Nogent-sur-Vernisson
Tel : 04 76 76 28 78
Mail : yoan.paillet@irstea.fr

Julien TOMASINI
Expert forestier - Président de l'Association Futaie Irrégulière
24 quai Vauban
25000 Besançon
Mobile : 06 08 67 78 74
Mail : jtomasini@reseau-afi.fr

Daniel VALLAURI
WWF
6 rue des Fabres
F-13001 Marseille - France
Tel : +33 (0)4 96 11 69 45
Mail : dvallauri@wwf.fr

Patrick VALLET
IRSTEA Nogent-sur-Vernisson
Tel : 04 76 76 28 78
Mail : patrick.vallet@irstea.fr

Liste des Annexes

A	Infradensités recommandées pour les principales essences forestières françaises	85
B	Estimation de la biomasse racinaire par des équations allométriques	87
C	Taux de carbone des essences forestières	88
D	Protocole de relevé du bois mort de l'AFI	90
E	Protocole de détermination du stade de décomposition du bois mort de l'United States Department of Agriculture Forest Service	93
F	Résultats sur le stock de carbone des dispositifs du réseau AFI	95
G	Table de production de l'itinéraire de référence	100
H	Table de production de l'itinéraire en gestion irrégulière du dispositif 16	102
I	Rappel des formules pour le calcul des réductions d'émissions anticipées	103
J	Estimation des volumes de coupes des deux scénarios et de leur répartition dans les différents usages	105
K	Analyse exploratoire des cas n°2, n°3 et n°4	106

Annexe A

Infradensités recommandées pour les principales essences forestières françaises

Les données sont issues directement des méthodes forestières du label Bas-Carbone.

Essence	Infradensité (tMS/m ³)
Alisier torminal	0,62
Arbousier	0,64
Aulne vert	0,42
Grands aulnes	0,42
Bouleaux	0,52
Cèdre de l'Atlas	0,36
Charme	0,61
Charme-houblon	0,66
Châtaignier	0,47
Chêne chevelu	0,67
Chêne-liège	0,70
Chêne pédonculé	0,54
Chêne pubescent	0,65
Chêne rouge d'Amérique	0,56
Chêne rouvre (sessile)	0,58
Chêne tauzin	0,64
Chêne vert	0,73
Chênes indifférenciés	0,56
Cornouiller mâle	0,74
Cyprès	0,40
Cytise aubour	0,60
Douglas	0,43
Epicéa commun	0,37
Epicéa de Sitka	0,36
Grands érables	0,51
Petits érables	0,56
Eucalyptus	0,56
Genévrier thurifère	0,48
Hêtre	0,55
Frênes	0,56
Fruitiers	0,58
If	0,58
Mélèze d'Europe	0,48
Mélèze du Japon	0,42
Merisier	0,50
Micocoulier	0,55
Mûrier	0,53
Noisetier	0,52
Noyer	0,52
Olivier	0,75
Ormes	0,52
Peupliers cultivés	0,35
Peupliers non cultivés	0,37

Pin d'Alep	0,45
Pin cembro	0,39
Pin à crochets	0,44
Pin laricio	0,46
Pin maritime	0,46
Pin mugho	0,44
Pin noir d'Autriche	0,46
Pin pignon	0,48
Pin sylvestre	0,44
Pin Weymouth	0,34
Platanes	0,50
Robinier faux acacia	0,58
Sapin méditerranéen	0,37
Sapin de Nordmann	0,37
Sapin pectiné	0,38
Sapin de Vancouver	0,36
Saules	0,37
Tamaris	0,53
Tilleuls	0,43
Tremble	0,38
Conifères (moyenne)	0,42
Feuillus (moyenne)	0,57
Infradensité moyenne	0,54

Annexe B

Estimation de la biomasse racinaire par des équations allométriques

Le tableau des équations de Cairns *et al.* (1997) est tiré directement des méthodes forestières du label Bas-Carbone.

Conditions et variables indépendantes	Équation	Taille d'échantillon n	R ²
Toutes les forêts, B _R = f(B _A)	$B_R = \exp(-1,085 + 0,9256 \times \ln(B_A))$	151	0,83
Toutes les forêts, B _R = f(B _A , Âge)	$B_R = \exp(-1,3267 + 0,8877 \times \ln(B_A) + 0,1045 \times \ln(\hat{A}ge))$	109	0,84
Forêts tropicales, B _R = f(B _A)	$B_R = \exp(-1,0587 + 0,8836 \times \ln(B_A))$	151	0,84
Forêts tempérées, B _R = f(B _A)	$B_R = \exp(-1,0587 + 0,8836 \times \ln(B_A) + 0,2840)$	151	0,84
Forêts boréales, B _R = f(B _A)	$B_R = \exp(-1,0587 + 0,8836 \times \ln(B_A) + 0,1874)$	151	0,84

FIGURE B.1 – Equations allométriques par essence pour calculer la biomasse racinaire

Essence	bo	b1	b2	Equation	unité y	unité x	Source	Max Diamètre	Sol	Observations
Epicéa C	-1,7	2,36		$\log y = bo + b1 \log x$	kg	cm	Drexhage and Gruber, 1999		25 podsol - cambisol	
Epicéa C	-4,985	3,033		$\ln y = bo + b1 \ln x$	kg	cm	Finer, 1989		tourbe	
Epicéa C	4,53	10,576		$\ln y = bo + b1 x$	g	mm	Petersson & Stahl 2006		38 minéral	
Epicéa C	4,588	10,44		$\ln y = bo + b1 x$	g	mm	Petersson & Stahl 2006		38 minéral	
Epicéa S		0,39	1,37	$b1*x^b2$	kg	cm	Black et al, 2004		minéral	
Pin S		0,013	2,74	$b1*x^b2$	kg	cm	Laiho and Finer, 1996		24 gleysol	avec la souche
Pin S	-4,57	2,793		$\ln y = bo + b1 \ln x$	kg	cm	Finer, 1989		tourbe	
Pin S	3,39	11,068		$\ln y = bo + b1 x$	g	mm	Petersson & Stahl 2006		40 minéral	
Pin S	3,443	11,065		$\ln y = bo + b1 x$	g	mm	Petersson & Stahl 2007		40 minéral	
Bouleau	-5,381	3,086		$\ln y = bo + b1 \ln x$	kg	cm	Finer, 1989		minéral	
Hêtre	-2	2,7		$\log y = bo + b1 \log x$	kg	cm	Pellinen, 1986		47 Rendzina	avec la souche
Hêtre	-1,66	2,54		$\log y = bo + b1 \log x$	kg	cm	Le Goff and Ottorini, 2001		20 Gleyic Luvisol	avec la souche
Chêne S	-1,56	2,44		$\log y = bo + b1 \log x$	kg	cm	Drexhage, 1999		17 Gleyic Podsol	avec la souche
Chêne V	-1,05	2,19		$\log y = bo + b1 \log x$	kg	cm	Canadell and Roda, 1991		23 Xerosol	avec la souche
Douglas	-2	2,63		$\log y = bo + b1 \log x$	kg	cm	Kuiper and Coutts, 1992		27 Podsol - cambisol	
Douglas	-1,55	2,33		$\log y = bo + b1 \log x$	kg	cm	Thies and Cunningham, 1996		53 Cambisol	avec la souche
Peuplier	0,1083	1,6506		$y = bo x^b1$	kg	cm	Fortier, 2015		38	

La variable y correspond à la biomasse racinaire, x au diamètre donc le maximum de l'étude est indiqué dans la colonne «Max Diamètre». Les colonnes «bo», «b1» et «b2» donnent les valeurs des coefficients utilisés dans l'équation allométrique (colonne «Equation»).

Annexe C

Taux de carbone des essences forestières

FIGURE C.1 – Taux de carbone contenu dans le bois (Données issues de Thomas et Martin (2012)).

Essence	Taux de carbone (%)
Bouleau	49,70
Châtaignier	47,10
Cèdre	50,30
Hêtre	47,33
Epicéa C	50,40
Epicéa S	49,95
Pin N	46,50
Pin M	53,32
Pin S	48,90
Merisier	48,60
Douglas	50,50
Chêne S	45,75
Chêne T	45,68
Chêne P	47,20
Chêne R	49,63
Saule	49,05
Orme	46,32
Mélèze	52,10
Robinier	49,20
Sorbier	49,70
Sapin P	51,10
Erable P	46,80
Frêne	48,00
Pin W	49,74
Peuplier	47,10

Tilleul	51,70
Tsuga	50,60
Pin C	50,32
Aulne	47,70
Feillus	48,80
Résineux	50,80

Annexe D

Protocole de relevé du bois mort de l'AFI

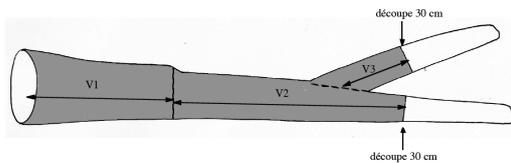
Suivi écologique

Mesure du bois mort

Bois mort au sol

Le bois mort au sol sera échantillonné et cubé en s'inspirant des normes NFB 50-002 et 53-020.

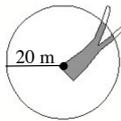
Il nécessitera la mise en oeuvre de deux méthodes différentes : échantillonnage à surface fixe pour les grosses dimensions, échantillonnage linéaire pour les petites dimensions. La découpe 30 cm va permettre la séparation entre ces deux méthodes. Cette découpe est commune à toutes les essences.



o Cubage du bois mort au sol de grosse dimension :

- Seuil : Diam > 30 cm
- Echantillonnage : placette circulaire de 20 m de rayon.

Attention : lorsque la pièce de bois est située en limite, seule la partie à l'intérieur de la placette est mesurée.



Le volume recherché est un volume géométrique arbre découpe 30 cm (partie grisée du schéma ci-dessus). La pièce de bois devra être découpée en billon à chaque forte décroissance de la tige, ou bien en cas de fourche. Un billon peut aussi correspondre à des stades de décomposition très différents : cas d'un billon de classe de décomposition 3 ou 4, à proximité d'un billon de classe 1 (cf. classe de décomposition ci-après). Il n'est pas nécessaire de faire cette distinction sur des billons de faible volume. Il est en général inutile de dépasser 3 à 4 billons.

Variables mesurées : les mesures sont faites par billon.

- Essence
- Longueur (m)
- Diamètres (cm) : si le billon est inférieur à 5 m, il suffit de mesurer le diamètre médian et la longueur. Sinon utiliser la formule des trois niveaux avec prise de 3 diamètres : 1 à chaque extrémité et diamètre médian (Diam1 : gros bout, Diam 2 : petit bout ou découpe 30 cm).
- Contact : pourcentage de longueur en contact avec le sol.
- Stade de décomposition : cf. clé ci-après.

- Chablis : précision sur l'origine de la pièce de bois. Elle est issue d'un chablis uniquement si elle est rattachée à la souche. La notion de chablis ne concerne que les arbres qui étaient vivants au moment de leur chute.

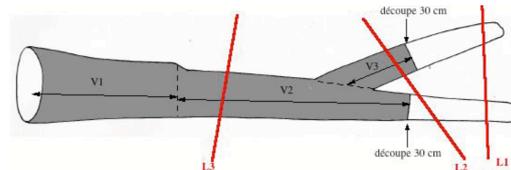
Optionnel : plutôt que de gérer la variable sous forme de oui-non, il est possible d'indiquer l'orientation générale du chablis. Cette orientation sera commune à l'ensemble des billons d'un même arbre.

o Cubage du bois mort au sol de petite dimension :

- Seuil : 5 cm < Diam < 30 cm
- Echantillonnage : **linéaire**.

Il sera constitué de 3 transects linéaires de 20 m de longueur, disposés en étoile (même azimut que les 3 sous-placettes de régénération), soit une distance totale échantillonnée de 60 m par placette. Cette méthode fournit directement un volume géométrique à partir d'un diamètre, sans avoir besoin de mesurer la longueur de la pièce de bois.

Tous les diamètres interceptés et compris dans le seuil de diamètre seront échantillonnés.



Exemple :

Pour le transect L1, deux mesures de diamètre.

Pour le transect L2, une seule mesure de diamètre.

Pour le transect L3, pas de mesure de diamètre.

Variables mesurées :

- Transect : 6 numéros de transects possibles, correspondant à des portions de 10 m : 1-1, 1-2, 2-1, 2-2, 3-1 et 3-2

Exemple : si la pièce de bois appartient aux 10 premiers mètres du premier transect, noter 1-1, si la pièce de bois appartient aux 10 derniers mètres du troisième transect, noter 3-2).

- Essence si possible. En cas de stade de décomposition trop avancé, préciser « Indéterminé » ou « Feuillu », « Résineux ».

- Diamètre (cm) : diamètre de la pièce de bois au niveau de l'intersection (ne pas mesurer la longueur interceptée).

NB : en cas de stade de décomposition avancé, la prise du diamètre peut être rendue

difficile ou faussée. Prendre un diamètre correspondant à une logique de volume d'encombrement.

- Angle : par rapport à l'horizontale (en grade, par classe de 10).
- Stade de décomposition : cf. clé ci-après.
- Contact : avec le sol, sous forme d'une variable binaire Oui/Non.
- Chablis : indiquer si pièce de bois est d'origine chablis ou non.

NB : pour l'échantillonnage linéaire, le stade de décomposition ainsi que le fait qu'il y ait contact ou non avec le sol sont appréciés à l'endroit de la prise de diamètre.

Bois mort sur pied

Les bois morts sur pied correspondent aussi bien aux arbres qui viennent de dépérir qu'aux chandelles et souches (> 40 cm). Ils seront inventoriés en utilisant deux cercles concentriques de 10 et 20 m de rayon.

- o **Cubage du bois mort sur pied de grosse dimension :**
 - Seuil : Diam > 30 cm
 - Echantillonnage : placette circulaire de **20 m** de rayon.
- o **Cubage du bois mort sur pied de petite dimension :**
 - Seuil : $7,5 < \text{Diam} < 30$ cm
 - Echantillonnage : placette circulaire de **10 m** de rayon.

Variables mesurées : les mêmes informations seront prélevées, que ce soit pour les petites ou grosses dimensions :

- Essence
- Position : Azimut - Distance
- Type : A (arbre), C (Chandelle), S (souche)
- Diamètre : à 1,30 m pour les types A ou C, médian autrement.
- Hauteur (m)
- Stade de décomposition : cf. clé ci-après.
- Code écologique : cf. codification ci-après.

Les bois morts sur pied soulèvent un problème de cubage. La variable « type de bois mort » notée sur le terrain permet de distinguer trois façons de cuber.

- Type A : il correspond aux bois morts qui peuvent être cubés en utilisant le même tarif de cubage que pour les arbres vivants. C'est le cas des arbres qui viennent de dépérir, ou bien des arbres qui ont perdu une partie de leurs rameaux fins, mais pas de parties importantes de leur squelette.
- Type C : il comprend les chandelles de hauteur supérieure à 1,30 m, ainsi que les arbres ayant perdu une partie importante de leur squelette. Ces objets seront cubés en appliquant au diamètre à 1,30 m une décroissance métrique par défaut de 1cm/m et en estimant sur le terrain une hauteur. Le

choix de la décroissance métrique pourra être adaptée localement.

- Type S : il comprend les chandelles de hauteur inférieure à 1,30 m, ainsi que les souches non déracinées. Ces dernières ne seront prises en compte qu'en cas de volume significatif (ce peut être le cas des souches en montagne avec des hauteurs importantes du côté aval lorsque la pente est forte). Ne seront comptabilisées que les souches dont la hauteur moyenne (entre l'amont et l'aval) est supérieure à 40 cm. Ce type de bois mort sur pied sera cubé à partir d'un diamètre médian et d'une hauteur (formule du cylindre).

Stade de décomposition du bois mort

Quel que soit le type de bois mort inventorié (sur pied, au sol, de petite ou de grosse dimension), un stade de décomposition lui sera attribué.

Il sera défini à partir d'une clé de détermination à deux entrées : niveau de présence de l'écorce et d'altération du bois.

- **Ecorce**
 1. Présente sur tout le billon
 2. Présente sur plus de 50% de la surface
 3. Présente sur moins de 50% de la surface
 4. Absente du billon
- **Pourriture du bois**
 1. Dur ou non altéré
 2. Pourriture <1/4 du diamètre
 3. Pourriture comprise entre 1/4 et 1/2 du diamètre
 4. Pourriture comprise entre 1/2 et 3/4 du diamètre
 5. Pourriture supérieure à 3/4.

Par combinaison, 20 stades de décomposition sont ainsi définissables. Certains sont beaucoup plus fréquents que d'autres.

Mesure des micro-habitats

Un certain nombre de critères écologiques précis sont relevés pour chaque individu précomptable.

Cela concerne tous les arbres sur pied inventoriés sur la placette AFI, aussi bien les arbres vivants que les individus morts ou dépérissants.

Les critères écologiques sont définis selon la codification ci-après (issus de l'étude réalisée en 2003 par le PNR des Vosges du Nord et Pro Silva France).

A chaque critère écologique correspond un code. Un individu peut présenter un ou plusieurs critères écologiques. Il n'est pas nécessaire d'être un spécialiste naturaliste, les critères étant concrets et faciles à relever (présence de branches mortes, cavités, fentes, lierre...).

NB : à chaque critère relevé sur le terrain est attribuée de manière automatique une note allant de 0 à 4, en fonction de l'importance du critère, ce qui permet d'attribuer une note écologique à l'individu en question. L'analyse est possible par essence, classes de diamètre, qualité...

Annexe E

Protocole de détermination du stade de décomposition du bois mort de l'United States Department of Agriculture Forest Service

Les tableaux suivants donnent la clé de détermination pour le stade de décomposition d'une pièce de bois mort au sol ou sur pied (Harmon *et al.*, 2011).

TABLE E.1 – Clé de détermination de la classe de décomposition pour une pièce de bois mort sur pied

Classe	Définition
1	Toutes les branches sont présentes; le haut de la couronne est encore présent; toute l'écorce reste; l'aubier est intact avec un minimum de décomposition; le duramen est sain et dur.
2	Peu de branches et aucune branche fine; le houppier peut être cassé; une quantité variable d'écorce reste; l'aubier s'effrite avec une pourriture avancée; le duramen est sain à la base mais commence à pourrir dans la partie externe du haut du tronc.
3	seulement des bouts de branches existent; la couronne est cassée; une quantité variable d'écorce reste; l'aubier s'effrite; le duramen est dans un stade de décomposition avancée dans la partie haute du tronc et à la base.
4	Peu ou pas de bouts de branches; la couronne est cassée; une quantité variable d'écorce reste; l'aubier s'effrite; le duramen a une pourriture avancée à la base du tronc et s'effrite dans la partie haute.
5	Aucune trace de branches; la couronne est cassée; moins de 20 % d'écorce; l'aubier est parti; le duramen s'effrite partout.

TABLE E.2 – Clé de détermination de la classe de décomposition pour une pièce de bois mort sur sol

Classe	Définition
1	Sain, fraîchement tombé, billon intact sans racines, couleur originelle du bois, pas de filaments invasifs, brindilles fines accrochées avec de l'écorce bien tenue.
2	Aubier sain en partie mou mais ne peut pas être enlevé à la main ; couleur du bois originelle, pas de filaments envahissants, des brindilles fines peuvent manquer et les restantes ont l'écorce qui s'écaille.
3	Le duramen est toujours sain et le billon peut encore supporter son propre poids ; l'aubier peut être retiré à la main ou est manquant ; la couleur du bois est marron-rougeâtre ou originelle ; des filaments peuvent envahir l'aubier ; seulement des bouts de branches restent mais qui ne peuvent pas être enlevées du billon.
4	Le duramen est pourri et le billon ne peut plus supporter son propre poids ; des portions du billon pourries sont douces mais se tiennent en apparence, une épingle peut être insérée dans le duramen ; la couleur du bois est rouge ou brune ; des filaments invasifs peuvent être trouvés à travers le billon ; les bouts de branches peuvent être retirés.
5	Plus d'unité dans la structure du billon, sans forme circulaire avec la pourriture s'étendant sur le sol, la texture pourrie est douce et peut devenir de la poudre sèche ; la couleur du bois est de rouge-marron à marron foncé ; des filaments invasifs sont présents, les bouts de branches and les poches de résine sont généralement pourries.

Annexe F

Résultats sur le stock de carbone des dispositifs du réseau AFI

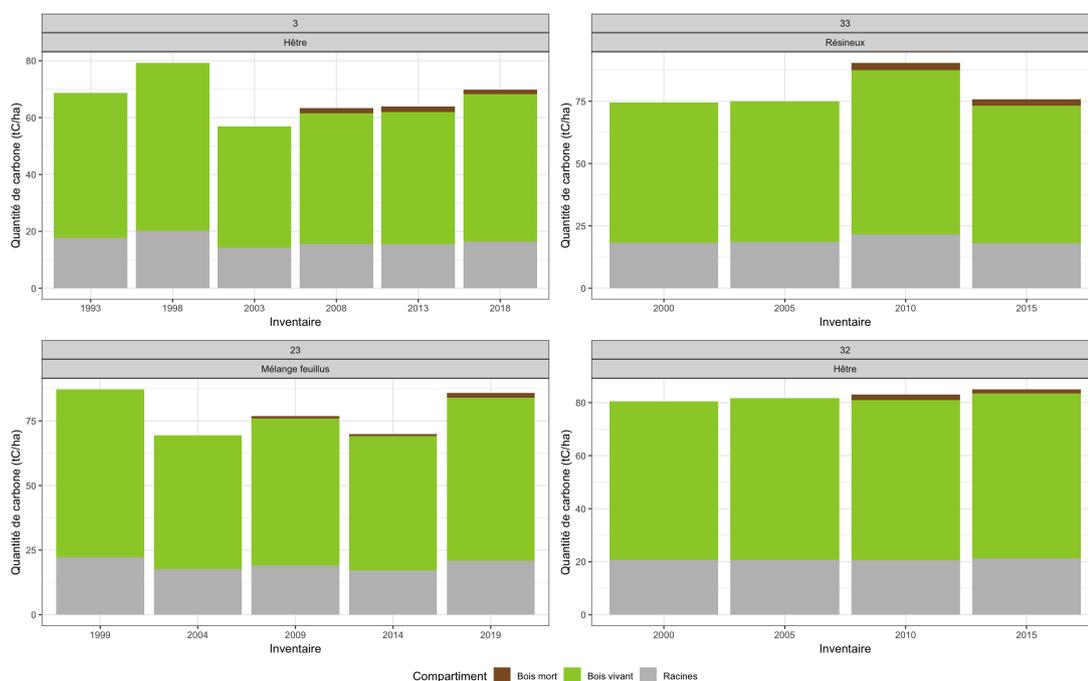


FIGURE F.1 – Stocks de carbone de quelques dispositifs sur calcisols

Sur sols sableux, le stock de carbone total varie entre 60 tC/ha et 80 tC/ha. Les évolutions du stock de carbone sont fortement liées au volume mais aussi à l'infradensité des essences. En effet, le dispositif 33 qui est un peuplement de pin noir a des quantités de carbone à l'hectare semblables à celles du dispositif 32, peuplement de hêtre. Pourtant, les volumes à l'hectare du dispositif 33 sont de plus de 200 m³/ha et d'environ 150 m³/ha pour le dispositif 32. Entre le hêtre et le pin noir, les taux de carbone sont assez similaires, respectivement de 47,33 % et 46,50 % mais l'infradensité du pin noir est de 0,46 tMS/m³ et celle du hêtre de 0,55 tMS/m³.

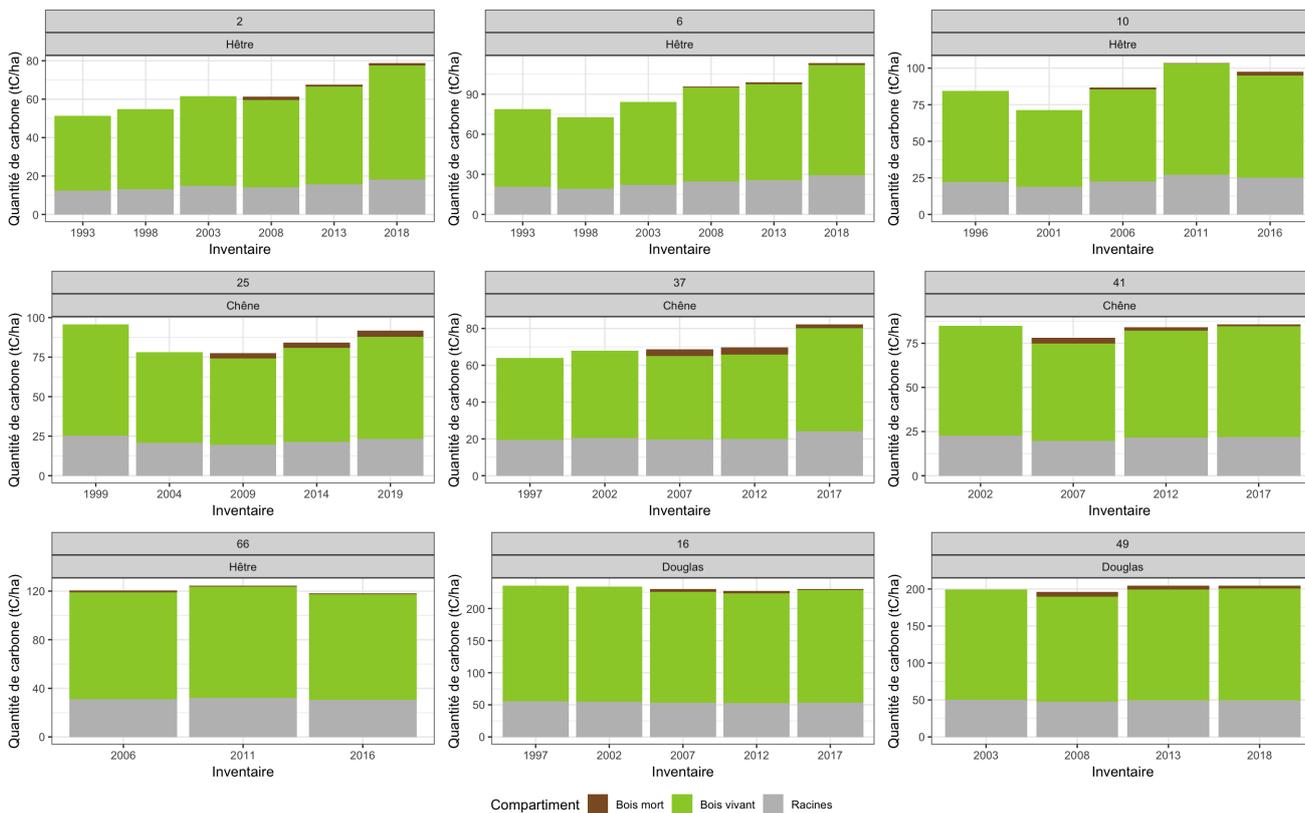


FIGURE F.2 – Stocks de carbone de quelques dispositifs sur sols sableux

Sur sols sableux, le stock total de carbone varie de 50 tC/ha à 230 tC/ha. Les peuplements de douglas sont ceux qui stockent le plus de carbone (dispositifs 16 et 49) en lien avec des volumes à l'hectare très élevés (plus de 500 m³/ha).

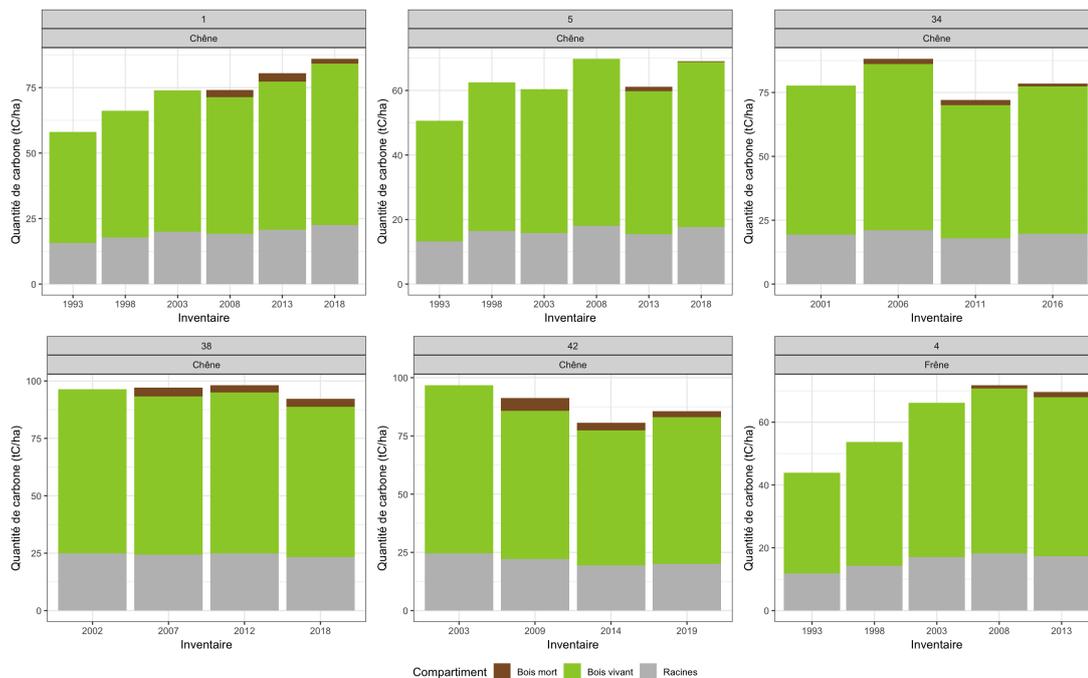


FIGURE F.3 – Stocks de carbone de quelques dispositifs sur sols hydromorphes

Pour les sols hydromorphes, le stock total de carbone varie entre 45 tC/ha à quasiment 100 tC/ha. Les stocks de carbone au sein du bois mort des dispositifs 38 et 42 sont assez élevés comparés aux autres dispositifs. Cela est lié d'une part à des volumes de bois mort un peu plus élevés que ceux des autres dispositifs mais aussi à la décomposition peu avancée du bois mort.

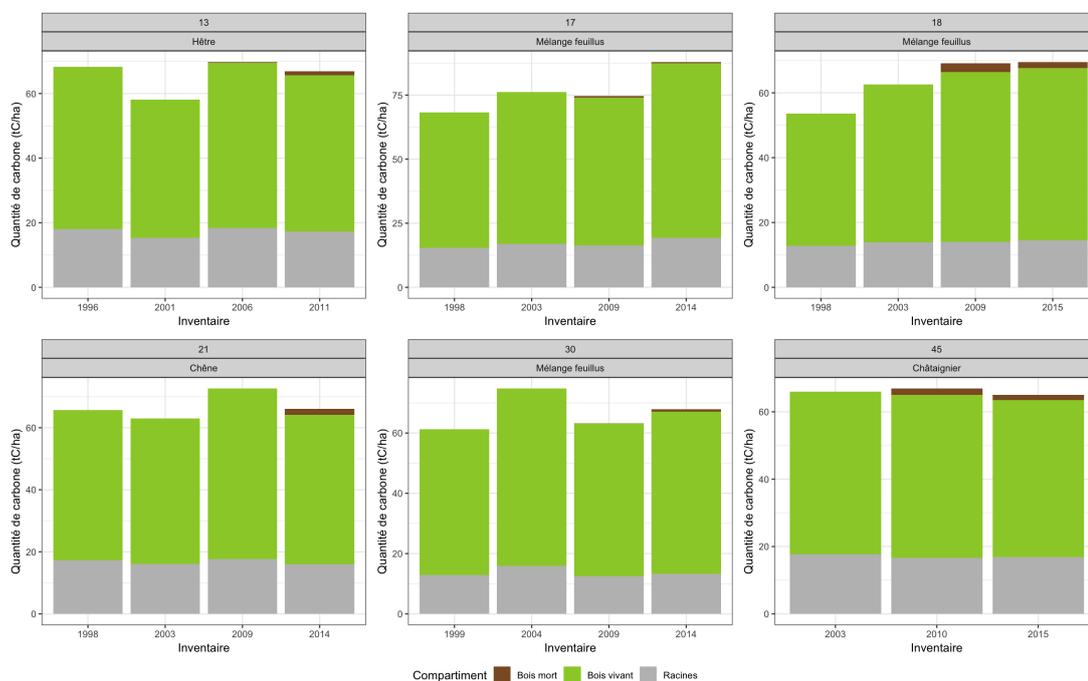


FIGURE F.4 – Stocks de carbone de quelques dispositifs sur sols limono-argileux

Sur des sols limono-argileux, le stock de carbone total évolue entre 50 tC/ha et 80 tC/ha. Il n'y a pas de tendance observée par type de milieu.

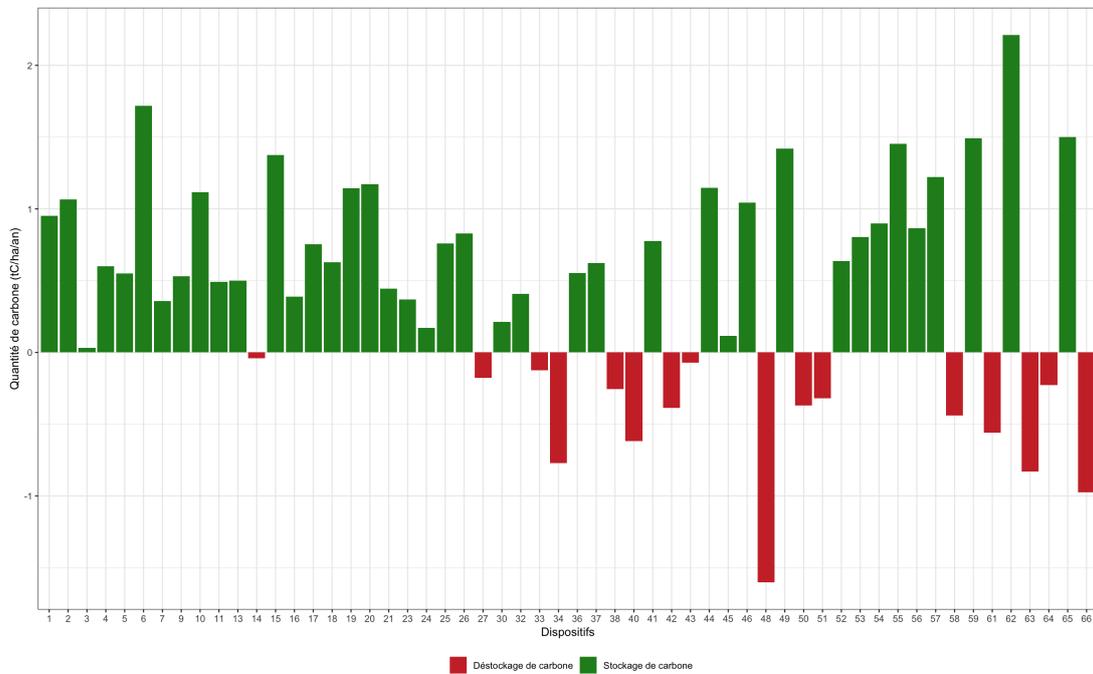


FIGURE F.5 – Flux du stock de carbone dans le bois vivant au sein des dispositifs du réseau AFI

Les flux de carbone ont été calculés sur l'ensemble de la période de suivi des dispositifs ayant au moins trois inventaires. Les flux de carbone oscillent entre -1,5 tC/ha/an et un peu plus de 2 tC/ha/an. La majorité des dispositifs stockent du carbone. Ceux qui déstockent du carbone ont subi soit des interventions sylvicoles soit des tempêtes entraînant des chablis.

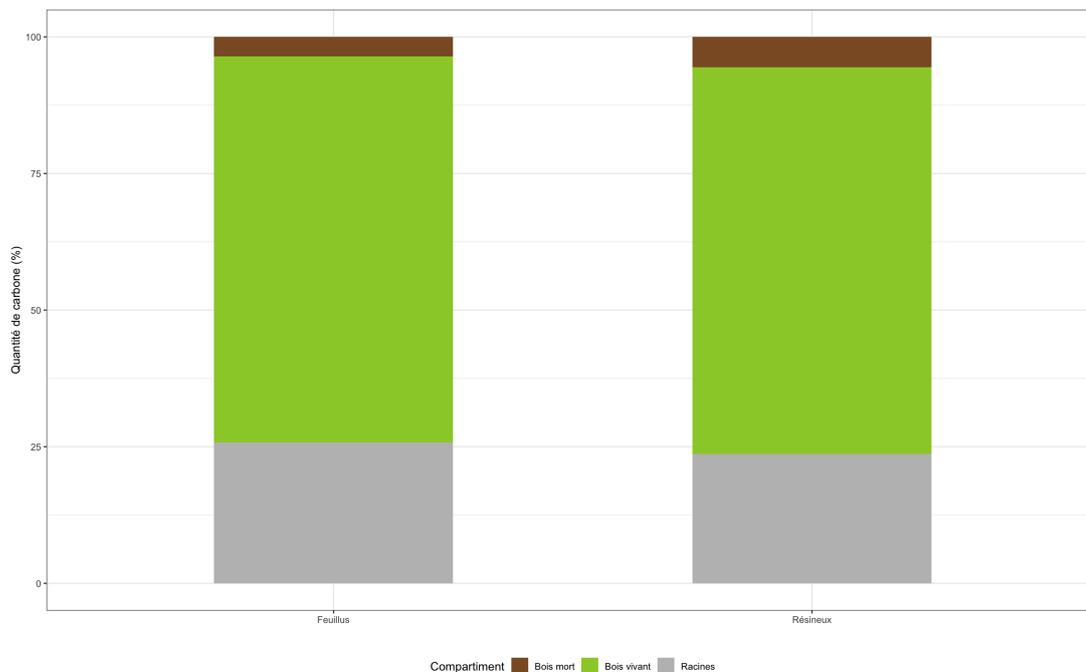


FIGURE F.6 – Quantité de carbone moyenne des peuplements feuillus et résineux du réseau AFI

La figure F.6 donne la quantité de carbone moyenne des peuplements feuillus et résineux du réseau AFI. Pour les peuplements feuillus, le bois mort stocke en moyenne 3,5 % du carbone total, les racines 25,8 % et le bois vivant, 70,7 %. Pour les peuplements résineux, le bois mort stocke en moyenne 5,5 % du carbone total, les racines 23,7 % et le bois vivant, 70,8 %. Avec la moitié du stock de carbone contenu dans le sol, et non pris en compte dans les calculs, les résultats sont proches de ceux observés dans la littérature (voir tableau 2.1).

Annexe G

Table de production de l'itinéraire de référence

La table de production est issue d'une communication du CRPF. Le peuplement de départ est une plantation de densité initiale 1300 tiges/ha et l'âge d'exploitabilité est fixé à 70 ans.

FIGURE G.1 – Exemple d'itinéraire de sylviculture classique du Douglas avec un allongement de la production (tableau issu de Borde (2016)).

Age du peuplement (an)	Production total (m3/ha)	Volume avant éclaircie (m3/ha)	Vol. prélevé en éclaircie (m3/ha)	Volume après éclaircie (m3/ha)
25	335	295	40	255
30	475	375	60	315
35	613	443	70	373
40	741	501	80	421
45	855	535	80	455
50	944	544	80	464
55	1013	534	90	444
60	1080	511	90	421
65	1140	481	90	391
70	1200	451	Coupe rase	

Pour cet itinéraire, le volume des vingt-quatre premières années a été estimé à partir d'un polynôme d'ordre 5, ajusté avec le logiciel statistique R.

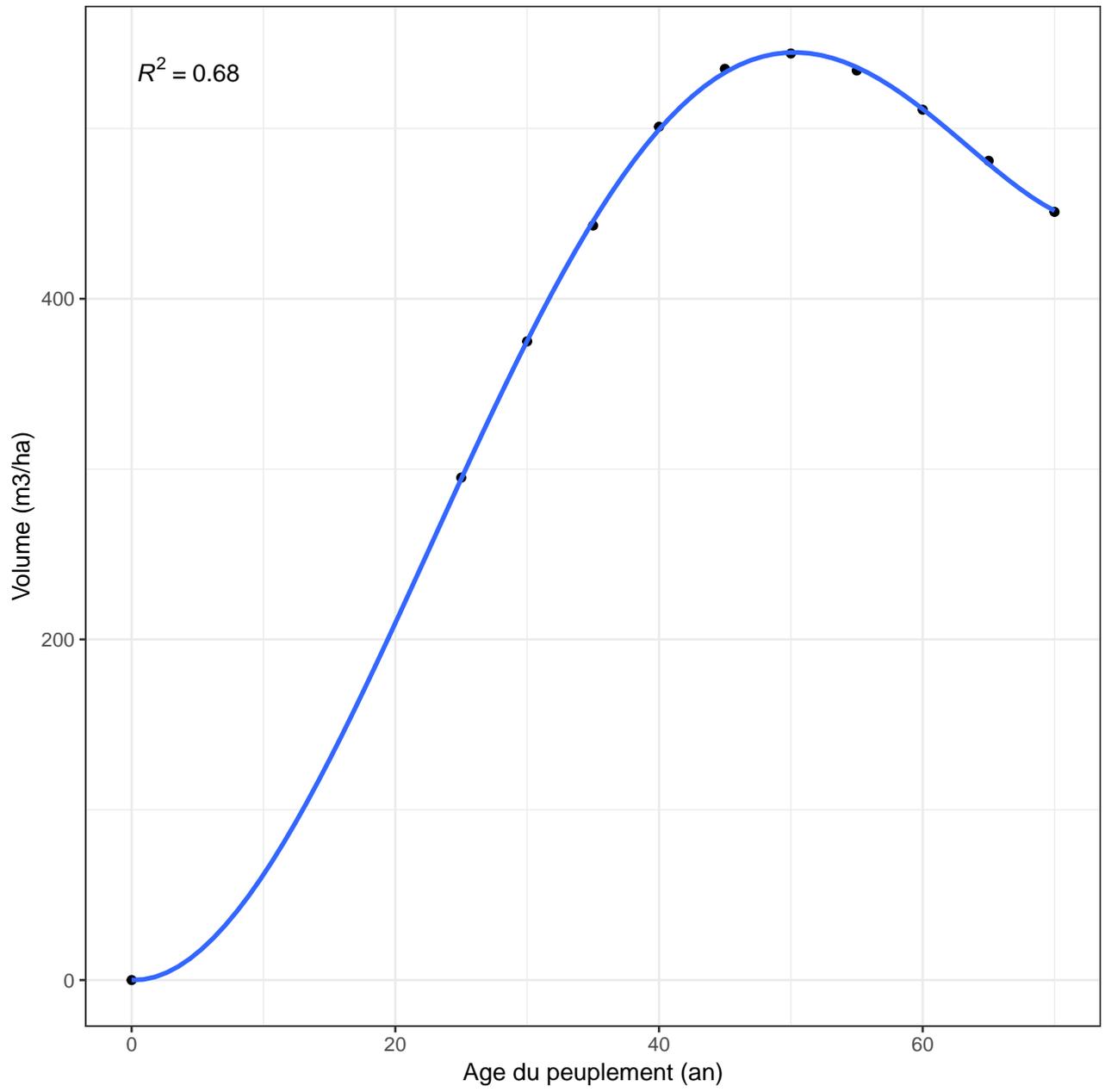


FIGURE G.2 – Volume du peuplement de référence

Annexe H

Table de production de l'itinéraire en gestion irrégulière du dispositif 16

FIGURE H.1 – Itinéraire irrégulier pour le peuplement de Folin à partir des données d'inventaire de l'AFI

Temps (années)	Volume (m3/ha)
1	685
6	679
11	673
16	667
20	662
26	591
32	534
38	501

Sur les vingt premières années, disposant des données d'accroissement et de prélèvement moyens, les volumes à l'hectare ont été calculés en ajoutant au volume de l'année précédente l'accroissement et en retirant le prélèvement. A partir de l'année 21, une coupe fictive avec un taux de prélèvement de 18 à 20 % tous les 6 ans a été simulé jusqu'à atteindre le volume à l'équilibre. A partir de l'année 38, le volume à l'équilibre atteint, uniquement l'accroissement biologique est prélevé.

Annexe I

Rappel des formules pour le calcul des réductions d'émissions anticipées

Les réductions d'émissions anticipées générables par le projet et pour lesquelles une certification peut être demandée se calculent comme suit :

$$REA = REA_{foret} + REA_{produits} \quad (I.1)$$

Les REA_{foret} portent sur les compartiments forestiers comprenant la litère (valeur par défaut de 10 tC/ha), le sol (valeur par défaut de 70 tC/ha), la biomasse racinaire et la biomasse aérienne. Les $REA_{produits}$ portent sur les produits bois issus des coupes des deux itinéraires comparés sur la durée du projet (communication personnelle de Olivier Gleizes).

La révolution du douglas est considérée de 70 ans dans le scénario de référence. Etant donné qu'il est difficile de définir une révolution dans un peuplement en gestion irrégulière, il a été également considéré une période de 70 ans, notamment pour pouvoir comparer les résultats.

$$REA_{foret} = \min(\Delta S(30), \frac{1}{70} \times \sum_{t=1}^{70} S_{projet}(t) - \frac{1}{70} \times \sum_{t=1}^{70} S_{reference}(t)) \quad (I.2)$$

avec :

- $\Delta S(30)$ la différence de stock de carbone entre les deux projets à l'année 30
- $S_{projet}(t)$ le stock de carbone (en tCO₂) total dans les compartiments forestiers à l'année t pour le scénario alternatif
- $S_{reference}(t)$ le stock de carbone (en tCO₂) total dans les compartiments forestiers à l'année t pour le scénario de référence

$$REA_{produits} = \frac{1}{30} \times \sum_{t=0}^{30} (C_{projet}(t) - C_{reference}(t)) \quad (I.3)$$

avec :

- $C(t)$ le stock de carbone dans les produits bois qui seraient récoltés dans le scénario de référence ou alternatif

Pour calculer le stock de carbone dans les produits bois, il faut également tenir compte de la dynamique de décomposition du bois et de la perte de carbone stocké qui en résulte. L'équation fournie par Wagner et Pingoud (2006) fait référence.

$$C(t + 1) = \sum_{i=0}^t F(i) \times \frac{\exp(k) - 1}{k} \times \exp(-k(t - i)) + C(0) \times \exp(-k(t + 1)) \quad (I.4)$$

avec :

- $k = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$ la constante de décomposition pour une décomposition de premier ordre (an^{-1})
- $t_{1/2}$ temps de demi-vie des produits bois en années. Il correspond au temps nécessaire pour perdre la moitié du stock carbone des produits bois
- $F(i)$ est le flux de carbone entrant au cours de l'année i , c'est-à-dire le carbone stocké dans les produits bois récoltés au cours de l'année i

Les temps de demi-vie sont ceux utilisés dans la méthode forestière «Reconstitution de forêts dégradées».

TABLE I.1 – Temps de demi-vie des produits bois selon leur utilisation

Bois de sciage	Panneaux de bois	Papier
35 ans	25 ans	2 ans

Sur le modèle des méthodes forestières, aucune REA_{produits} pour le bois énergie n'est délivrée.

Les produits bois récoltés dans le scénario alternatif peuvent également permettre de calculer des réductions d'émissions de l'empreinte car leur utilisation peut entraîner des effets de substitution «matériau» et «énergie» supplémentaires par rapport au scénario de référence.

$$REE_{\text{substitution}} = CS \times \sum_{i=1}^{30} (F_{\text{projet}}(i) - F_{\text{reference}}(i)) \quad (I.5)$$

Avec :

- CS , la moyenne de substitution générée par un mètre cube de bois rond en France (en tCO_2/m^3)
- $F(i)$ le flux entrant des produits bois récoltés au cours de l'année i (en m^3/ha)

Les valeurs de CS , proviennent de la littérature scientifique et sont celles tirées de la méthode forestière : 0 pour le papier, 0,43 pour les panneaux et 1,52 pour le sciage.

Annexe J

Estimation des volumes de coupes des deux scénarios et de leur répartition dans les différents usages

FIGURE J.1 – Répartition du volume des coupes en fonction de l'usage potentiel

Scenarii	Temps (années)	Volume de l'éclaircie (m3/ha)	Energie	Papier	Panneaux	Sciage
CNPF	0	685	4%	2%	70%	24%
CNPF	25	40	20%	80%	0%	0%
CNPF	30	60	20%	80%	0%	0%
CNPF	35	70	10%	85%	5%	0%
CNPF	40	80	10%	65%	25%	0%
CNPF	45	80	5%	45%	50%	0%
CNPF	50	80	10%	15%	50%	25%
CNPF	55	90	10%	15%	50%	25%
CNPF	60	90	5%	10%	10%	75%
CNPF	65	90	2%	3%	15%	80%
CNPF	70	451	2%	3%	5%	90%
Projet	1	90	4%	2%	70%	24%
Projet	8	61	3%	4%	65%	28%
Projet	14	81	3%	4%	65%	28%
Projet	20	38	5%	5%	80%	10%
Projet	26	148	5%	5%	70%	20%
Projet	32	134	3%	5%	52%	40%
Projet	38	110	3%	5%	32%	60%
Projet	44	77	3%	5%	22%	70%
Projet	50	77	3%	5%	22%	70%
Projet	56	77	2%	3%	15%	80%
Projet	62	77	2%	3%	15%	80%
Projet	68	77	3%	4%	8%	85%
Projet	74	77	3%	4%	8%	85%

La répartition du volume éclairci dans les différents usages potentiels permet de calculer les $REA_{produits}$ en appliquant les temps de demi-vie correspondants. Le bois-énergie, dont le carbone stocké est très vite relâché, ne rentre pas en compte dans le gain carbone. Cependant, l'estimation de la répartition du volume éclairci dans les différents usages en tient compte. La répartition du volume des premières coupes du scénario alternatif (jusqu'à 20 ans) s'appuie sur l'inventaire des arbres exploités du dispositif 16 issu des placettes permanentes.

Annexe K

Analyse exploratoire des cas n°2, n°3 et n°4

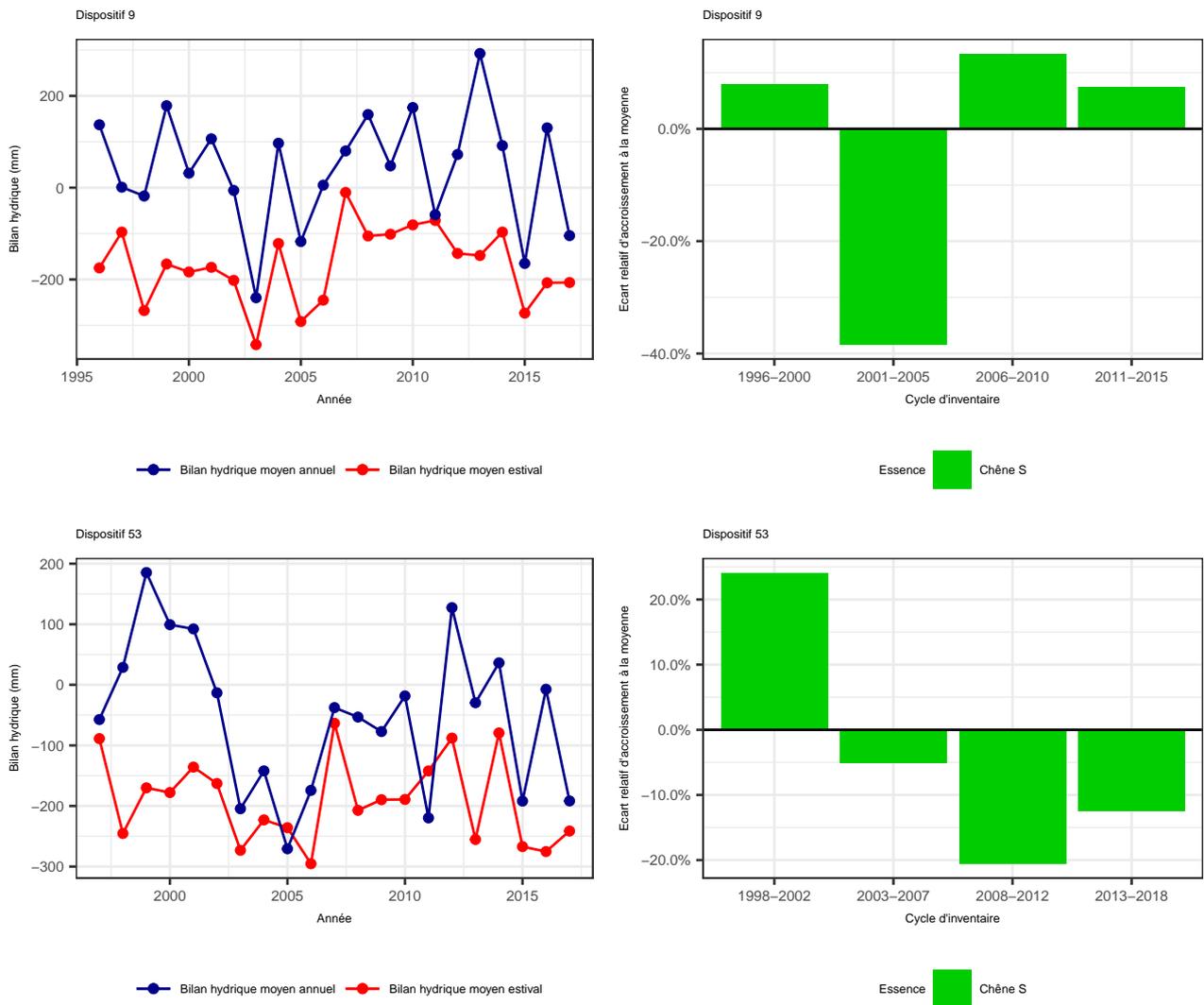


FIGURE K.1 – Evolutions climatique et de l'accroissement pour le cas n°2

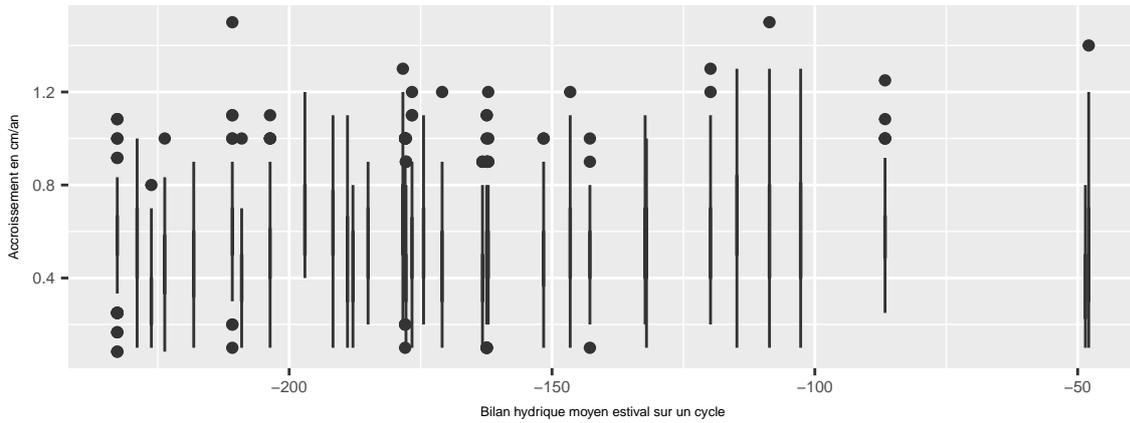
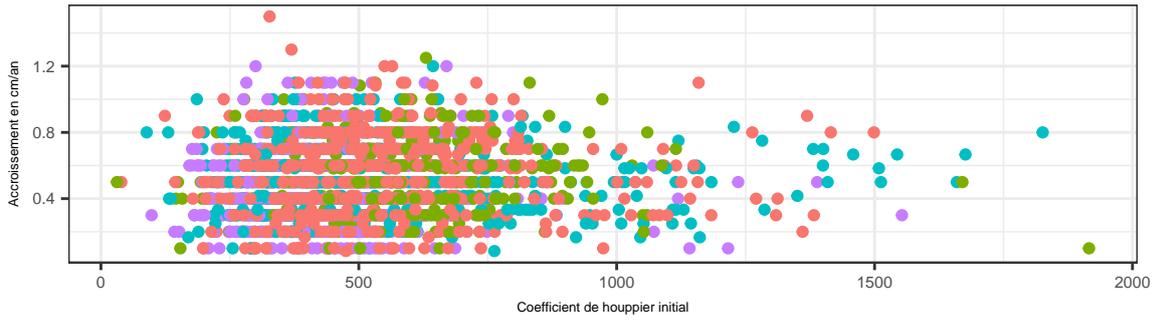
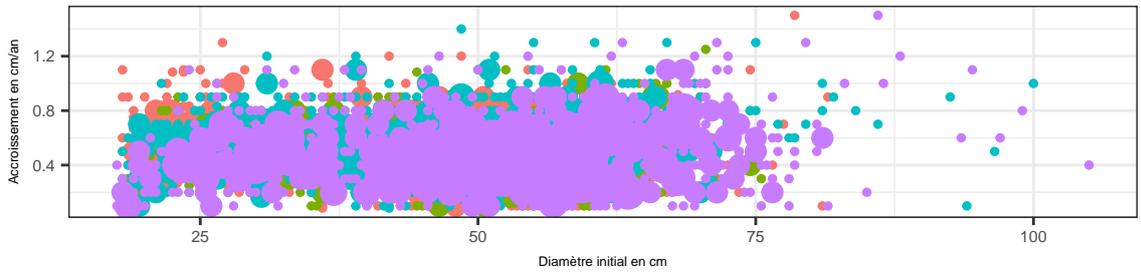


FIGURE K.2 – Analyse exploratoire pour le cas n°2

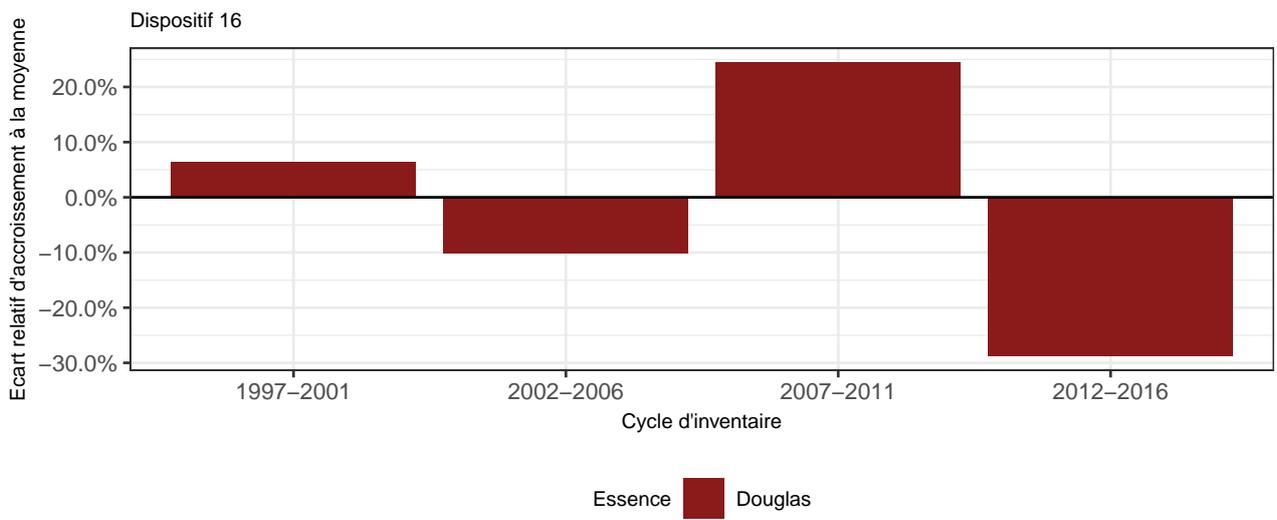
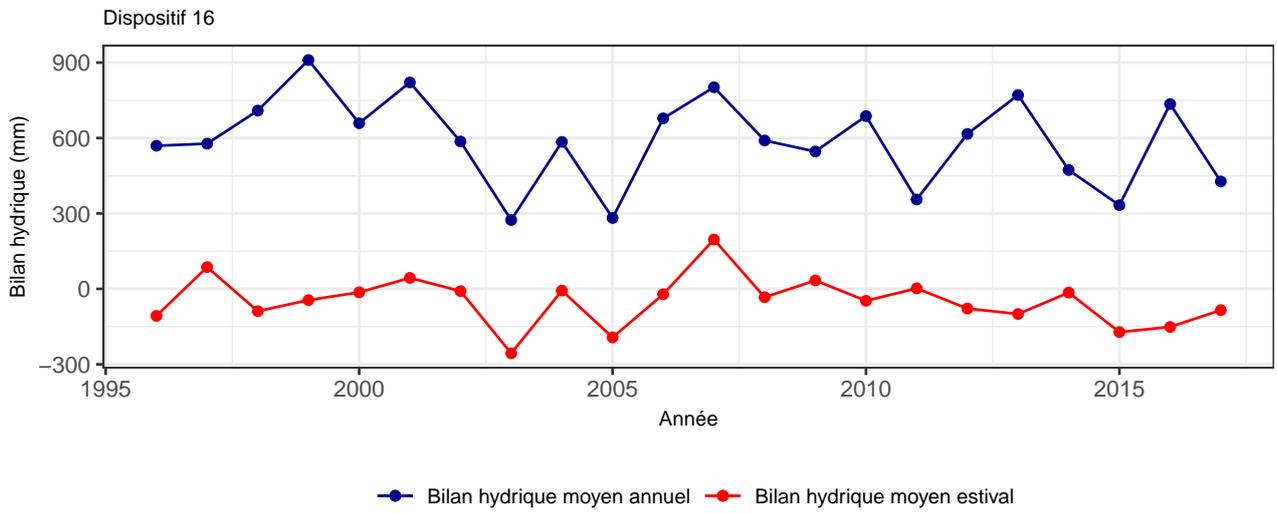


FIGURE K.3 – Evolutions climatique et de l'accroissement pour le dispositif 16 du cas n°3

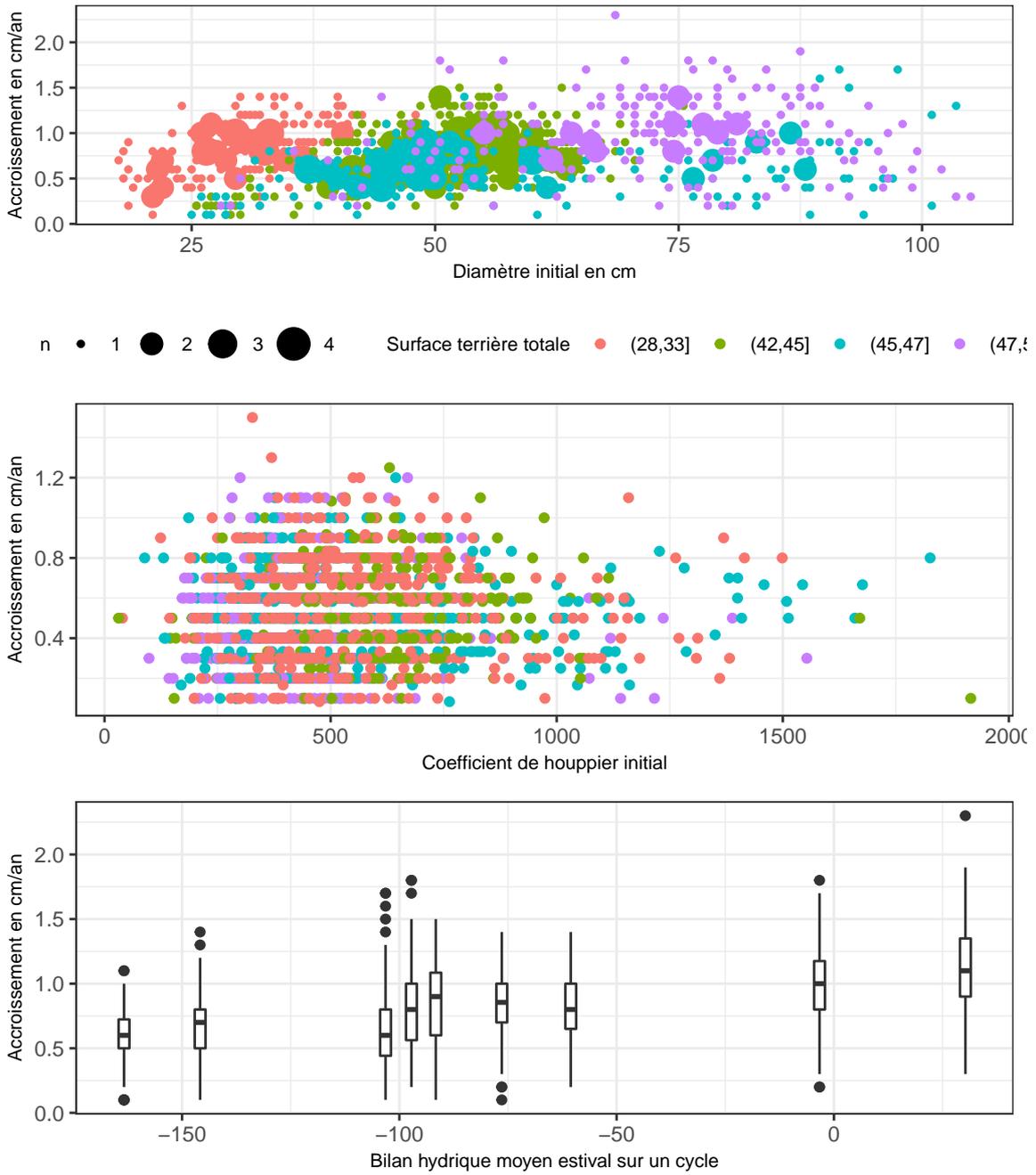


FIGURE K.4 – Analyse exploratoire pour le cas n°3

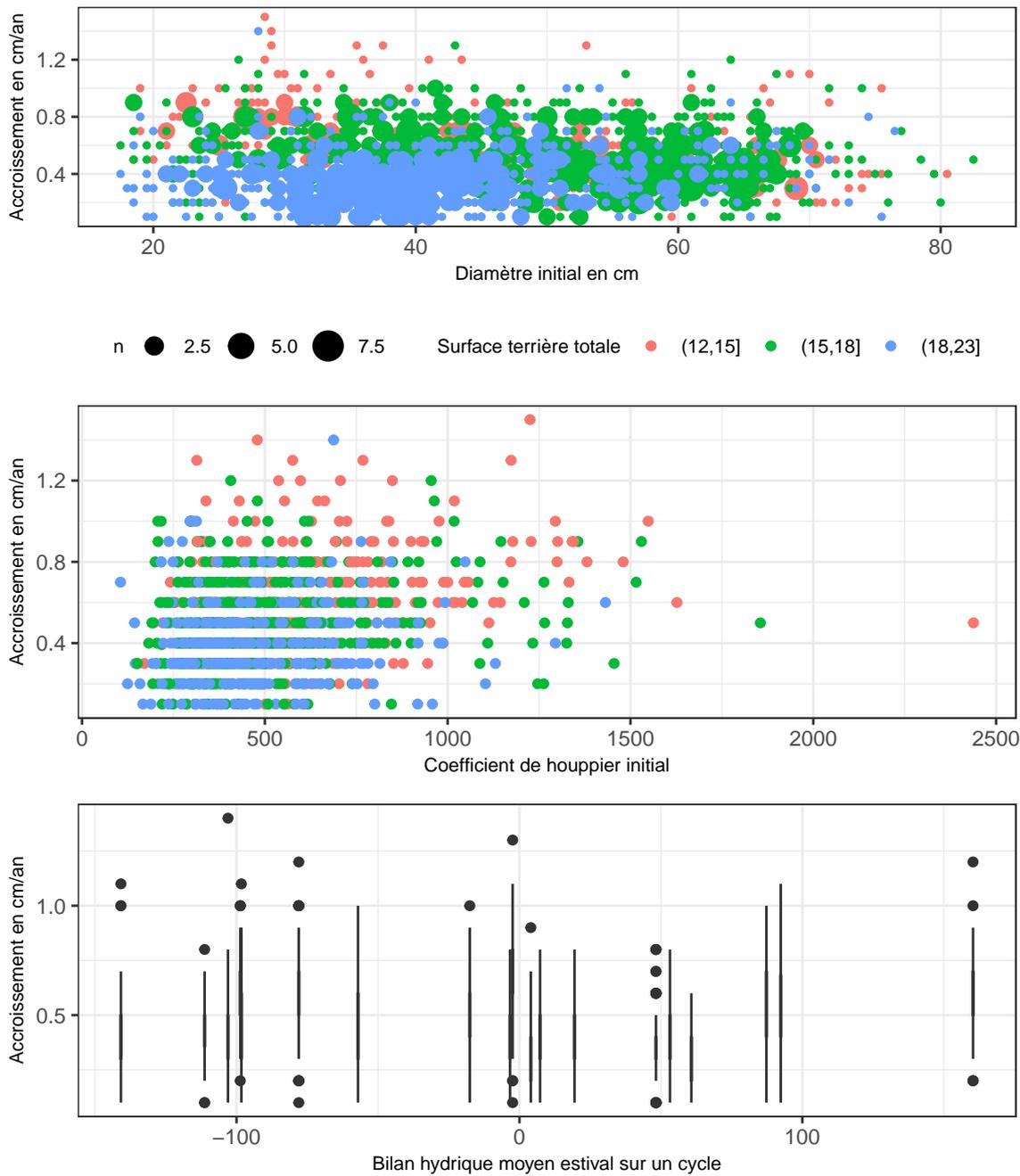


FIGURE K.5 – Analyse exploratoire pour le cas n°4